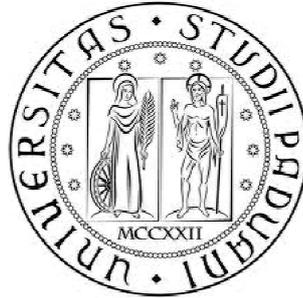


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

SVILUPPO E APPLICAZIONE DEL METODO DELLA TENSIONE DI PICCO ALLA PROGETTAZIONE A FATICA DI GIUNZIONI SALDATE SOLLECITATE A TORSIONE

Relatore: Prof. Giovanni Meneghetti

Laureando: De Marchi Andrea

ANNO ACCADEMICO 2013 – 2014

ai miei Genitori, Diego e Daniela

alla mia Fidanzata Valentina

Andrea De Marchi

INDICE

INDICE.....	1
SOMMARIO	9
Capitolo 1: INTRODUZIONE	11
1.1 - Il metodo NSIF.....	11
1.2 - Il metodo PSM.....	14
1.2.1 - PSM nel modo I.....	15
1.2.2 - PSM nel modo III	19
Capitolo 2: APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO I.....	23
2.1 - PSM nel caso di piastra in trazione con cricche sui due bordi	23
2.1.1 - Modello fisico e numerico.....	23
2.1.2 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	27
2.1.3 - Layout delle mesh utilizzate.....	30
2.1.4 - Verifica dei risultati numerici ottenuti.....	33
2.1.5 - Risultati ottenuti e considerazioni	38
2.1.5.1 - Risultati NSIFs.....	38
2.1.5.2 - Risultati PSM	46
2.1.5.3 - Considerazioni conclusive	50
2.2 - PSM nel caso di ruota dentata cilindrica a denti dritti.....	55
2.2.1 - Modello fisico e numerico utilizzati	55
2.2.2 - Tipologia d'elemento scelta e layout delle mesh utilizzate	58
2.2.3 - Condizioni al contorno	63
2.2.4 - Risultati ottenuti	64
2.3 - Conclusioni del capitolo	69
Capitolo 3: ANALISI DEI RISULTATI PRESENTI IN LETTERATURA	71
3.1 - Programma automatico Matlab® utilizzato per le analisi dei provini in letteratura	72
3.2 - Sonsino.....	76
3.2.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	76
3.2.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	77
3.3 - Yousefi et al.....	82
3.3.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	82
3.3.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	84
3.4 - Amstutz et al.	87

3.4.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	87
3.4.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	88
3.5 - Seeger and Olivier - piena penetrazione.....	91
3.5.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	91
3.5.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	92
3.6 - Seeger and Olivier - cordone d'angolo.....	96
3.6.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	96
3.6.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	99
3.7 - Yung and Lawrence	104
3.7.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	104
3.7.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	105
3.7.2.1 - Piede del cordone	105
3.7.2.2 - Radice del cordone.....	108
3.8 - Siljander et al.....	111
3.8.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	111
3.8.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	112
3.9 - Razmjoo.....	116
3.9.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura	116
3.9.2 - Analisi NSIF e PSM del provino	117
3.9.2.1 - Piede del cordone	118
3.9.2.2 - Radice del cordone.....	121
3.10 - Riassunto dei risultati in letteratura in termini di K_{FE}^{***}	124
3.11 - Risultati in termini di curve di resistenza a fatica	128
3.12 - Confronto tra flange forate e non.....	129
3.13 - Conclusioni del capitolo	132
Capitolo 4: APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO III - CASO: PLANE25	
.....	133
4.1 - Provino circolare sollecitato a torsione con cricca lungo tutta la circonferenza che origina a partire dal diametro esterno.....	133
4.1.1 - Modello fisico e numerico adottato.....	133
4.1.2 - Mesh e risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF.....	136
4.1.2.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	142
4.1.3 - Layout delle mesh utilizzate nell'applicazione del PSM.....	144
4.1.4 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	144
4.1.5 - Riassunto dei risultati.....	152

4.1.6 - Conclusioni del paragrafo	154
4.2 - Giunto a sovrapposizione.....	155
4.2.1 - Modello fisico e numerico adottato.....	155
4.2.2 - Mesh e risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF.....	159
4.2.3 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	165
4.2.4 - Layout delle mesh utilizzate mediante applicazione del PSM	166
4.2.5 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	167
4.2.5.1 - Risultati ottenuti fissando la geometria e variando la dimensione globale d'elemento	167
4.2.5.2 - Risultati ottenuti fissando la dimensione globale d'elemento e variando lo spessore dei tubi	169
4.2.6 - Conclusioni del paragrafo	171
4.3 - Provino circolare sollecitato a torsione con intaglio esteso a tutta la circonferenza.....	171
4.3.1 - Modello fisico e numerico.....	171
4.3.2 - Mesh ottenute tramite l'approccio NSIF.....	175
4.3.3 - Risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF.....	184
4.3.4 - Mesh PSM non controllata.....	198
4.3.4.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	199
4.3.4.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	199
4.3.4.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	216
4.3.4.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 0°	217
4.3.4.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 30°	222
4.3.4.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 45°	227
4.3.4.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 60°	234
4.3.4.3.5 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°	240
4.3.4.3.6 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°	245
4.3.4.3.7 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°	251
4.3.4.3.8 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°	256
4.3.4.4 - Riassunto dei risultati ottenuti.....	260
4.3.5 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e utilizzo dell'algoritmo di meshatura free internamente alla stessa	268
4.3.5.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	272
4.3.5.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	274
4.3.5.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	290
4.3.5.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 0°	292

4.3.5.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 30°	297
4.3.5.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 45°	303
4.3.5.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 60°	308
4.3.5.3.5 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°	319
4.3.5.3.6 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°	324
4.3.5.3.7 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°	329
4.3.5.3.8 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°	334
4.3.5.4 - Riassunto dei risultati ottenuti.....	338
4.3.6 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e algoritmo di meshatura mappata all'interno della stessa	343
4.3.6.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	344
4.3.6.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	344
4.3.6.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	360
4.3.6.4 - Riassunto dei risultati ottenuti.....	361
4.4 - Provino con spallamento sollecitato a torsione.....	366
4.4.1 - Modello fisico e numerico.....	366
4.4.2 - Mesh ottenute tramite l'approccio NSIF.....	369
4.4.3 - Risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF.....	373
4.4.4 - Mesh PSM non controllata.....	380
4.4.4.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	381
4.4.4.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	381
4.4.4.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	390
4.4.4.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°	391
4.4.4.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°	396
4.4.4.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°	401
4.4.4.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°	406
4.4.4.4 - Riassunto dei risultati ottenuti.....	411
4.4.5 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e utilizzo dell'algoritmo di meshatura free internamente alla stessa	415
4.4.5.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	416
4.4.5.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	416
4.4.5.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	424
4.4.5.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°	426
4.4.5.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°	432
4.4.5.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°	437

4.4.5.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°	442
4.4.5.4 - Riassunto dei risultati ottenuti.....	447
4.4.6 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e utilizzo dell'algoritmo di meshatura mapped all'interno dell'areola	451
4.4.6.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	452
4.4.6.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	452
4.4.6.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	460
4.4.6.4 - Riassunto dei risultati ottenuti.....	461
4.5 - Riassunto dei risultati.....	465
4.5.1 - Riassunto dei risultati relativi agli intagli e agli spallamenti di vari angoli d'apertura ottenuti con l'ausilio di una mesh non controllata	466
4.5.2 - Riassunto dei risultati relativi agli intagli e ai spallamenti di vari angoli d'apertura con mesh free controllata dall'areola	468
4.5.3 - Riassunto dei risultati relativi agli intagli e agli spallamenti di vari angoli d'apertura con mesh mapped interna all'areola	470
4.5.4 - Riassunto complessivo di tutti i risultati ottenuti con l'ausilio di una mesh free senza controllo	472
4.5.5 - Riassunto complessivo di tutti i risultati ottenuti con l'ausilio della mesh controllata e free	474
4.5.6 - Riassunto complessivo di tutti i risultati ottenuti con l'ausilio della mesh controllata mapped e free	476
4.6 - Definizione di un parametro di convergenza alternativo	478
4.7 - Conclusioni del capitolo	481
Capitolo 5: LINEE GUIDA PER L'APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO III - CASO: PLANE25	483
Capitolo 6: APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO III - CASO: PLANE83	491
6.1 - Provino circolare sollecitato a torsione con intaglio esteso a tutta la circonferenza.....	491
6.1.1 - Mesh PSM non controllata.....	491
6.1.1.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	491
6.1.1.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	492
6.1.1.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	492
6.2 - Provino con spallamento sollecitato a torsione.....	495
6.2.1 - Mesh PSM non controllata.....	495
6.2.1.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi.....	496
6.2.1.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM	496

6.2.1.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM	496
6.3 - Conclusioni del capitolo	498
Capitolo 7: PROGETTO E UTILIZZO DELLA MACCHINA A FATICA	499
7.1 - Provini	499
7.2 - Progetto della macchina di prova	501
7.2.1 - Calcolo delle dimensioni principali della macchina	501
7.2.2 - Studio del layout della macchina di prova	507
7.2.3 - Verifica dei singoli componenti.....	508
7.2.3.1 - Braccetto	508
7.2.3.1.1 - Verifica statica.....	509
7.2.3.1.2 - Verifica a fatica.....	510
7.2.3.1.3 - Verifica a rifollamento.....	511
7.2.3.2 - Piastrina.....	512
7.2.3.2.1 - Verifica statica.....	513
7.2.3.2.2 - Verifica a fatica.....	516
7.2.3.2.3 - Verifica a rifollamento.....	517
7.2.3.3 - Asta principale.....	518
7.2.3.3.1 - Verifica statica.....	519
7.2.3.3.2 - Verifica a fatica.....	524
7.2.3.3.3 - Verifica a rifollamento.....	526
7.2.3.4 - Bielle.....	527
7.2.3.4.1 - Verifica statica.....	528
7.2.3.4.2 - Verifica a fatica.....	528
7.2.3.4.3 - Verifica a rifollamento.....	529
7.2.3.5 - Perni	530
7.2.3.5.1 - Verifica statica.....	531
7.2.3.5.2 - Verifica a fatica.....	532
7.2.3.6 - Rod Ends.....	533
7.2.3.7 - Bronzine	534
7.2.3.8 - Viti di collegamento	535
7.2.3.8.1 - Verifica statica.....	535
7.2.3.8.2 - Verifica a fatica.....	536
7.2.4 - Verifica dei collegamenti bullonati	537
7.2.4.1 - Calcolo della giunzione bullonata tra asta e provino.....	537

7.2.4.2 - Calcolo della giunzione bullonata tra l'asta principale e le piastrine laterali.....	540
7.2.4.3 - Calcolo della giunzione bullonata tra la prima interfaccia e la seconda.....	541
7.2.4.4 - Calcolo della giunzione bullonata tra seconda interfaccia e la colonna	544
7.3 - Utilizzo del software di controllo per l'esecuzione delle prove desiderate	547
7.4 - Test della macchina di prova.....	557
7.5 - Circuito pneumatico per la valutazione dell'innescò della cricca	566
7.6 - Risultati ottenuti dalle prove sperimentali	569
7.7 - Conclusioni del capitolo	571
Capitolo 8: CONCLUSIONI.....	572
BIBLIOGRAFIA.....	574
Appendice A: PROVINI TESTATI NELLE PROVE SPERIMENTALI	577
A.1 - Provino 1.....	577
A.2 - Provino 2.....	578
A.3 - Provino 3.....	579
A.4 - Provino 4.....	579
A.5 - Provino 5.....	580
A.6 - Provino 6.....	581
A.7 - Provino 7.....	582
RINGRAZIAMENTI.....	583

SOMMARIO

Negli ultimi anni si sono viste affermare diverse metodologie per lo svolgimento di analisi a fatica su giunti saldati realizzati in acciaio strutturale che sfruttano gli approcci locali, come per esempio il metodo NSIFs, modellando le geometrie analizzate come intagli aperti con raggio di raccordo nullo all'apice e angolo d'apertura di 135° ; quest'ultimo permette di raccogliere in un'unica curva di resistenza con la propria banda di dispersione, in funzione del materiale, tutti i dati relativi a geometrie differenti tra loro, mantenendo una variabilità legata solo alla natura statistica del fenomeno. La problematica che affligge questa metodologia è legata alla pesantezza delle analisi da svolgere poiché è necessario ricavare il campo di tensione locale all'apice dell'intaglio utilizzando elementi di dimensione molto piccola, che comportano dei tempi di realizzazione del modello e di calcolo non accettabili in campo industriale. Per questo motivo sono nate delle metodologie alternative come il Peak Stress Method (PSM), che permette di analizzare la vita a fatica di un giunto saldato previa la sola conoscenza della tensione di picco all'apice dell'intaglio. Il metodo è già stato tarato nei casi d'intaglio sollecitato a modo I e II per i vari angoli d'apertura e nel caso di modo III per cricche o intagli con apertura di 135° ; l'obiettivo del lavoro di tesi è estendere il metodo anche in tutti gli altri casi di modo III e ricavare una definizione alternativa a quella già utilizzata finora, che presenta delle problematiche esplicitate durante il proseguo del lavoro, per esprimere la convergenza del metodo stesso. Ci si propone inoltre di progettare e realizzare un banco prove a fatica, di studiare un metodo per la determinazione del numero di cicli d'innescò della cricca e di eseguire delle prove sperimentali su giunti saldati sollecitati a torsione.

Nel primo capitolo è stata riportata una breve introduzione delle metodologie NSIFs e PSM secondo quanto ricavato dalla letteratura attuale.

Nel secondo sono state eseguite una serie d'analisi preliminari nel caso di modo I, per le quali è stato possibile evidenziare i limiti della precedente definizione del criterio di convergenza e proporre quello nuovo; inoltre è stata eseguita la taratura del metodo su un componente reale sollecitato a modo I.

Nel terzo capitolo sono state analizzate col PSM tutte le geometrie testate sperimentalmente in letteratura.

Nel quarto invece si è proceduto con l'estensione del metodo nel caso d'intaglio d'apertura arbitraria sollecitato a modo III.

Nel quinto capitolo sono state riportate le linee guida da seguire per l'applicazione del metodo, basate sui risultati raccolti nel lavoro di tesi.

Nel capitolo 6 si è proposto l'utilizzo di una tipologia alternativa d'elementi per l'esecuzione delle analisi PSM.

Infine nel settimo capitolo si è riportata la parte relativa al progetto e alla realizzazione della macchina di prova a fatica e dell'impianto per la determinazione del numero di cicli d'innescò della cricca; inoltre sono stati diagrammati i risultati sperimentali ottenuti.

Capitolo 1: INTRODUZIONE

In questa parte iniziale dell'elaborato si vogliono descrivere sinteticamente alcune metodologie innovative utilizzate per la stima della vita a fatica dei giunti saldati.

1.1 - Il metodo NSIF

Il primo metodo utilizzato per stimare la vita a fatica dei giunti saldati consiste nel "Notch Stress Intensity Factor", anche detto NSIF, che si riferisce a concetti della meccanica dell'intaglio. Il metodo si basa su precise ipotesi semplificative: poiché il valore del raggio di fondo intaglio nei cordoni di saldatura è di piccola entità e risulta molto differente al variare della tipologia del giunto, l'approccio considera un raggio di fondo intaglio nullo, analizzando un problema di sollecitazione di un intaglio acuto aperto, con angolo di apertura 2α . Tipicamente, nel caso di giunti saldati, quest'ultimo assume il valore di 135° .

Il metodo si basa su un approccio di campo, riassumendo l'intensità dello stesso attraverso il fattore d'intensificazione delle tensioni K_x^V dove x corrisponde al modo di sollecitazione. Nel caso di sollecitazioni di modo I e II, sfruttando un sistema di coordinate centrato sull'apice dell'intaglio come si osserva in figura 1.1, sono state proposte due equazioni, dovute a Gross e Mendelson [1], per ricavare il fattore d'intensificazione delle tensioni:

$$K_I^V = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_\theta)_{\theta=0} r^{1-\lambda_1} \quad (1.1)$$

$$K_{II}^V = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{r\theta})_{\theta=0} r^{1-\lambda_2} \quad (1.2)$$

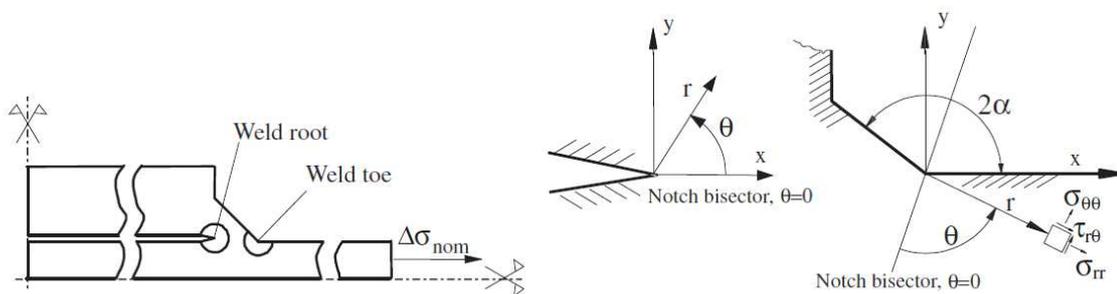


Figura 1.1: A sinistra si ha un esempio di un modello utilizzato per l'analisi di un giunto con saldatura a cordone d'angolo; a destra sono riportati i sistemi di coordinate assunti nel caso di riferimento alla radice o al piede della saldatura (Fonte [2]).

Il grado di singolarità del campo di tensione è stato analizzato da Williams [3] sia per sollecitazioni di modo I che di modo II. Gli autovalori di Williams, che definiscono il suddetto grado di singolarità, dipendono dall'angolo di apertura dell'intaglio; si osserva quindi che le unità di misura degli NSIFs di due intagli con apertura differente risultano diverse tra loro. Il calcolo dei valori degli NSIFs si svolge lungo la bisettrice dell'angolo di apertura dell'intaglio, che corrisponde anche all'unico luogo geometrico sul quale gli effetti di modo I e di modo II sono disaccoppiati.

Nel caso di sollecitazione di modo III, invece, si sfrutta un'estensione delle relazioni di Gross e Mendelson [1] per calcolare il valore dell'intensità del campo di tensione singolare nella zona vicina all'apice dell'intaglio:

$$K_{III}^V = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{\theta z})_{\theta=0} r^{1-\lambda_3} \quad (1.3)$$

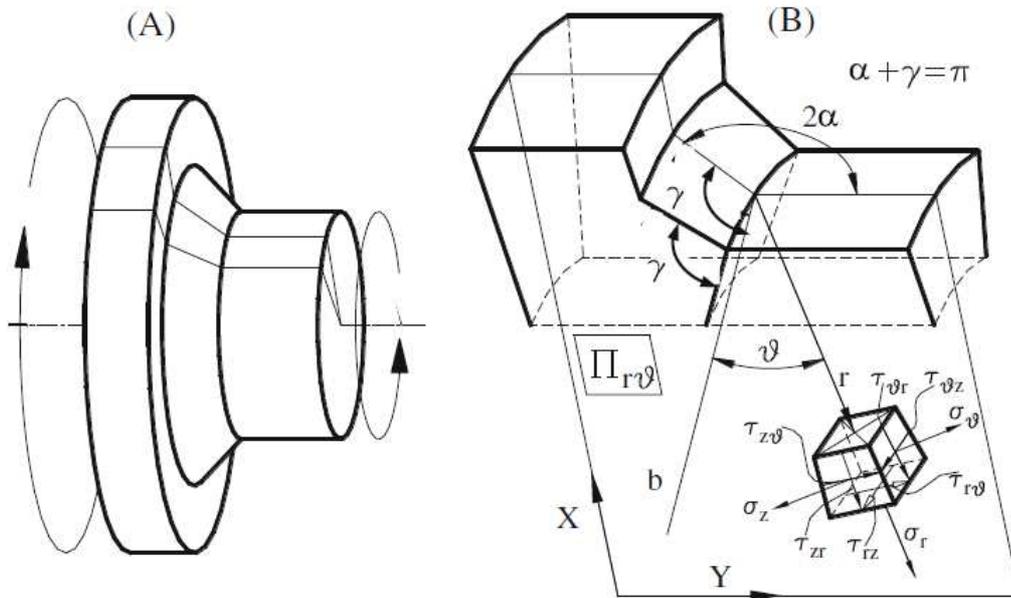


Figura 1.2: A sinistra è riportato un modello utilizzato per l'analisi di giunti saldati sollecitati a modo III. A destra è raffigurato il sistema di coordinate assunto al piede del cordone a piena penetrazione (Fonte [4]).

In questo caso il grado di singolarità del campo di tensione è dato da:

$$\lambda_3 = \frac{\pi}{2\gamma} = \frac{\pi}{2 \cdot (\pi - \alpha)} \quad (1.4)$$

dove γ è l'angolo compreso tra la bisettrice dell'intaglio e il profilo del cordone di saldatura come si può osservare dalla figura 1.2.

Determinato quindi il valore del fattore d'intensificazione delle tensioni corretto per il caso in esame, si può passare alla stima della vita a fatica del giunto saldato.

Facendo riferimento a un caso di modo I è possibile, una volta fissata la famiglia del materiale utilizzato, esprimere la curva di resistenza a fatica solamente in termini di ΔK_I^V in funzione del numero di cicli a rottura a fatica N ; è stato dimostrato [5], [6] che, sfruttando un approccio di questo tipo, è possibile ottenere un'unica curva di fatica con un'unica banda di dispersione anche al variare della geometria del giunto saldato. Questo si può osservare nella figura 1.3, che è riferita al caso di giunti saldati in acciaio strutturale, dove si nota un'elevata dispersione dei risultati se questi ultimi sono espressi in termini di range di tensione e una scarsa dispersione degli stessi se invece sono espressi in termini di range di fattore d'intensificazione delle tensioni.

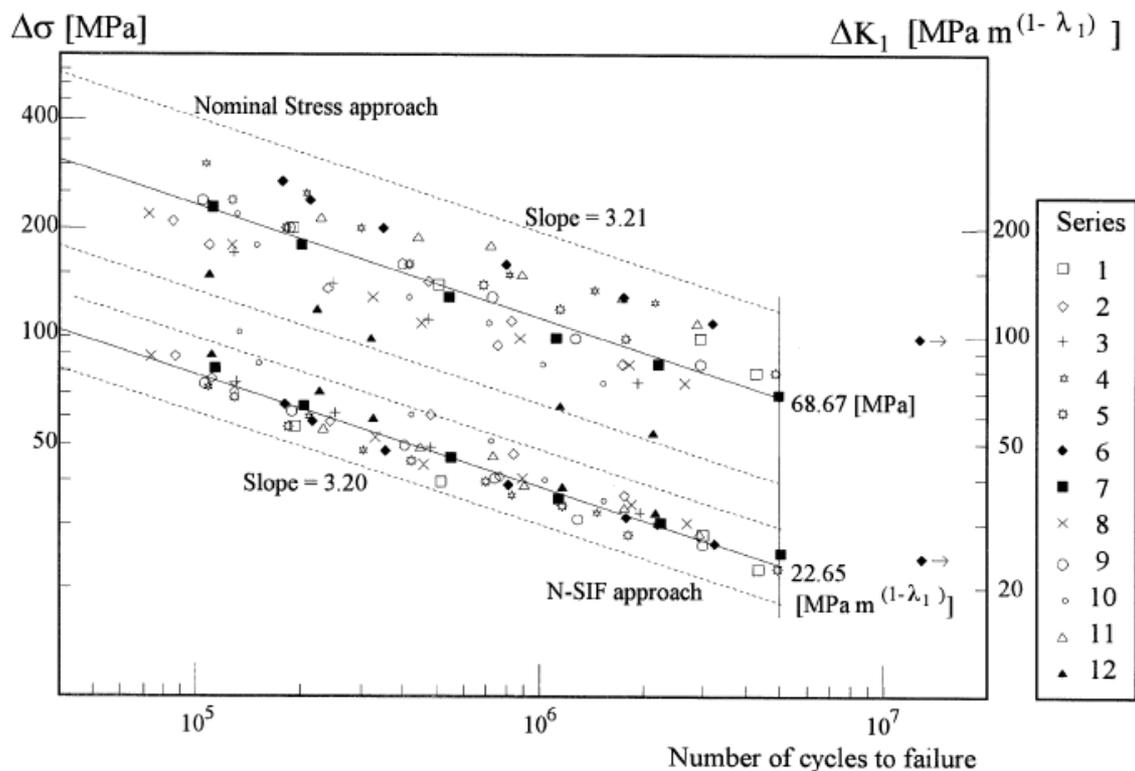


Figura 1.3: Curva di fatica relativa ad alcuni giunti saldati di diverse dimensioni espressa in termini di range di tensione nominale o di range di fattore d'intensificazione delle tensioni. L'angolo d'apertura dell'intaglio è pari a 135° (Fonte [5]).

Il metodo, sempre che le ipotesi illustrate siano soddisfatte, consente perciò di riassumere in un'unica curva di fatica con la propria banda di dispersione tutte le curve che si otterrebbero al variare della geometria del giunto.

Questo procedimento possiede però una problematica intrinseca: la difficile applicabilità in ambito industriale. Infatti, come si può osservare dalla definizione degli NSIFs (1.1) (1.2) (1.3) dove si ha un limite per la distanza r tendente a zero, per il calcolo dei fattori d'intensificazione delle tensioni è necessario analizzare il campo di tensione nelle prossime vicinanze dell'apice dell'intaglio; ciò comporta la necessità dell'utilizzo, nell'ambito dei calcoli numerici svolti attraverso il FEM, di mesh estremamente raffinate vicino all'apice stesso per ottenere un numero sufficiente di risultati numerici nella zona d'interesse. Nella pratica industriale la realizzazione di mesh troppo fitte non è accettabile per l'elevato quantitativo di tempo impiegato la loro costruzione e anche per l'elevata potenza di calcolo che si renderebbe necessaria. Inoltre per ottenere il valore cercato di K_I^V è necessario analizzare il campo di tensione locale prelevando una moltitudine di risultati dal FEM per analizzarli successivamente, complicando ulteriormente il compito del progettista.

1.2 - Il metodo PSM

Per superare i limiti dell'approccio NSIF sono state sviluppate delle metodologie alternative per il calcolo della vita a fatica dei giunti saldati; una di queste consiste nel "Peak Stress Method" anche indicato come PSM.

Mantenendo le medesime ipotesi rispetto all'approccio NSIF per quanto riguarda la geometria del giunto saldato, cioè modellandolo come un intaglio con raggio di raccordo nullo all'apice, si nota che per un'analisi analitica in campo linearmente elastico la tensione al punto di singolarità tende ad infinito; nel caso invece di un'analisi numerica tramite gli elementi finiti, la tensione all'apice ricavata rappresenta un valore fittizio dettato dal livello di raffinatezza della mesh. È stato però dimostrato [7] che, una volta rispettate una serie di condizioni di vincolo, il rapporto tra K_I^V e la tensione di picco σ_{peak} , prima tensione principale calcolata numericamente all'apice dell'intaglio, dipende solamente dalla dimensione media degli elementi utilizzati per la realizzazione della mesh. Il metodo PSM si basa perciò sul calcolo numerico della tensione all'apice dell'intaglio utilizzando una mesh grossolana e sull'utilizzo della stessa per risalire, mediante un semplice calcolo

analitico, al valore di K_I^V che permette di effettuare una stima della vita a fatica del componente.

I vantaggi di questo metodo rispetto all'approccio NSIF sono molteplici. Dapprima non è più necessario utilizzare delle mesh molto raffinate poiché il metodo lavora correttamente anche con elementi all'apice di alcuni ordini di grandezza più grandi rispetto a quelli utilizzati per la stima diretta degli NSIFs; inoltre l'unico risultato che deve essere prelevato dall'analisi FEM è la tensione di picco all'apice dell'intaglio, mentre nell'approccio NSIF è necessario estrarre un insieme numeroso di risultati per poi analizzarli.

Si riportano di seguito le considerazioni svolte sul metodo PSM nel caso di modo I [7] e nel caso di modo III [4].

1.2.1 - PSM nel modo I

Nel caso di problema di modo I la costante di proporzionalità, da moltiplicare alla dimensione globale di elemento d elevata con il corretto esponente, è pari a 1.38 [7]; in questo caso si ottiene:

$$K_{FE}^* = \frac{K_I^V}{\sigma_{peak} \cdot d^{(1-\lambda_1)}} = 1.38 \quad (1.5)$$

Nella (1.5):

- K_I^V è il fattore d'intensificazione delle tensioni;
- σ_{peak} è la prima tensione principale valutata sul nodo all'apice dell'intaglio;
- d è la global element size imposta;
- λ_1 è l'autovalore di Williams ricavato per il modo I.

La costante K_{FE}^* è stata ricavata imponendo una serie di condizioni:

- Utilizzo del software Ansys® 8.0 e degli elementi lineari PLANE42 disponibili all'interno della sua libreria (sostituiti nelle versioni attuali del software dagli elementi PLANE182 con key option K1 posta uguale a 3, cioè impostando nel campo "Element technology" il valore "Simple Enhanced Strn");

- Scelta di una dimensione globale d'elemento pari a d e creazione della mesh free utilizzando elementi standard a quattro nodi;
- Controllo del pattern della mesh vicino all'apice dell'intaglio (in figura 1.4 sono riportati degli esempi di layout corretto della mesh);
- L'angolo di apertura 2α dell'intaglio deve assumere valori tra 0° (caso cricca) e 135° (caso cordone saldatura);
- Il rapporto tra la dimensione caratteristica dell'intaglio a e la dimensione globale degli elementi della mesh d deve essere superiore a un dato valore di soglia per assicurare la convergenza del metodo.

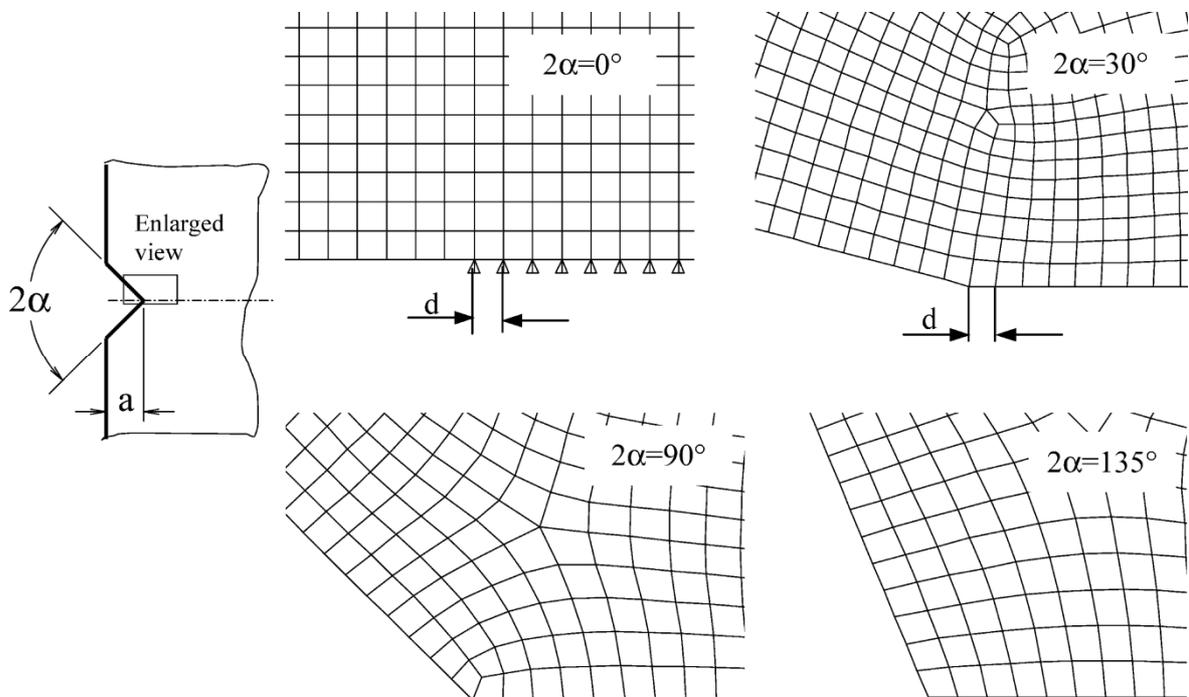


Figura 1.4: Mesh pattern nelle zone vicine all'apice dell'intaglio necessario per la corretta applicazione del PSM (Fonte [7]).

Garantite tutte le condizioni suddette è quindi possibile stimare il valore del ΔK_I^V conoscendo solamente $\Delta\sigma_{peak}$, risalendo quindi alla vita del componente attraverso la curva di fatica espressa come ΔK_I^V in funzione di N . Si è inoltre ricavata, in [7], la curva di fatica in termini di range di tensione di picco $\Delta\sigma_{peak}$ per una global element size pari a 1 mm; la curva è riferita ai giunti saldati realizzati in acciaio strutturale con innesto della cricca al piede del cordone ed è riportata in figura 1.5. Grazie a questa nuova formulazione

è sufficiente ricavare la tensione di picco che agisce sul componente saldato con una mesh di global size 1 mm per stimare la vita a fatica dello stesso; sfruttando l'equazione (1.5) è inoltre possibile effettuare il calcolo numerico della tensione di picco con una mesh con dimensione globale d'elemento diversa da 1 mm, salvo poi riportarsi alla σ_{peak} riferita ad una global element size uguale a 1 mm e, una volta nota quest'ultima, è perciò possibile entrare nel secondo diagramma di figura 1.5 per effettuare una stima della vita a fatica del componente.

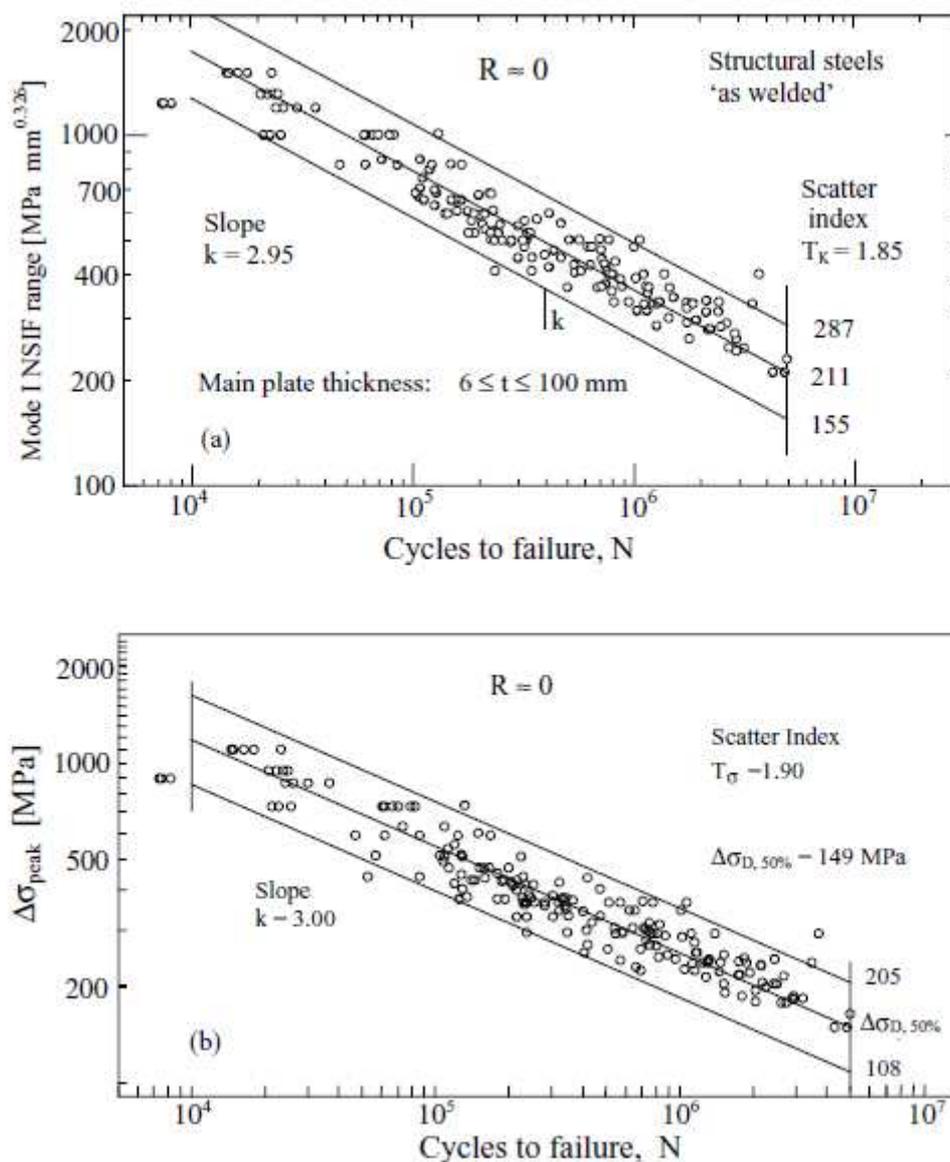


Figura 1.5: Curve di fatica per giunti saldati a cordone d'angolo realizzati in acciaio strutturale. Sopra è riportata la curva espressa col range del fattore di intensificazione delle tensioni, mentre sotto con il range di tensione di picco. L'angolo di apertura dell'intaglio è 135° e la rottura avviene al piede del cordone. I diagrammi si riferiscono a una dimensione globale di elemento pari a 1 mm (Fonte [7]).

Si vuole però sottolineare che il corretto utilizzo del metodo è sottoposto alle condizioni precedentemente elencate e, soprattutto, che non è possibile scegliere una dimensione globale d'elemento arbitrariamente elevata per il calcolo della tensione di picco, ma bisogna sempre rispettare le condizioni di convergenza del metodo. Nel caso di geometrie semplici sollecitate a modo 1 (figura 1.6) la massima global element size accettabile è quella per la quale si ha $a/d \geq 3$, dove a è la dimensione caratteristica dell'intaglio (figura 1.6) e d è la global element size della mesh; dalla figura 1.7 si nota infatti che il metodo converge al valore di 1.38 solo quando la condizione suddetta è rispettata.

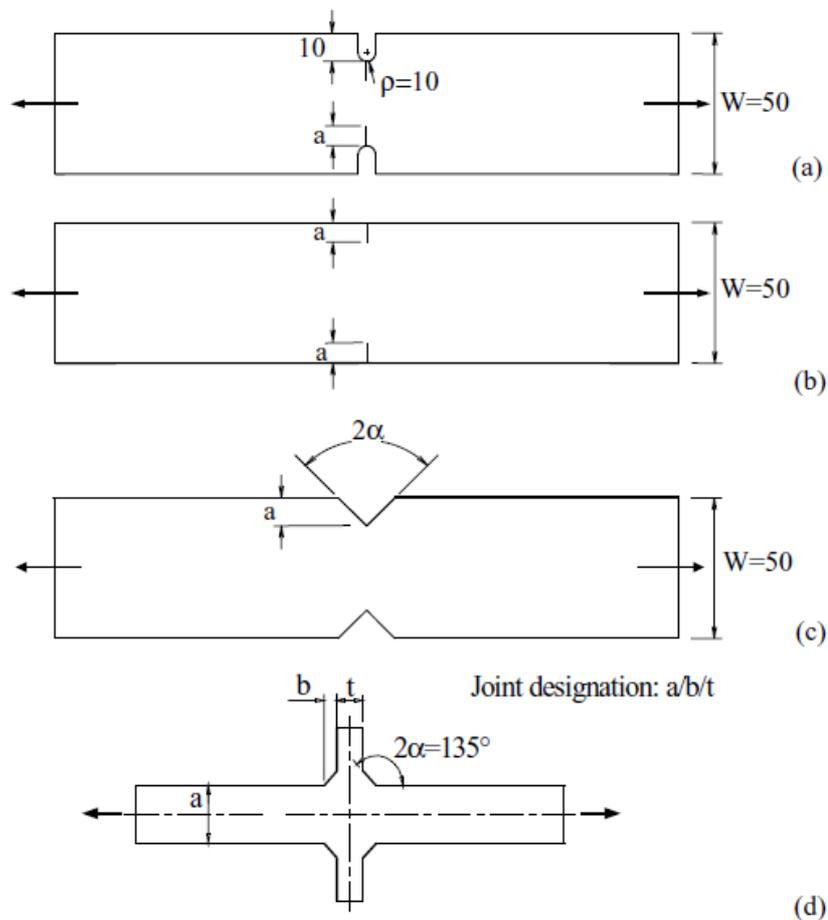


Figura 1.6: Immagini di alcune geometrie semplici sollecitate a modo I e definizione della dimensione caratteristica a dell'intaglio (Fonte [7]).

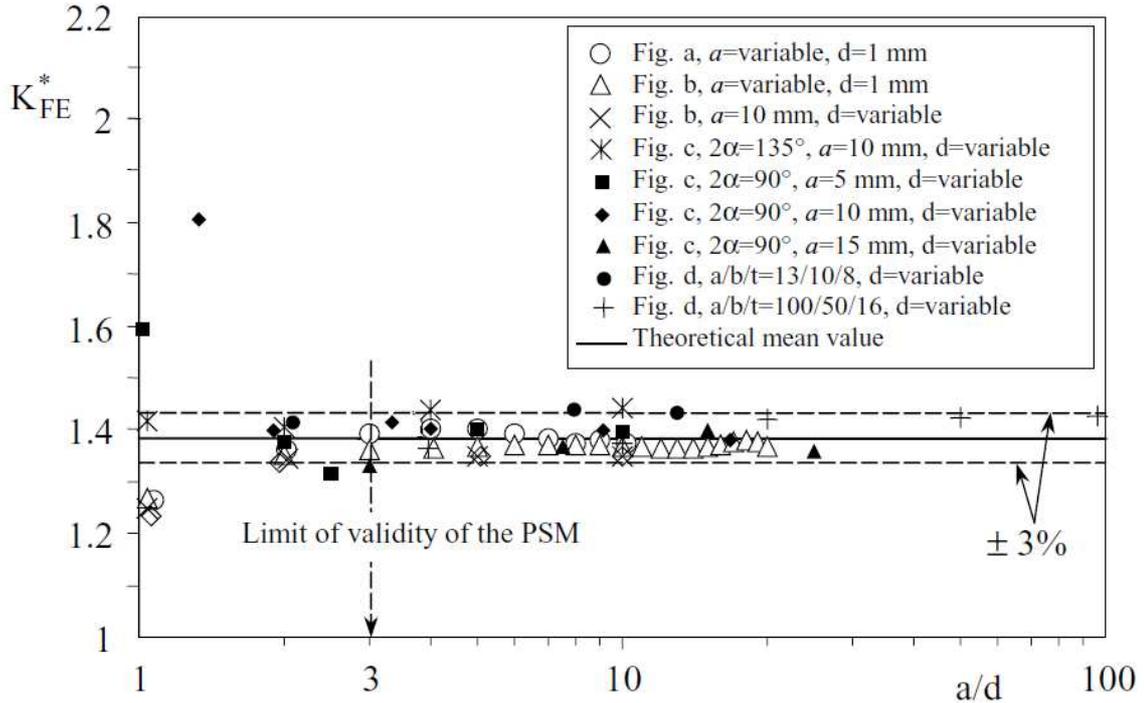


Figura 1.7: Convergenza del valore di K_{FE}^* in funzione del parametro $\frac{a}{d}$; i risultati sono riferiti alle geometrie riportate in figura 1.6. Si osserva che il valore di K_{FE}^* converge a 1.38 per valori di $\frac{a}{d} \geq 3$ (Fonte [7]).

1.2.2 - PSM nel modo III

Le linee guida illustrate nel caso di modo I rimangono invariate anche nel modo III. Si ritiene utile richiamare i concetti fondamentali del PSM nel modo III senza ripercorrere completamente tutta la descrizione precedente; per informazioni più approfondite riferirsi a [4].

Come indicato in [4], nel modo III la costante di proporzionalità ricavata è pari a:

$$K_{FE}^{***} = \frac{K_{III}^V}{\tau_{\theta z, \theta=0, peak} \cdot d^{(1-\lambda_3)}} = 1.93 \quad (1.6)$$

Nella formula precedente K_{III}^V è l'NSIF di modo III, d è la dimensione globale d'elemento utilizzata per generare la mesh, λ_3 è ricavato da (1.4) e infine $\tau_{\theta z, \theta=0, peak}$ è la tensione tangenziale di picco sull'apice dell'intaglio e valutata sulla bisettrice del suo angolo di apertura; la figura 1.2 chiarisce la direzione di questa tensione.

La costante riportata in (1.6) è stata ricavata utilizzando il software Ansys® e gli elementi bidimensionali armonici a quattro nodi PLANE25 presenti all'interno della sua libreria. Le

geometrie analizzate consistono in casi tipici delle strutture saldate, cioè intagli con angolo di apertura pari a 135° ; inoltre, come descritto in precedenza, è necessario assicurare un determinato layout della mesh nell'intorno dell'apice dell'intaglio. Nel caso di analisi al piede del cordone di saldatura solo due elementi devono condividere il punto di singolarità geometrica, mentre nel caso di analisi alla radice gli elementi che condividono il nodo all'apice dell'intaglio devono essere quattro.

Si riporta di seguito quanto ottenuto in [4], dove l'autore ha analizzato attraverso il metodo PSM svariate giunzioni saldate tra tubo e flangia sollecitate a modo III; la figura 1.8 conferma il valore medio, pari a 1.93, ricavato per la costante K_{FE}^{***} .

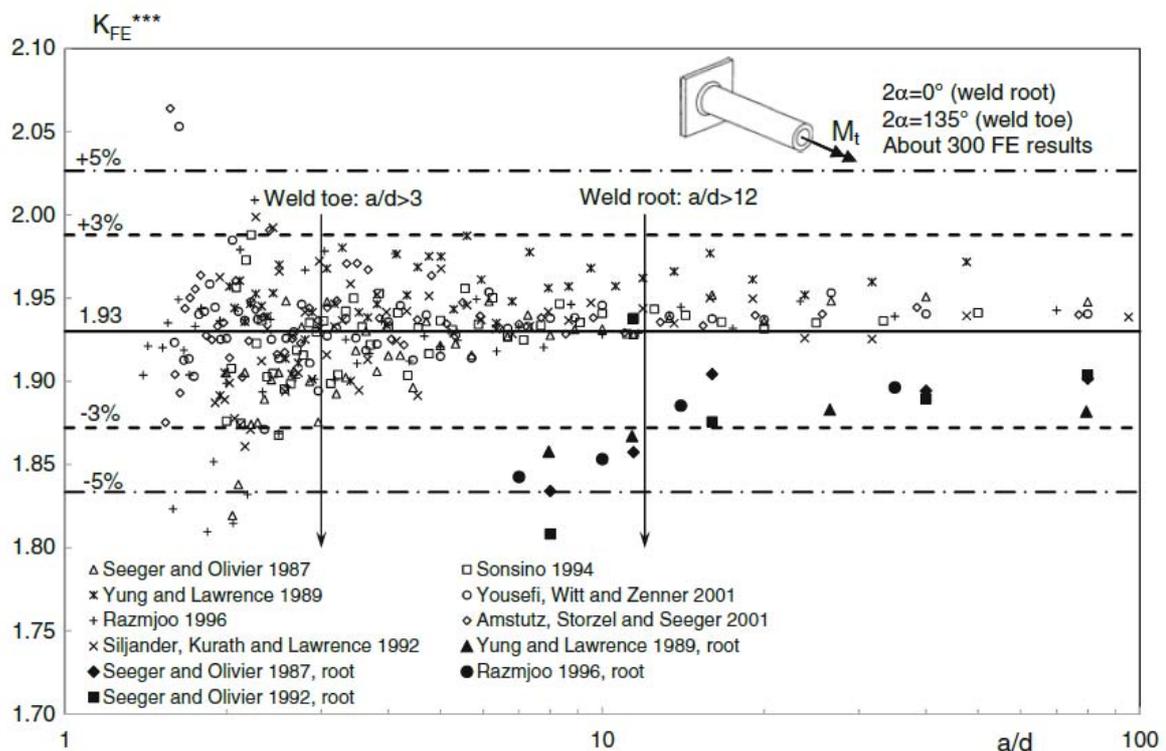


Figura 1.8: Convergenza del valore di K_{FE}^{***} in funzione del parametro $\frac{a}{d}$. Si osserva che il valore del K_{FE}^{***} converge a 1.93 per valori di $\frac{a}{d} \geq 3$ nel caso di rottura al piede, mentre nel caso di rottura alla radice la soglia di convergenza è più elevata e pari a $\frac{a}{d} \geq 12$ (Fonte [4]).

Si noti inoltre come in figura 1.8 sia evidenziato il differente punto di convergenza del metodo nel caso in cui si analizzino rotture a fatica al piede del cordone di saldatura oppure alla radice; infatti, il metodo nel caso di rottura al piede necessita di un $a/d \geq 3$, mentre in quello di rottura alla radice un $a/d \geq 12$ richiedendo quindi delle mesh maggiormente raffinate rispetto al caso precedente. Anche in quest'ultimo caso però gli elementi

mantengono dimensioni medie significativamente più elevate che nel caso di applicazione diretta del metodo NSIF, conservando perciò i vantaggi legati all'utilizzo del PSM.

Confermata quindi la costanza del K_{FE}^{***} , una volta garantito uno dei due criteri di convergenza suddetti, si osserva però che l'unità di misura dell'NSIF dipende dall'angolo d'apertura dell'intaglio; non è perciò possibile comparare direttamente i valori dell'NSIF di due giunti saldati con angolo d'apertura differente per ottenere informazioni sulla vita a fatica. La soluzione a questa problematica è stata proposta in [4]; utilizzando l'approccio SED è stato possibile esprimere la densità d'energia media di deformazione per un componente sollecitato a modo III come:

$$\Delta\bar{W} = \frac{e_3}{E} \left[\frac{\Delta K_3}{R_0^{1-\lambda_3}} \right]^2 \quad (1.7)$$

Dove R_0 è pari a 0.28 mm per i giunti saldati realizzati in acciaio a basso tenore di carbonio ed e_3 dipende dall'angolo d'apertura 2α e dal coefficiente di Poisson ν .

Sostituendo la (1.6) nella (1.7) si ottiene:

$$\Delta\bar{W} = \frac{e_3}{E} \left[\frac{\Delta\tau_{\theta z, \theta=0, peak} \cdot d^{(1-\lambda_3)} \cdot K_{FE}^{***}}{R_0^{1-\lambda_3}} \right]^2 \quad (1.8)$$

Ed eguagliandola alla densità d'energia di deformazione media calcolata per uno stato di deformazione monoassiale planare equivalente si ha:

$$\frac{e_3}{E} \left[\frac{\Delta\tau_{\theta z, \theta=0, peak} \cdot d^{(1-\lambda_3)} \cdot K_{FE}^{***}}{R_0^{1-\lambda_3}} \right]^2 = \frac{1-\nu^2}{2E} \cdot \Delta\sigma_{eq, peak}^2 \quad (1.9)$$

Perciò:

$$\Delta\sigma_{eq, peak} = f_{w3} \cdot \Delta\tau_{\theta z, \theta=0, peak} \quad (1.10)$$

Dove:

$$f_{w3} = K_{FE}^{***} \cdot \sqrt{\frac{2e_3}{1-\nu^2}} \cdot \left(\frac{d}{R_0}\right)^{1-\lambda_3} \quad (1.11)$$

In questo modo è possibile riferire la tensione di picco calcolata ad una tensione equivalente ricavata per uno stato di deformazione piano monoassiale ed utilizzare quest'ultima per la stima della vita a fatica dei giunti saldati sollecitati a modo III. Si noti

che la (1.11) vale solo per rapporto di ciclo $R \geq 0$; nel caso in cui il componente saldato abbia subito un trattamento di distensione efficace a rilassare le tensioni residue e sia sollecitato a $R < 0$ si ha da [4]:

$$f_{w3} = \sqrt{c_w} \cdot K_{FE}^{***} \cdot \sqrt{\frac{2e_3}{1-\nu^2}} \cdot \left(\frac{d}{R_0}\right)^{1-\lambda_3} \quad (1.12)$$

Dove c_w è un coefficiente che è funzione di R ; nel caso in cui $R = -1$ esso assume un valore di 0.5.

Grazie a questo approccio l'autore in [4] ha potuto riassumere i dati in letteratura come:

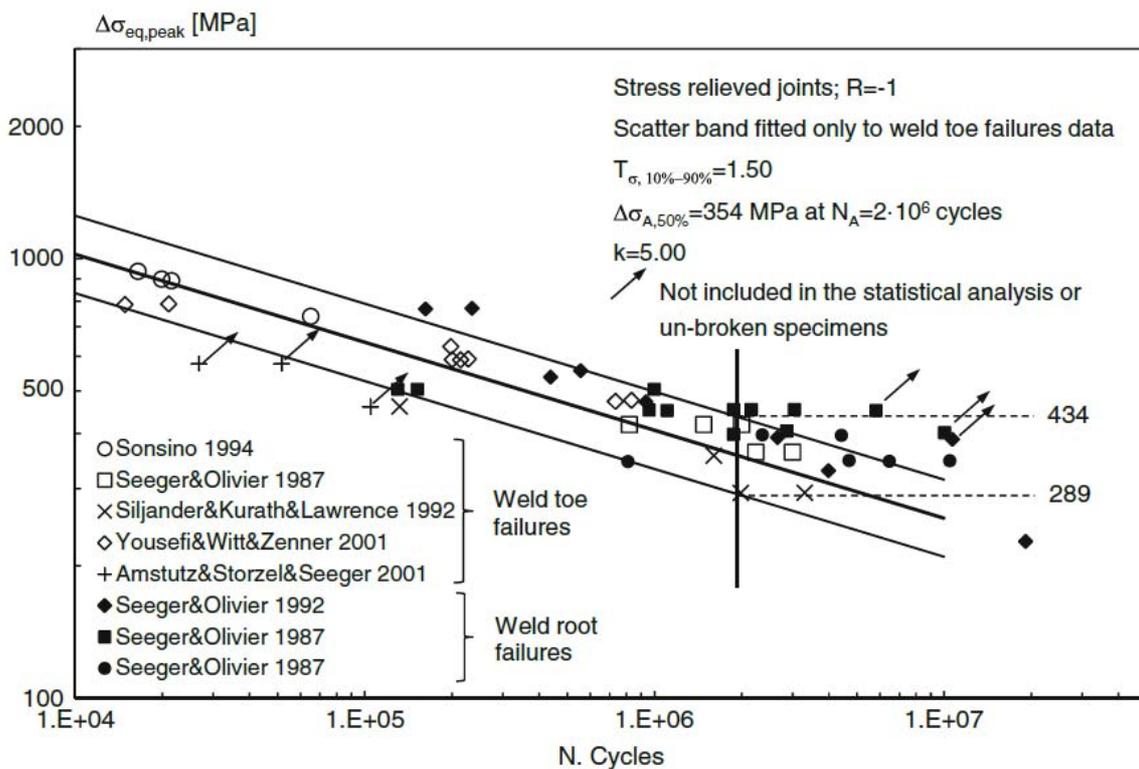


Figura 1.9: Risultati dei test a fatica in termini di range di tensione equivalente. La banda di dispersione è fittata solo sui dati relativi alle rotture al piede e imponendo una pendenza pari a 5. Tutti i dati sono relativi alle prove a $R = -1$, su giunti distesi e con saldature non molate (Fonte [4]).

Si osserva perciò che è stato possibile riassumere con buona approssimazione in un'unica banda di dispersione tarata solo sui risultati relativi alle rotture al piede della saldatura anche quelli relativi alle fratture alla radice.

Capitolo 2: APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO I

2.1 - PSM nel caso di piastra in trazione con cricche sui due bordi

2.1.1 - Modello fisico e numerico

In questo paragrafo si è deciso di analizzare il caso di piastra con due intagli laterali sollecitati a modo I e con angolo di apertura $2\alpha = 0$, che corrisponde al caso di cricche laterali; la figura 2.2 riporta una descrizione del modello fisico di riferimento.

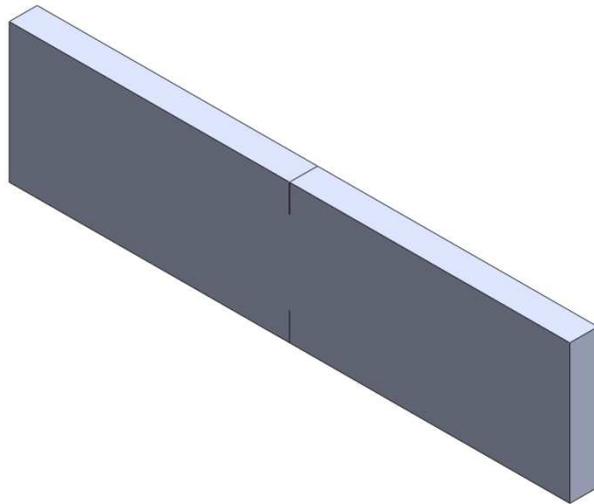


Figura 2.1: Modello di una piastra con cricche ai bordi.

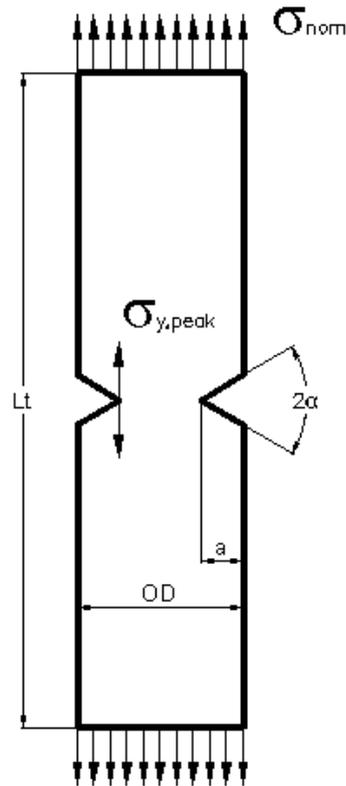


Figura 2.2: Modello fisico adottato per le analisi di una piastra con cricche ai bordi sollecitate a modo I; nella presente analisi l'angolo di apertura dell'intaglio è nullo.

A partire dal modello fisico si è ricavato quello numerico; data la doppia simmetria della geometria è possibile semplificare quest'ultimo modellando solamente un quarto di piastra, ottenendo una configurazione come in figura 2.3.

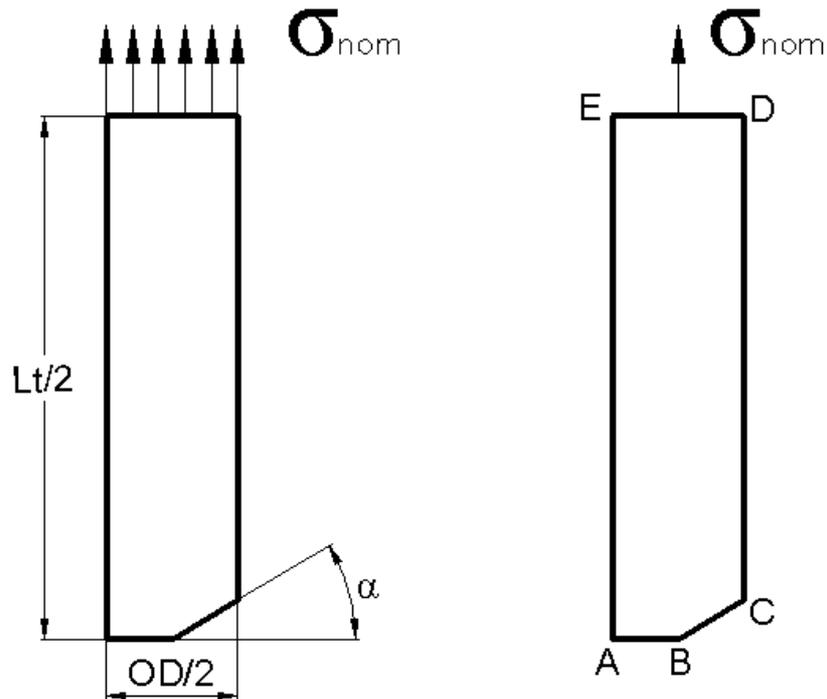


Figura 2.3: Modello semplificato per le analisi numeriche dove si è sfruttata la doppia simmetria del problema originale.

La tipologia d'elemento scelta per queste analisi è il PLANE182, presente nella libreria della versione di Ansys® utilizzata, cioè la 14. Poiché i risultati numerici presenti in letteratura e utilizzati per la validazione del PSM a modo I sono stati ricavati utilizzando gli elementi PLANE42 delle vecchie versioni di Ansys®, è fondamentale impostare correttamente le Key Options degli elementi correnti per ottenere un comportamento congruente con i precedenti; esse inoltre influenzano anche la corretta modellazione dello stato di tensione in esame. Le Key Options impostate in questo caso sono:

- Key Option 1: Element technology = "Simple Enhanced Strn", in Ansys®: K1=3;
- Key Option 3: Element behavior = "Plane stress", in Ansys®: K3=0;
- Key Option 6: Element formulation = "Pure displacemnt", in Ansys®: K6=0.

Per maggiori informazioni sul significato delle singole impostazioni riferirsi all'help in linea di Ansys®.

Il materiale scelto per le analisi è acciaio con modulo d'elasticità pari a 206000 MPa e coefficiente di Poisson uguale a 0.3.

Per ottenere una sollecitazione di modo I sulla piastra e ricostruire la doppia simmetria è necessario imporre alcune condizioni nel modello semplificato; riferendosi alla figura 2.3 si ha:

- Simmetria sulla linea AB;
- Simmetria sulla linea AE;
- Tensione uniforme rivolta verso l'esterno applicata alla linea ED.

Per svolgere l'analisi NSIF è necessario creare un sistema di riferimento locale con l'origine sul punto di singolarità geometrica, con la direzione y ortogonale alla bisettrice dell'angolo e con la direzione x rivolta verso la sezione resistente del provino. Questa configurazione del sistema di riferimento è legata alla geometria scelta in questo caso ed è necessaria per ricavare dall'analisi NSIF la tensione lungo la direzione y abbinata alla distanza di ogni nodo lungo la direzione x , cioè quella della bisettrice dell'angolo. Di seguito è riportata una figura di dettaglio del sistema di riferimento locale adottato.

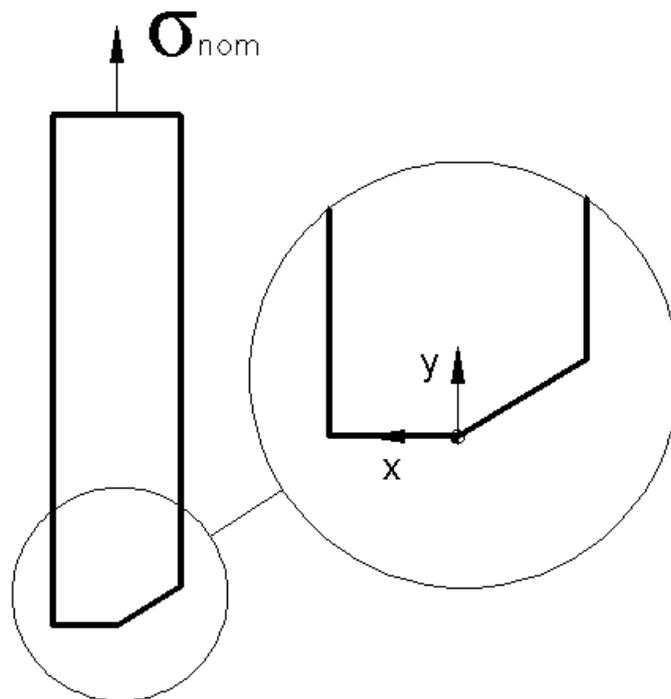


Figura 2.4: Sistema di riferimento locale adottato per una corretta analisi tramite gli NSIFs; si ricorda che nel caso in esame l'angolo d'apertura dell'incisione è nullo.

Nel caso in esame le dimensioni scelte per l'analisi sono:

- *Diametro esterno* $\rightarrow OD = 40 \text{ mm}$;
- *Lunghezza totale della piastra* $\rightarrow L_t = 160 \text{ mm}$;
- *Dimensione caratteristica cricca* $\rightarrow a = 1 \div 19 \text{ mm}$.

Si osserva quindi che la dimensione della cricca parte da un valore minimo pari ad 1 mm fino ad arrivare ad un valore massimo pari a 19 mm, lasciando in quest'ultimo caso solo 2 mm di lunghezza resistente netta.

2.1.2 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Per svolgere l'intera batteria di analisi è stato sviluppato un programma Matlab® che ha la funzione di scrivere un file APDL con tutti i comandi necessari per l'analisi, lanciare un'esecuzione batch di Ansys® e infine effettuare il postprocess dei risultati raccolti. Rimandando all'appendice per i dettagli del programma si ritiene utile raccogliere in questa sezione i dati da inserire per il setup dello stesso e le sue maggiori peculiarità; lo stesso layout di base sarà opportunamente ripreso nel caso di modo III, ma con delle estensioni che saranno specificate nel relativo capitolo.

Si elencano di seguito i vari input da fornire al programma per il suo corretto funzionamento.

1. Riga 29 - Variabile "start". Se posta = 0 il programma crea solamente il file apdl e termina la propria esecuzione, mentre se posta = 1 il programma crea il file apdl, lancia un'esecuzione batch di Ansys® ed esegue il postprocess dei risultati;
2. Riga 35 - Variabile "NSIF". Se posta = 1 il programma esegue l'analisi dell'intaglio attraverso il metodo NSIF, mentre se posta = 0 il programma esegue un'analisi sfruttando il PSM;
3. Riga 19 - Variabile "de". Specifica il diametro esterno del provino in mm;
4. Riga 21 - Variabile "lt". Specifica la lunghezza totale del provino in mm;
5. Riga 22 - Variabile "press". Specifica la pressione, in MPa, applicata sulla linea DE di figura 2.3;

6. Riga 51 - Variabile "two_alfadeg". Specifica il valore dell'angolo d'apertura dell'intaglio in gradi. Nel caso in esame è stato posto uguale a zero.
7. Riga 45 - Variabile "Tabsize". In questa variabile a più dimensioni s'inseriscono in successione le dimensioni caratteristiche della cricca a (vedere figura 2.2) da testare durante la batteria d'analisi;
8. Riga 48 - Variabile "Tabelem". Questa variabile ha due significati in funzione del valore di "NSIF". Se "NSIF" = 1, e quindi si sta svolgendo un'analisi col metodo NSIF, "Tabelem" è una costante che corrisponde alla global element size della mesh che si userà per ogni analisi svolta nella batteria; se, invece, "NSIF" = 0 e quindi si sta svolgendo un'analisi sfruttando il PSM, "Tabelem" è un vettore che contiene nelle sue celle le varie dimensioni globali di elemento da utilizzare per analisi successive.

Terminata la descrizione degli input si prosegue con una spiegazione qualitativa del funzionamento del programma.

Nella prima parte del programma si costruisce il file APDL; si sceglie il tipo d'elemento con le opportune Key Options (per ulteriori informazioni sulla tipologia d'elemento e sulle Key Options scelte vedere il paragrafo 2.1.1), il materiale, si costruisce la geometria del provino e si crea una mesh free controllata solo dalla global element size. Nel caso PSM la mesh ottenuta è già quella definitiva, mentre nel caso NSIF deve essere successivamente raffinata nelle vicinanze dell'apice dell'intaglio; per il dettaglio sull'esecuzione dell'operazione di refine si veda il paragrafo successivo. S'impongono inoltre i vincoli di simmetria sulle due linee AB ed EA di figura 2.3 e la pressione sulla linea DE; si esegue una stampa su file di un'immagine della mesh ottenuta, si cambia il sistema di riferimento locale come descritto in precedenza e si lancia il solutore. A questo punto se si sta facendo un'analisi NSIF si seleziona la linea che giace sull'asse x e che rappresenta la bisettrice dell'angolo d'apertura, si selezionano i nodi che stanno sulla linea e si stampano su file le tensioni lungo la direzione y del sistema di riferimento locale e le posizioni x di ogni nodo selezionato; nel caso in cui si stia svolgendo un'analisi tramite PSM è invece sufficiente selezionare il nodo all'apice dell'intaglio e stampare su file la tensione lungo la direzione y locale di quest'unico nodo.

Terminata la scrittura del file APDL, se la variabile "start" è pari a 1 viene lanciata l'esecuzione batch di Ansys®, mentre se è uguale a 0 il programma termina la sua esecuzione.

Considerando il caso in cui si avvia l'esecuzione batch di Ansys®, il programma Matlab® attende la stampa dei file di output contenenti le tensioni e le posizioni dei nodi selezionati. Una volta creati questi file Matlab® li preleva, ne legge il contenuto e salva su apposite variabili del suo spazio di lavoro le informazioni d'interesse; inoltre, nel caso in cui si stia svolgendo un'analisi NSIF, calcola e diagramma in un apposito grafico il valore di K_I^V per ogni nodo selezionato sfruttando i dati appena raccolti.

A questo punto, se l'analisi è svolta tramite il metodo NSIF, il programma Matlab® richiede una serie di input da parte dell'utente, volti a determinare il valore medio di K_I^V e l'estensione del campo locale di tensione x^* con l'aiuto di un occhio critico da parte dell'utilizzatore.

Infine il programma salva in un file Excel® i risultati ottenuti: se l'analisi è stata svolta tramite il PSM vengono salvate su ogni riga del file la dimensione caratteristica dell'intaglio, la dimensione globale d'elemento e la tensione di picco; se si è svolta un'analisi tramite NSIFs il programma salva sul file tutti i risultati nodali necessari per diagrammare l'andamento della tensione e del K_I^V in funzione della distanza dall'apice dell'intaglio. In quest'ultimo caso quindi si ottengono svariati fogli all'interno del file, ognuno dei quali si riferisce ad una particolare geometria caratterizzata da una fissata dimensione della cricca; all'interno di ogni foglio si possono trovare le distanze dei singoli nodi dall'apice dell'intaglio (quelli selezionati in precedenza cioè lungo la bisettrice dell'angolo d'apertura), le tensioni e i valori di K_I^V per ogni nodo, il valore medio di K_I^V e l'estensione del campo locale di tensione ricavati grazie all'interazione dell'utente. Infine viene creato un foglio riassuntivo che riporta su ogni riga informazioni sulla geometria analizzata, il valore medio del fattore d'intensificazione delle tensioni e il valore d'estensione del campo locale di tensione del quale si discuterà più avanti.

Si vuole infine sottolineare che questa è la versione del programma sviluppata per il provino con cricche laterali sollecitate a modo I ma, variando opportunamente la variabile "two_alfadeg", è possibile analizzare anche casi con angolo d'apertura maggiore di 0°.

2.1.3 - Layout delle mesh utilizzate

Si vuole ora analizzare la mesh ottenuta utilizzando le due modalità d'analisi NSIF e PSM. Nel caso di analisi NSIF, come già illustrato, il procedimento di costruzione della griglia d'elementi consta nella creazione di una mesh free imponendo una global element size e nell'applicazione di una serie di refinement localizzati sul punto geometrico che rappresenta l'apice della cricca. Il numero dei refine non può essere arbitrariamente elevato; infatti, se quest'ultimo aumenta troppo, Ansys® si blocca restituendo un errore imputabile al raggiungimento della minima dimensione d'elemento gestibile per quella geometria. La volontà è pertanto quella di cercare di raggiungere il suddetto limite per avere degli elementi più piccoli possibile; per questa necessità viene in aiuto il programma automatico in Matlab®. Una volta inserito il numero massimo dei refine che si vogliono utilizzare, il programma lancia Ansys® una prima volta utilizzando proprio quel limite massimo. Se la generazione della mesh, e quindi l'analisi, viene completata con successo il programma Matlab® passa alla fase di postprocess; in caso contrario diminuisce il numero massimo dei refine da effettuare di una unità e riprova ad eseguire l'analisi. Se l'analisi non è nuovamente completata itera il processo di diminuzione dei refine finché non trova una configurazione funzionante.

Nella geometria in esame, per la quale durante le analisi NSIF si è sempre adottata una global element size unitaria, si è imposta una soglia massima così descritta:

- Esecuzione di N°6 refine sul punto geometrico che rappresenta l'apice della cricca, con livello di refine minimo e con una profondità di refine pari a 10 elementi;
- Esecuzione di N°4 refine sul punto geometrico che rappresenta l'apice della cricca, con livello di refine minimo e con una profondità di refine pari a 5 elementi.

Si ritiene utile riportare in questo paragrafo il numero massimo dei refine che è stato possibile eseguire per ogni singola geometria analizzata.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità cricca a [mm]	N° refine da 10 elementi	N° refine da 5 elementi
0	1	6	1
0	2	6	2
0	3	6	3
0	4	6	3
0	5	6	2
0	6	6	2
0	7	6	2
0	8	6	2
0	9	6	2
0	10	6	2
0	11	6	2
0	12	6	3
0	13	6	3
0	14	6	2
0	15	6	3
0	16	6	3
0	17	6	3
0	18	6	4
0	19	6	4

Tabella 2.1: Numero di refine massimo accettabile per le varie geometrie analizzate.

Si riportano di seguito alcune immagini della mesh ottenuta tramite il metodo NSIF per la geometria in esame e per una dimensione di cricca pari a 8 mm.

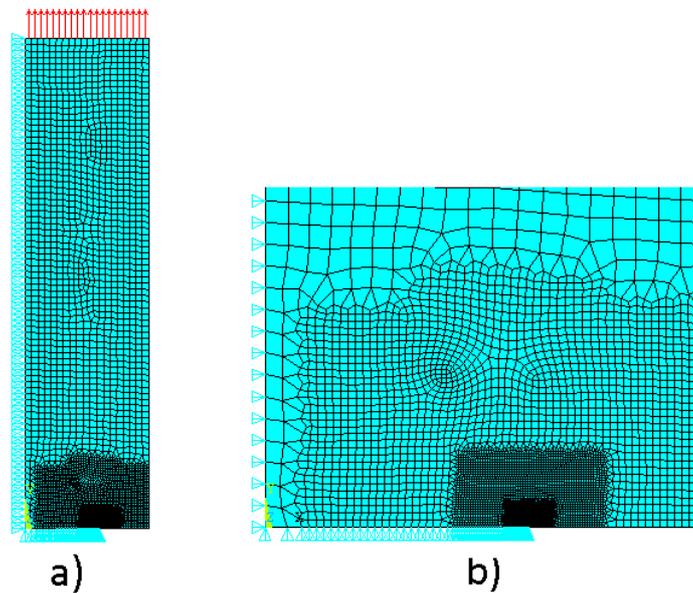


Figura 2.5: Mesh ottenuta nel caso d'analisi tramite NSIFs. a) Mesh complessiva e condizioni al contorno; b) Ingrandimento della mesh nelle prossimità dell'apice della cricca. Entrambe le immagini si riferiscono ad una piastra di larghezza 40 mm e una cricca di dimensione 8 mm.

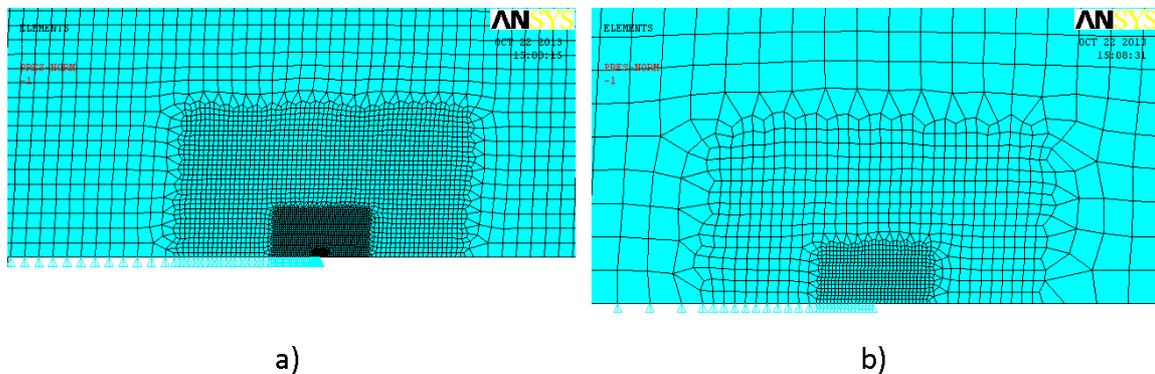


Figura 2.6: Ulteriori ingrandimenti della mesh nelle prossimità dell'apice della cricca. In b) si possono vedere gli elementi più piccoli creati di dimensione pari a circa $1.5 \cdot 10^{-4}$ mm. Entrambe le immagini si riferiscono ad una piastra di larghezza 40 mm e una cricca di dimensione 8 mm.

Nel caso di analisi mediante PSM si utilizza invece una mesh uniforme ottenuta impostando solamente la global element size della mesh e lanciando l'algoritmo di meshatura free. Di seguito si riporta un esempio di quanto ottenuto nel caso di cricca di dimensione 8 mm.

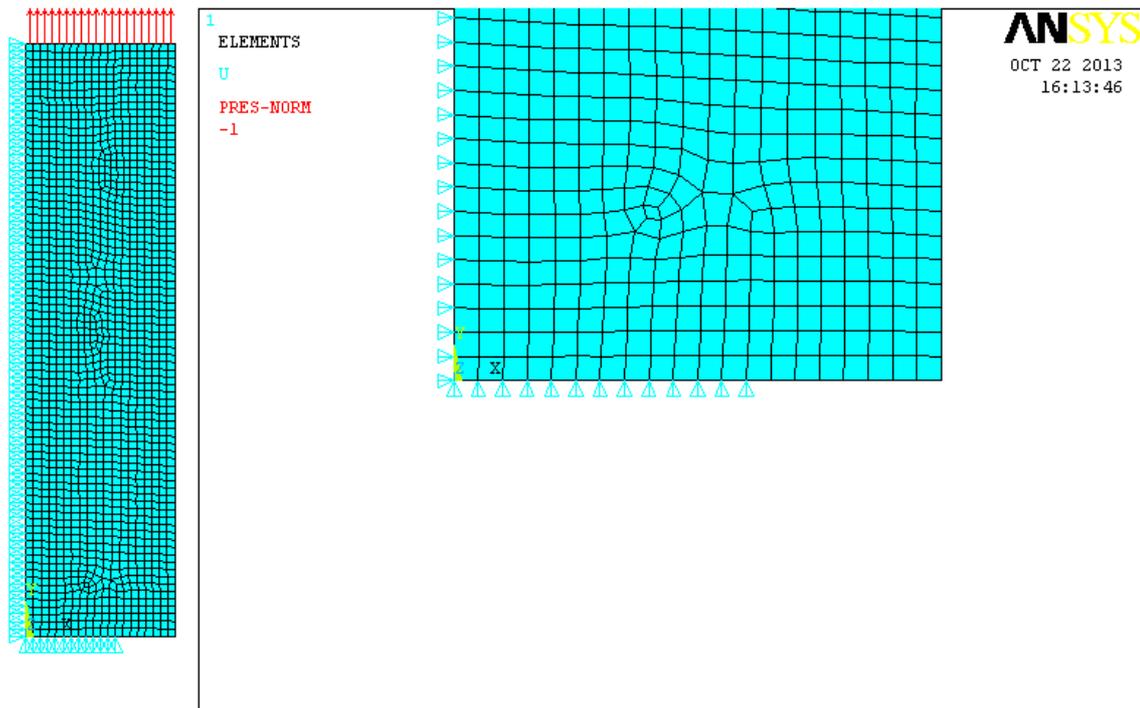


Figura 2.7: Immagine della mesh ottenuta applicando il PSM ad un provino di larghezza 40 mm con una cricca di dimensione 8 mm e ingrandimento della stessa nella zona adiacente all'apice della cricca.

2.1.4 - Verifica dei risultati numerici ottenuti

Si noti che tutti i risultati riportati di seguito sono stati ricavati utilizzando le impostazioni descritte all'interno del paragrafo 2.1.1; per la tipologia d'elementi, le Key Options e tutte le altre informazioni che determinano il modello riferirsi a tale paragrafo.

Prima di riassumere i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo NSIF si ritiene utile verificare la correttezza del modo di procedere prendendo come campione una singola configurazione geometrica con ampiezza di cricca fissata. Con questa configurazione si vuole assicurare che:

1. Il campo di tensione ottenuto numericamente sia coerente con quanto atteso analiticamente;
2. L'andamento del K_I presenti il plateau atteso.

Riguardo alla questione numero 1 si ritiene necessario verificare che la pendenza del campo di tensione numerico sia coerente con quella analitica legata all'autovalore di Williams che, in questo caso particolare di cricca, è pari a 0.5.

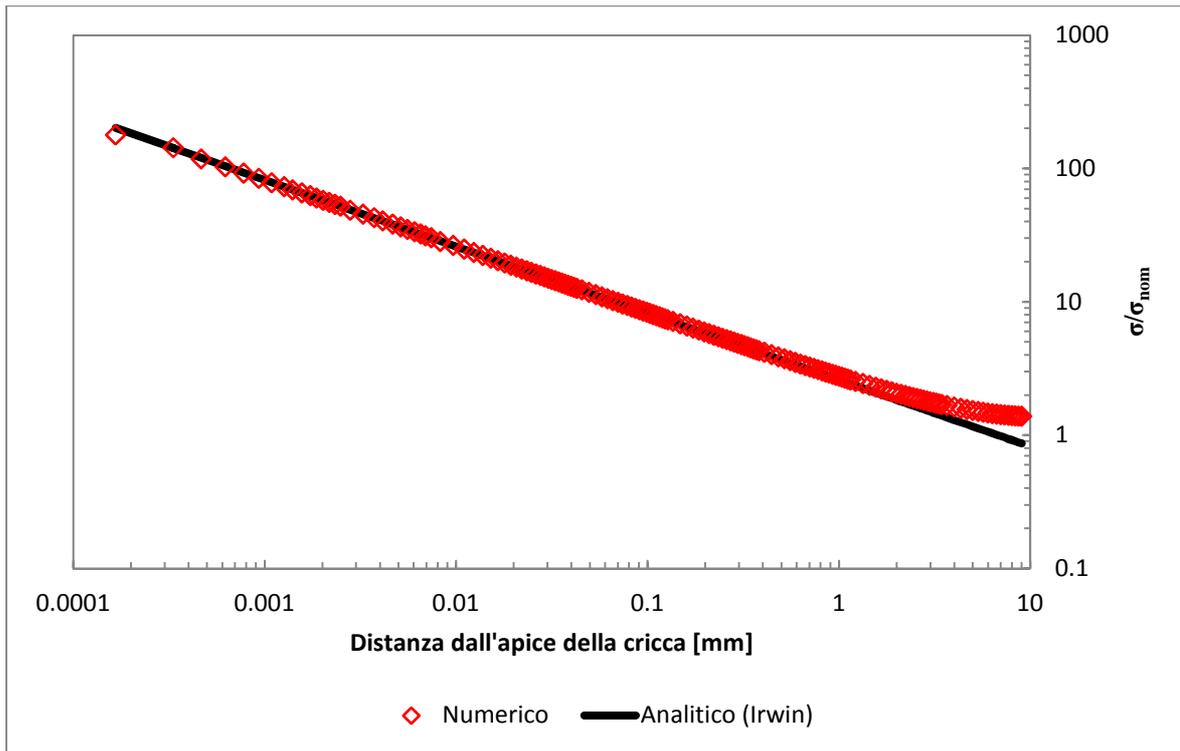


Figura 2.8: Verifica della correttezza del campo di tensione ricavato numericamente, dove con i rombi rossi sono indicati i risultati numerici e con la retta continua si riporta il campo di tensione analitico ricavato dalle formule di Irwin. Il caso in esame si riferisce a una piastra con due cricche sui lati di dimensione caratteristica pari a 10 mm e sollecitate a modo I.

Nella figura 2.8 si è diagrammato il campo di tensione numerico ottenuto dalle analisi FEM impostate come descritto in precedenza; in questo caso particolare la piastra ha due cricche sui lati esterni con dimensione caratteristica pari a 10 mm. Per confronto col precedente nello stesso diagramma è stato riportato il campo di tensione teorico ottenuto attraverso la formula di Irwin, opportunamente semplificata nel caso di cricca:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{nom}} = \frac{K_I}{\sigma_{nom} \cdot \sqrt{2\pi x}} \quad (2.1)$$

Il valore del $\frac{K_I}{\sigma_{nom}}$ è stato calcolato utilizzando l'espressione analitica legata alla geometria in esame:

$$\left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right)_{an} = \sqrt{a} \cdot \left[1.98 + 0.36 \cdot \left(\frac{2a}{w}\right) - 2.12 \cdot \left(\frac{2a}{w}\right)^2 + 3.42 \cdot \left(\frac{2a}{w}\right)^3 \right] \quad (2.2)$$

dove a è la dimensione caratteristica della cricca, w è la larghezza della piastra valutata in direzione ortogonale rispetto al carico e con il pedice an si indica che il rapporto è inteso calcolato analiticamente e non numericamente.

Analogamente per via numerica si è ricavato:

$$\left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}} \right) = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_\theta)_{\theta=0} \cdot r^{1-\lambda_1}}{\sigma_{nom}} \quad (2.3)$$

Dove con il limite per r che tende a zero si sono considerate le tensioni d'apertura nelle prossime vicinanze dell'apice della cricca e valutate lungo la sua bisettrice.

Si osserva quindi che nelle zone centrali del diagramma in figura 2.8 il campo di tensione ottenuto numericamente ha una buona correlazione con quello analitico ricavato attraverso le formule di Irwin. Questa zona nella quale si osserva una buona correlazione è limitata alla parte centrale del campo di tensione per due motivi:

1. Nel caso analitico, adottando un modello lineare elastico, la tensione valutata lungo y nelle zone nell'immediata adiacenza dell'apice della cricca tende all'infinito; il modello numerico non può tener conto di questa peculiarità e presenta una tensione inferiore a quella teorica e strettamente legata alla dimensione degli elementi della mesh nelle zone adiacenti al punto di singolarità geometrica;
2. Le zone molto lontane dall'apice della cricca presentano anch'esse una marcata differenza; questa è data dal fatto che nel caso numerico il campo di tensione calcolato tende effettivamente alla tensione nominale lorda applicata alla piastra, mentre il campo analitico di Irwin continua a mantenere la stessa pendenza.

S'intende ora diagrammare il campo di $\frac{K_I}{\sigma_{nom}}$ ottenuto dall'analisi numerica relativa alla stessa geometria e confrontarlo col valore analitico.

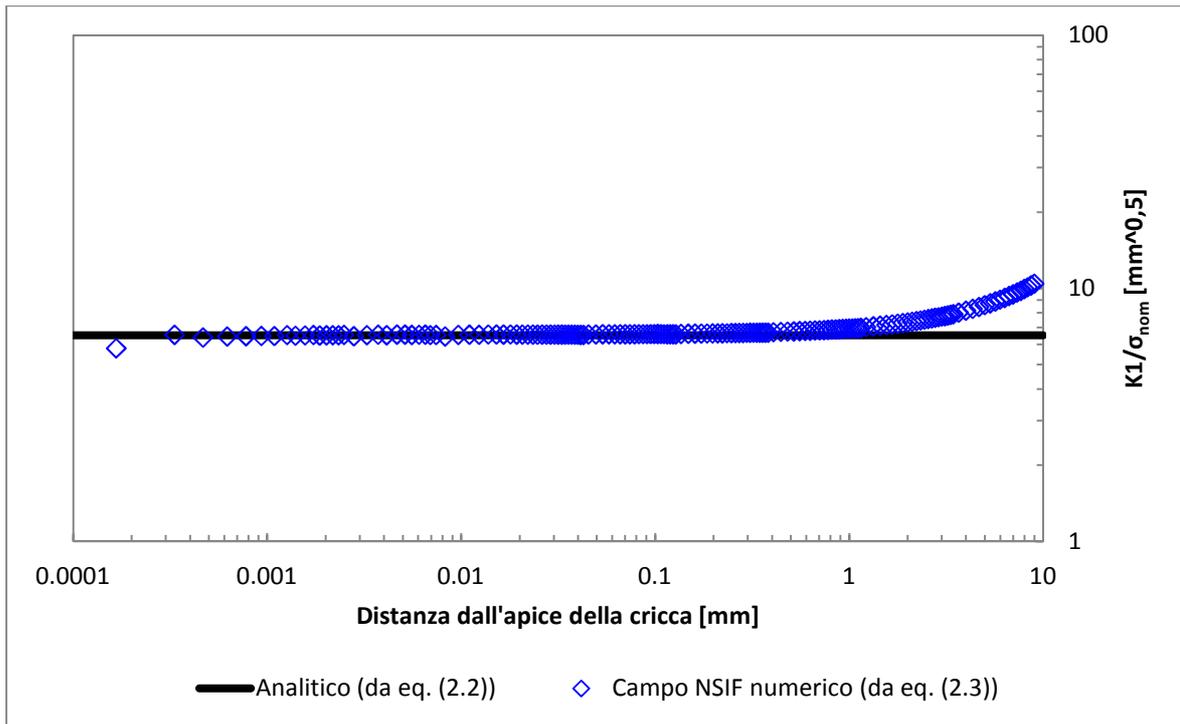


Figura 2.9: Campo di NSIFs ricavato numericamente. Il caso in esame si riferisce a una piastra con due cricche sui lati di dimensione caratteristica pari a 10 mm e sollecitate a modo I.

Dapprima si osserva che il campo numerico di NSIFs ricavato in figura 2.9 presenta il plateau che ci si aspettava; nella zona pianeggiante è quindi necessario mediare il K_I dei punti ricavati per trovare il valore "medio" ricercato di $\frac{K_I}{\sigma_{nom}}$ (si noti che in questo caso nel quale non si è inserito alcun pedice s'indente il rapporto calcolato numericamente). Si osserva anche in questo caso una buona correlazione tra i risultati numerici e quelli analitici nella parte centrale del diagramma, giustificata dalle questioni già analizzate.

Si riporta di seguito una tabella che rende conto dell'esigua differenza tra il $\frac{K_I}{\sigma_{nom}}$ calcolato numericamente, ottenuto mediando più valori all'interno del plateau, e quello analitico.

$\left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right) [mm^{0.5}]$	$\left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right)_{analitico} [mm^{0.5}]$
6.573	6.507

Tabella 2.2: Confronto tra il valore analitico (da eq. (2.2)) e quello numerico (da eq. (2.3)) medio dell'NSIF normalizzato sulla tensione nominale lorda.

Per completezza si vuole riportare anche un confronto tra i valori numerici e quello analitico del fattore di forma α , utilizzato per calcolare in modo semplice il K_I tenendo conto del fatto che la piastra nella realtà non ha dimensioni infinite.

Per una piastra di dimensioni infinite, infatti, si avrebbe:

$$K_I = \sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

Tenendo conto però delle dimensioni finite che la piastra assume nella realtà si ottiene:

$$K_I = \alpha \cdot \sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

Nel caso in esame, noto quindi il $\left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right)_{an}$ da (2.2) è possibile ricavare il valore di α analitico come:

$$\alpha_{an} = \left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right)_{an} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi a}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \left[1.98 + 0.36 \cdot \left(\frac{2a}{w}\right) - 2.12 \cdot \left(\frac{2a}{w}\right)^2 + 3.42 \cdot \left(\frac{2a}{w}\right)^3\right] \quad (2.6)$$

In parallelo con quanto ricavato analiticamente si ha:

$$\alpha = \left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi a}} = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_\theta)_{\theta=0} \cdot r^{1-\lambda_1}}{\sigma_{nom}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \quad (2.7)$$

Dal confronto si ottiene:

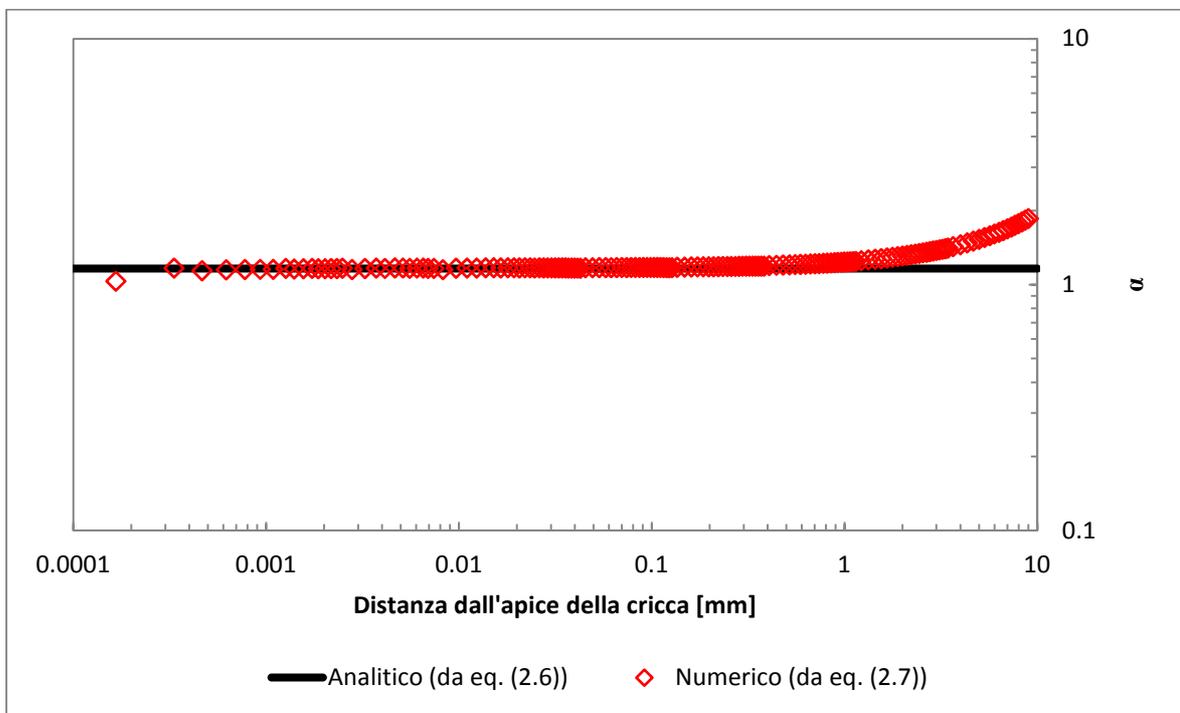


Figura 2.10: Confronto tra i valori di α ricavati numericamente e quello analitico. Il caso in esame si riferisce a una piastra con due cricche sui lati di dimensione caratteristica pari a 10 mm e sollecitate a modo I.

Anche in quest'ultimo diagramma si osserva una buona correlazione tra i risultati numerici e quello analitico.

2.1.5 - Risultati ottenuti e considerazioni

2.1.5.1 - Risultati NSIFs

Assodata quindi la correttezza del modo di procedere, si riportano di seguito i risultati ottenuti tramite l'applicazione del metodo NSIF e, successivamente, quelli ottenuti attraverso le analisi PSM.

Si riportano dapprima tutti i campi di tensione ricavati per ogni singola geometria e riassunti in un unico diagramma complessivo.

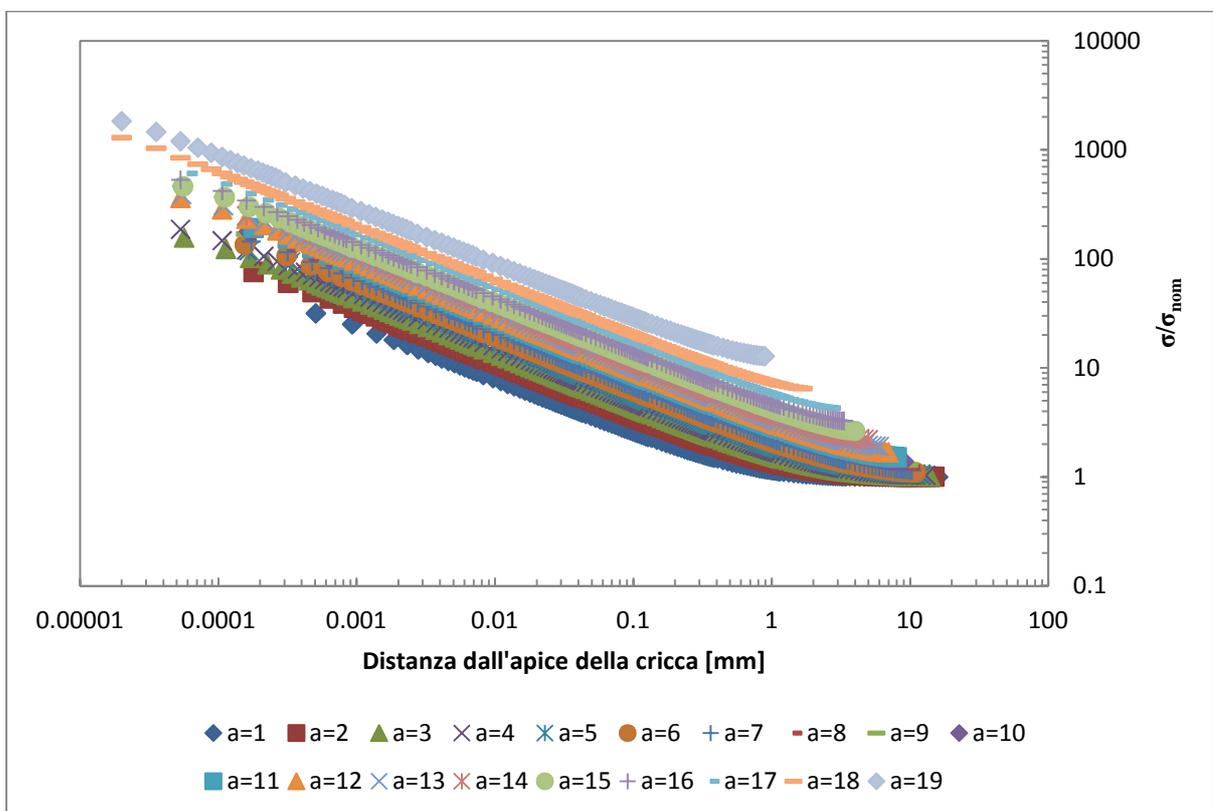


Figura 2.11: Riassunto dei campi di tensione ottenuti al variare delle dimensioni della cricca. Il caso in esame si riferisce a piastra con due cricche sui lati sollecitate a modo I.

Dalla figura 2.11 si osserva che all'aumentare delle dimensioni della cricca il campo di tensione, normalizzato rispetto al valore di tensione nominale applicata, tende ad assumere valori più elevati, coerentemente con quanto atteso a causa della diminuzione della sezione

resistente del provino. In ogni caso il campo di tensione locale mantiene sempre la stessa pendenza, pari a 0.5 nel caso in esame, come descritto dall'autovalore di Williams.

Inoltre dal punto di vista puramente numerico si può osservare che gli elementi più piccoli che si trovano vicino all'apice della cricca presentano delle dimensioni inferiori per cricche con dimensioni caratteristiche più elevate; quanto affermato si può dedurre direttamente dalla figura 2.11 osservando che i campi di tensione che si estendono nella parte più a sinistra del grafico sono quelli relativi a cricche di dimensioni maggiori. Questo fatto è imputabile a un comportamento intrinseco di Ansys®, poiché per ogni dimensione di cricca si è sempre ricercato il numero massimo di raffinamenti della mesh applicabili prima di ottenere un messaggio di errore da parte del software (vedere anche tabella 2.1).

Per effettuare alcune considerazioni sul diagramma precedente si ritiene utile riportare un altro grafico che rappresenta gli stessi campi di tensione della figura 2.11, riferiti però solamente a 5 dimensioni di cricca scelte.

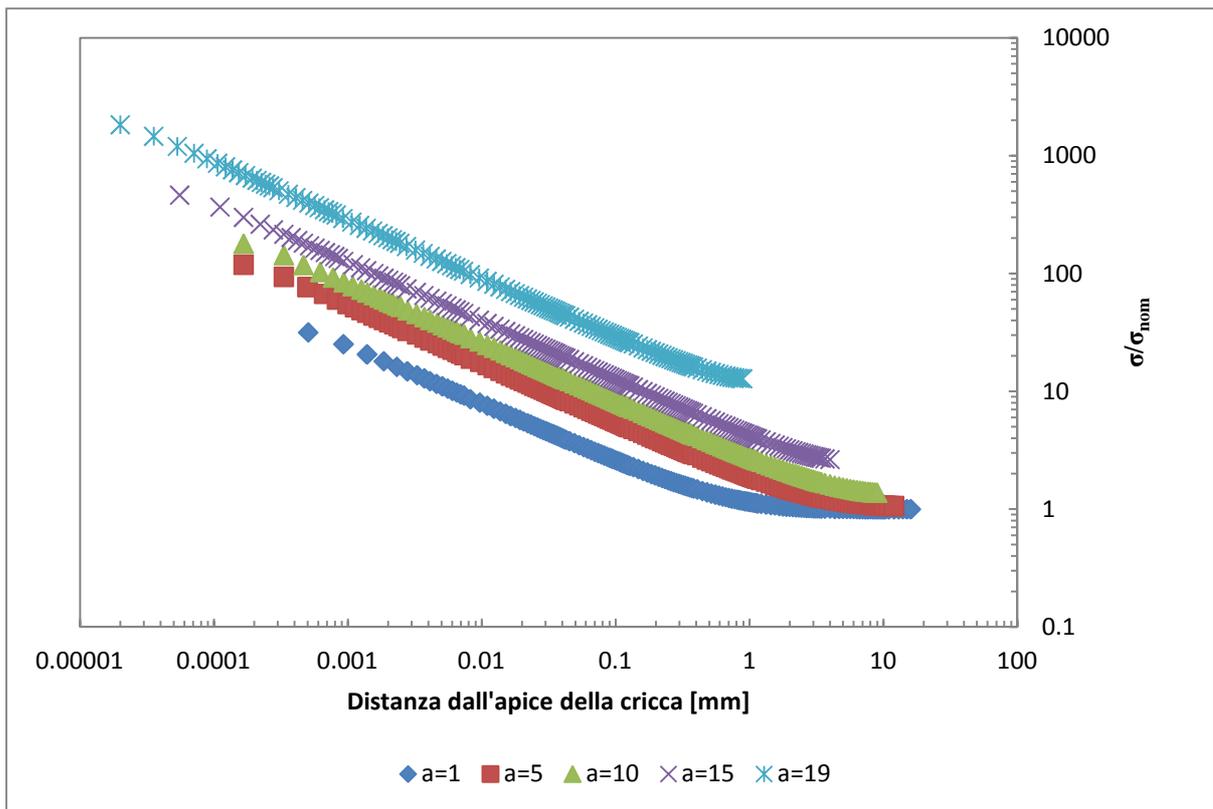


Figura 2.12: Riassunto di alcuni campi di tensione ottenuti al variare delle dimensioni della cricca. Il caso in esame si riferisce a piastra con due cricche sui lati sollecitate a modo I.

Dalla figura 2.12 si osserva che finché la cricca ha delle dimensioni contenute, tutti i campi di tensione nella zona più lontana dall'apice tendono allo stesso valore di tensione nominale lorda, cioè quella effettivamente applicata al provino; quando invece la cricca raggiunge delle dimensioni più elevate i campi di tensione non tendono più allo stesso valore nelle zone più lontane dall'apice, ma ad uno più elevato. Se si considerasse una piastra di dimensioni infinite tale comportamento non si presenterebbe, poiché dalla teoria è noto che in questo caso un aumento delle dimensioni della cricca comporterebbe una traslazione dei campi di tensione a valori più alti, mantenendosi sempre paralleli a se stessi e raggiungendo sempre la stessa tensione nominale lorda ad una distanza maggiore. Quanto appena descritto è rappresentato in figura 2.13, nella quale sono diagrammati alcuni campi di tensione all'aumentare delle dimensioni della cricca nel caso di piastra di dimensioni infinite o comunque di cricca di dimensioni trascurabili rispetto alla piastra.

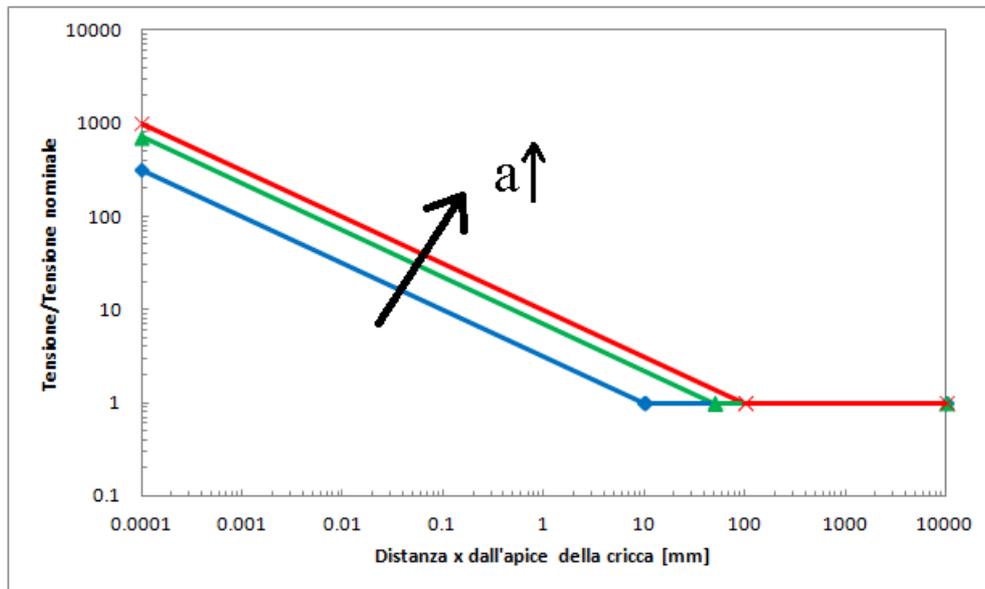


Figura 2.13: Andamento dei campi di tensione all'aumentare della dimensione della cricca nel caso di piastra di dimensioni infinite o di cricca di dimensione trascurabile rispetto a quella della piastra; si osservi che, in questo caso particolare, la tensione nominale lorda alla quale i campi giungono allontanandosi dall'apice della cricca rimane costante.

Nella realtà, però, le dimensioni della piastra non sono mai infinite; per questo motivo, quando la cricca aumenta molto la propria lunghezza e assume una dimensione che non è più trascurabile rispetto a quella del provino, si ha che il campo di tensione non ha più modo di tendere al valore della tensione nominale lorda applicata, ma converge ad un valore maggiore. Quest'ultimo è imposto dal fatto che dall'altro lato del provino esiste un'altra cricca che ha anch'essa assunto delle dimensioni molto elevate; gli apici delle due

cricche si ritrovano fisicamente vicini e nasce quindi un'interazione tra i due campi di tensione locali. Questa interazione comporta quell'aumento della tensione alla quale i campi tendono all'allontanarsi dall'apice nel caso di cricche di elevate dimensioni.

Una delle dirette conseguenze di questo comportamento è che l'estensione del campo locale di tensione, che è indicata con x^* , tende dapprima a crescere quando una cricca molto piccola inizia ad aumentare lievemente le proprie dimensioni, ma una volta raggiunte lunghezze rilevanti è destinata a ridursi nuovamente per l'interazione tra i campi locali di tensione sopra descritta.

Si riporta inoltre, in parallelo a quanto fatto per le tensioni, un diagramma riassuntivo riferito agli NSIFs.

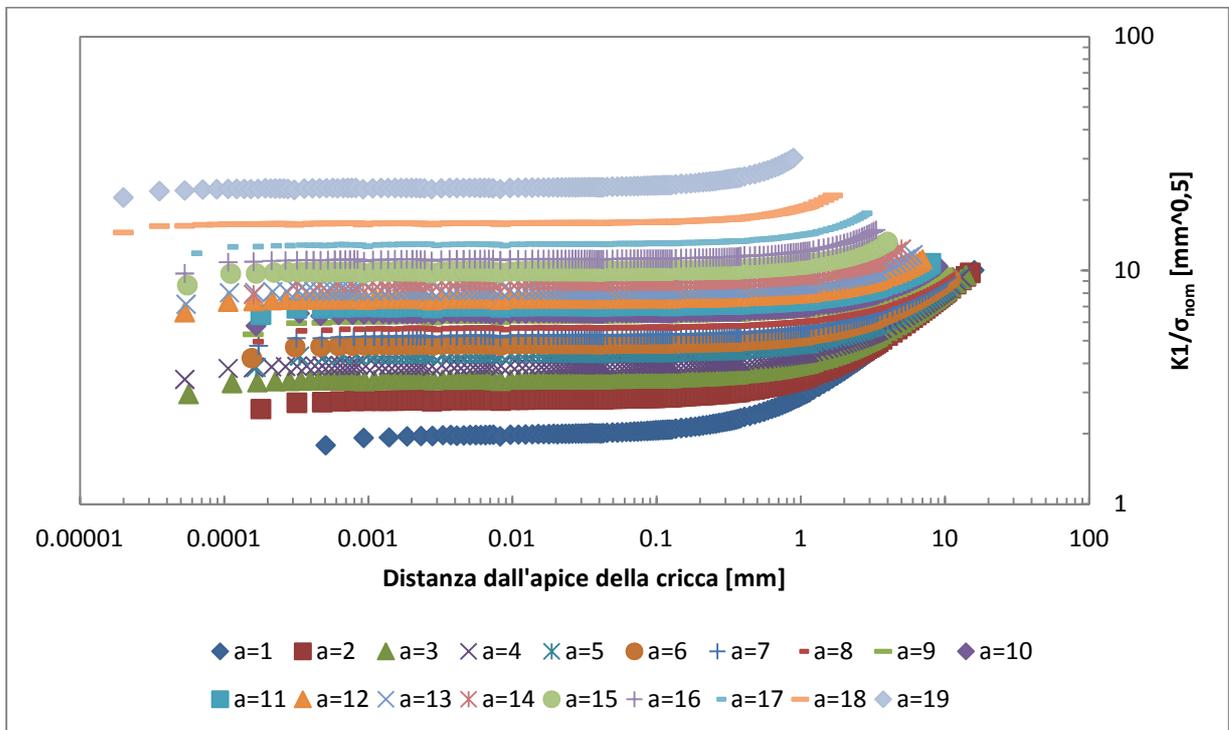


Figura 2.14: Riassunto dei campi di NSIFs (da (2.3)) ottenuti all'aumentare delle dimensioni della cricca. Il caso in esame si riferisce a piastra con due cricche sui lati sollecitate a modo I.

Per il calcolo del valore di NSIF che più rappresenta il plateau numerico di una singola dimensione di cricca si è deciso di effettuare una media di più valori raccolti lungo il plateau stesso.

Si è quindi passati a stimare l'estensione del campo locale di tensione, indicata col simbolo x^* , prendendo il valore della distanza x locale, misurata lungo la bisettrice dell'angolo di

apertura dell'intaglio, per il quale si ha uno scostamento percentuale del 5% dei valori numerici di NSIF rispetto a quello calcolato attraverso la media.

In questo modo, analizzando visivamente la figura 2.14, si può osservare il comportamento descritto in precedenza relativo all'estensione del campo locale di tensione: con una cricca piccola che accresce lievemente le proprie dimensioni si ha un aumento dell'estensione del campo locale di tensione mentre, una volta raggiunti valori non più trascurabili, un ulteriore aumento della sua lunghezza provoca una diminuzione di x^* poiché lo scostamento del 5% dal valore medio di NSIF calcolato avviene più a sinistra nel diagramma.

Si riporta una tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dal metodo NSIFs.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità cricca a [mm]	Parametro adimensionale $\frac{2a}{w}$	$\frac{K_1}{\sigma_{nom}}$ [$mm^{0.5}$]	$\left(\frac{K_1}{\sigma_{nom}}\right)_{an}$ [$mm^{0.5}$]	$\Delta = 100 \cdot \frac{ K_{1,num} - K_{1,an} }{K_{1,an}}$ [%]
0	1	0.05	2.008	1.993	0.72
0	2	0.1	2.817	2.826	0.32
0	3	0.15	3.428	3.460	0.94
0	4	0.2	3.948	3.989	1.03
0	5	0.25	4.429	4.452	0.51
0	6	0.3	4.851	4.873	0.46
0	7	0.35	5.285	5.273	0.23
0	8	0.4	5.694	5.667	0.47
0	9	0.45	6.128	6.073	0.90
0	10	0.5	6.573	6.506	1.02
0	11	0.55	7.066	6.984	1.17
0	12	0.6	7.614	7.522	1.22
0	13	0.65	8.245	8.140	1.29
0	14	0.7	8.997	8.854	1.61
0	15	0.75	9.950	9.684	2.75
0	16	0.8	11.205	10.649	5.22
0	17	0.85	12.980	11.770	10.28
0	18	0.9	15.965	13.067	22.18
0	19	0.95	22.615	14.563	55.29

Tabella 2.3: Risultati in termini di NSIFs (numerico, cioè calcolato come media del plateau numerico ottenuto dal FEM utilizzando la (2.3), e analitico, ricavato da eq. (2.2)) e scostamento percentuale tra la soluzione analitica e quella numerica. Col pedice "num" s'intendono i risultati numerici e con "an" quelli analitici.

Come si osserva dalla tabella 2.3 i risultati numerici medi in termini di NSIFs sono aderenti a quelli analitici fino a valori del parametro adimensionale $2a/w$ pari a circa 0.65

prendendo come soglia di accettabilità uno scostamento arbitrario del 1.5%; dopo questo valore di soglia le differenze tra risultati numerici e analitici aumentano notevolmente, fino a divergere per cricche di dimensioni molto elevate. Questo comportamento è dovuto al campo di validità dell'approccio analitico utilizzato; esso, infatti, è applicabile quando la cricca possiede lunghezze trascurabili, o comunque sensibilmente inferiori, rispetto alla dimensione del provino stesso. Questo scostamento tra i due approcci per cricche di dimensione elevata può essere osservato anche diagrammando il valore di α analitico, ricavato in (2.6), con quello numerico, come si nota in figura 2.15.

a [mm]	2a/w	$\alpha = \frac{K_1}{\sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi a}}$	$\alpha_{an} = \frac{K_{1,an}}{\sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi a}}$	$\Delta = 100 \cdot \frac{ \alpha - \alpha_{an} }{\alpha_{an}}$ [%]
1	0.05	1.1326	1.1245	0.72
2	0.1	1.1237	1.1274	0.32
3	0.15	1.1166	1.1272	0.94
4	0.2	1.1137	1.1253	1.03
5	0.25	1.1175	1.1233	0.51
6	0.3	1.1173	1.1225	0.46
7	0.35	1.1270	1.1244	0.23
8	0.4	1.1358	1.1305	0.47
9	0.45	1.1524	1.1421	0.90
10	0.5	1.1727	1.1608	1.02
11	0.55	1.2019	1.1880	1.17
12	0.6	1.2401	1.2251	1.22
13	0.65	1.2902	1.2737	1.29
14	0.7	1.3565	1.3350	1.61
15	0.75	1.4494	1.4107	2.75
16	0.8	1.5804	1.5020	5.22
17	0.85	1.7761	1.6105	10.28
18	0.9	2.1230	1.7377	22.18
19	0.95	2.9271	1.8849	55.29

Tabella 2.4: Risultati in termini di coefficiente α analitico (eq. (2.6)) e numerico (eq. (2.12)) e scostamento percentuale tra la soluzione analitica e quella numerica.

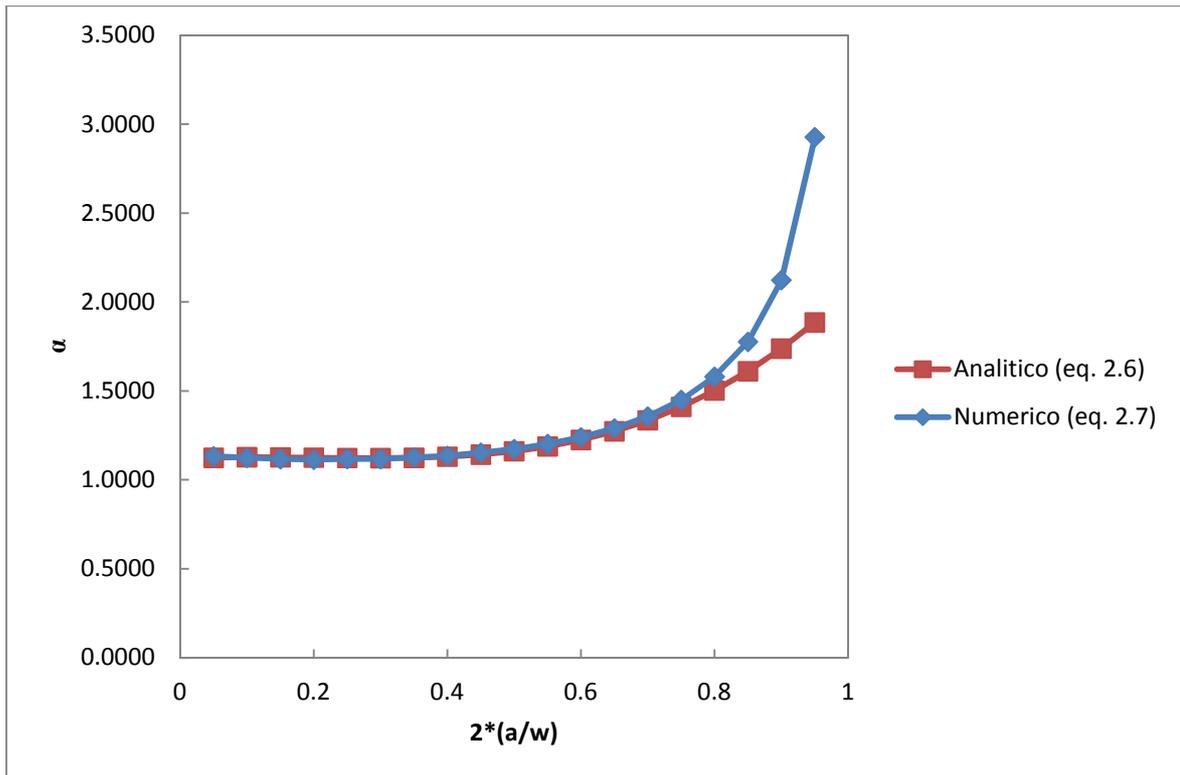


Figura 2.15: Confronto tra i valori di α numerici e analitici all'aumentare delle dimensioni della cricca.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in termini di estensione del campo locale di tensione; si noti che con x^* è stata indicata l'estensione del campo locale di tensione ricavata numericamente, calcolata come la distanza dall'apice della cricca dalla quale i valori dell'NSIF di modo III calcolato numericamente si discostano del 5% dal valore medio del plateau numerico, e con x_{an}^* è stata indicata l'estensione calcolata analiticamente.

Poiché il campo di tensione analitico valutato sulla bisettrice della cricca (dove con x s'intende la direzione della bisettrice e con y l'ortogonale alla stessa) è calcolato dalle formule di Irwin come:

$$\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{nom}}\right)_{an} = \left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right)_{an} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot x_{an}}} \quad (2.8)$$

Il valore dell'estensione analitica del campo locale di tensione perciò può essere ricavato eguagliando la tensione del campo locale con quella nominale, ottenendo:

$$1 = \left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}}\right)_{an} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot x_{an}^*}} \quad (2.9)$$

Quindi:

$$x^*_{an} = \left(\left(\frac{K_I}{\sigma_{nom}} \right)_{an} \right)^2 \cdot \frac{1}{2\pi} \quad (2.10)$$

Si ha quindi:

Angolo apertura 2α [°]	Profondità cricca a [mm]	x^* [mm]	x^*_{an} [mm]
0	1	0.1392	0.632
0	2	0.2525	1.271
0	3	0.3592	1.906
0	4	0.4450	2.533
0	5	0.5776	3.154
0	6	0.6358	3.780
0	7	0.7571	4.425
0	8	0.8030	5.112
0	9	0.8763	5.870
0	10	0.8988	6.738
0	11	0.9357	7.763
0	12	0.9367	9.006
0	13	0.9113	10.544
0	14	0.8546	12.476
0	15	0.7934	14.925
0	16	0.6912	18.048
0	17	0.5317	22.048
0	18	0.3933	27.176
0	19	0.1927	33.753

Tabella 2.5: Risultati in termini d'estensione del campo locale di tensione calcolati sia numericamente (come da definizione sopra descritta) che analiticamente (da eq.(2.10)).

In quest'ultimo caso gli scostamenti tra i valori numerici e analitici sono sensibili anche per cricche di dimensione trascurabile rispetto a quella del provino; questo è dovuto alla diversa definizione dell'estensione del campo locale di tensione nei due casi.

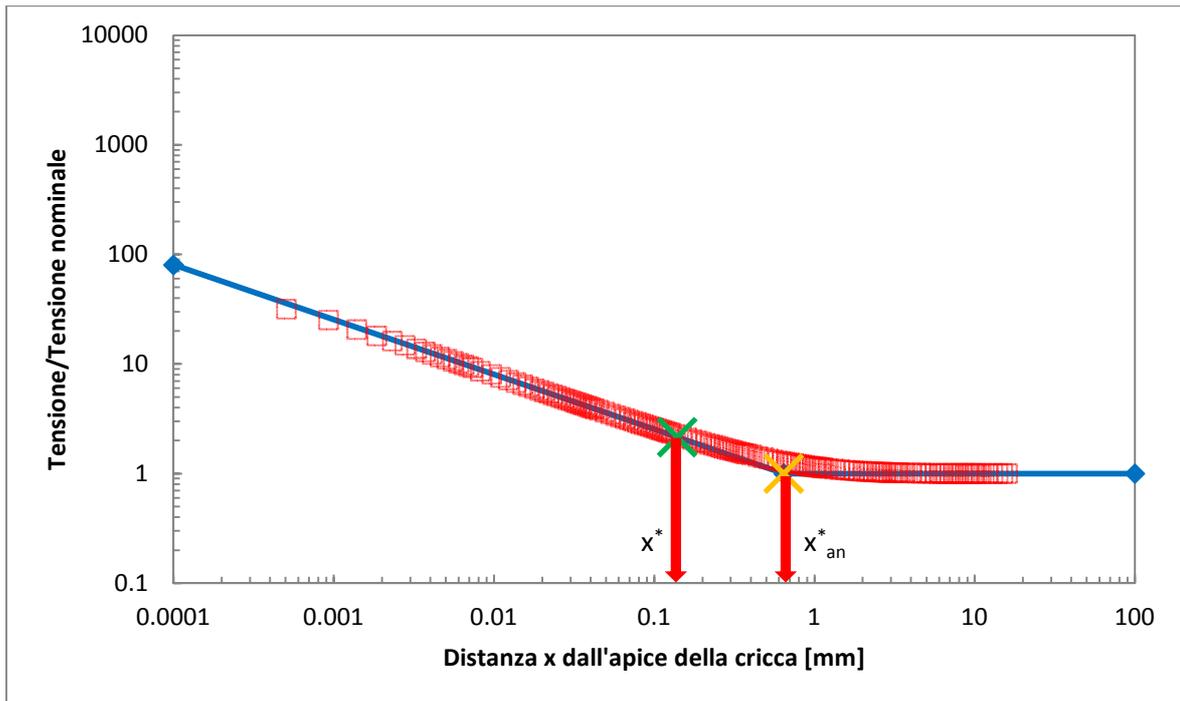


Figura 2.16: Confronto tra l'andamento della tensione teorica (blu) e quella numerica (rosso); sono inoltre evidenziati i punti che delimitano l'estensione del campo locale di tensione teorico (croce gialla) e numerico (croce verde). Questo caso particolare si riferisce a una cricca di dimensione unitaria (vedere tabella 2.4).

Infatti, come si nota dalla figura 2.16, nel caso analitico si sta stimando la posizione del punto di congiunzione tra il campo di tensione locale con inclinazione 0.5 e la tensione nominale lorda, indicato con una croce gialla nel diagramma. Nel caso numerico, invece, si sta stimando l'effettiva estensione del campo locale ottenuto numericamente, intesa come la lunghezza per la quale quest'ultimo mantiene una pendenza effettiva pari a 0.5; il punto che delimita quest'estensione numerica è indicato con una croce verde. Risulta quindi chiara la differenza di definizione tra i valori dell'estensione del campo locale di tensione numerico e quello analitico e anche la motivazione per la quale i valori analitici risultano sempre molto maggiori rispetto a quelli numerici.

2.1.5.2 - Risultati PSM

Per quanto riguarda il PSM, l'intera batteria d'analisi pensata nel caso di modo I è realizzata fissando la dimensione globale degli elementi e svolgendo diverse analisi variando la dimensione caratteristica della cricca; terminate tutte le dimensioni prescelte si passa alla global element size successiva. Per il caso in esame si è analizzata una dimensione di cricca da 1 a 19 mm e si sono prese in considerazione le seguenti dimensioni medie d'elemento per il PSM: [1 0.75 0.5 0.25 0.1].

L'intera batteria d'analisi espressa in termini del parametro adimensionale "a/d" è riportata nella seguente tabella:

d [mm]	1	0.75	0.5	0.25	0.1
a [mm]	a/d				
1	1	1.333333	2	4	10
2	2	2.666667	4	8	20
3	3	4	6	12	30
4	4	5.333333	8	16	40
5	5	6.666667	10	20	50
6	6	8	12	24	60
7	7	9.333333	14	28	70
8	8	10.666667	16	32	80
9	9	12	18	36	90
10	10	13.333333	20	40	100
11	11	14.666667	22	44	110
12	12	16	24	48	120
13	13	17.333333	26	52	130
14	14	18.666667	28	56	140
15	15	20	30	60	150
16	16	21.333333	32	64	160
17	17	22.666667	34	68	170
18	18	24	36	72	180
19	19	25.333333	38	76	190

Tabella 2.6: Valori del parametro adimensionale a/d per i vari casi analizzati.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal PSM riassumendo in ogni tabella una singola global element size.

In tutte le tabelle si noti che:

- a è la dimensione della cricca;
- d è la dimensione globale d'elemento;
- x^* è l'estensione del campo locale di tensione valuta numericamente come già descritto;
- σ_{peak} è la tensione di picco misurata all'apice della cricca e valutata lungo la direzione ortogonale alla stessa (di apertura nel modo I);
- K_{FE}^* è il valore adimensionale calcolato numericamente tramite la (1.5).

PSM d = 1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	σ_{peak} [MPa]	$\frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{nom}}$	K_{FE}^*
1	1	0.139	0.139	1.5531	1.553	1.293
2	2	0.253	0.253	2.0303	2.030	1.387
3	3	0.359	0.359	2.4549	2.455	1.396
4	4	0.445	0.445	2.8117	2.812	1.404
5	5	0.578	0.578	3.1328	3.133	1.414
6	6	0.636	0.636	3.439	3.439	1.411
7	7	0.757	0.757	3.7272	3.727	1.418
8	8	0.803	0.803	4.012	4.012	1.419
9	9	0.876	0.876	4.3134	4.313	1.421
10	10	0.899	0.899	4.632	4.632	1.419
11	11	0.936	0.936	4.9723	4.972	1.421
12	12	0.937	0.937	5.3765	5.377	1.416
13	13	0.911	0.911	5.8274	5.827	1.415
14	14	0.855	0.855	6.367	6.367	1.413
15	15	0.793	0.793	7.0241	7.024	1.416
16	16	0.691	0.691	7.9059	7.906	1.417
17	17	0.532	0.532	9.1607	9.161	1.417
18	18	0.393	0.393	11.188	11.188	1.427
19	19	0.193	0.193	15.587	15.587	1.451

Tabella 2.7: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 1 mm.

PSM d = 0.75 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	σ_{peak} [MPa]	$\frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{nom}}$	K_{FE}^*
1	1.3333333	0.139	0.186	1.8968	1.897	1.222
2	2.6666667	0.253	0.337	2.4252	2.425	1.341
3	4	0.359	0.479	2.8189	2.819	1.404
4	5.3333333	0.445	0.593	3.3882	3.388	1.345
5	6.6666667	0.578	0.770	3.7158	3.716	1.376
6	8	0.636	0.848	3.9634	3.963	1.413
7	9.3333333	0.757	1.009	4.4399	4.440	1.374
8	10.666667	0.803	1.071	4.7416	4.742	1.387
9	12	0.876	1.168	4.9814	4.981	1.420
10	13.333333	0.899	1.198	5.4949	5.495	1.381
11	14.666667	0.936	1.248	5.8617	5.862	1.392
12	16	0.937	1.249	6.1959	6.196	1.419
13	17.333333	0.911	1.215	6.8392	6.839	1.392
14	18.666667	0.855	1.139	7.4566	7.457	1.393
15	20	0.793	1.058	8.119	8.119	1.415
16	21.333333	0.691	0.922	9.2459	9.246	1.399
17	22.666667	0.532	0.709	10.72	10.720	1.398
18	24	0.393	0.524	12.886	12.886	1.431
19	25.333333	0.193	0.257	18.026	18.026	1.449

Tabella 2.8: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.75 mm.

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	σ_{peak} [MPa]	$\frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{nom}}$	K_{FE}^*
1	2	0.139	0.278	2.0349	2.035	1.395
2	4	0.253	0.505	2.8208	2.821	1.412
3	6	0.359	0.718	3.4302	3.430	1.413
4	8	0.445	0.890	3.9456	3.946	1.415
5	10	0.578	1.155	4.4097	4.410	1.420
6	12	0.636	1.272	4.8262	4.826	1.421
7	14	0.757	1.514	5.2659	5.266	1.419
8	16	0.803	1.606	5.6769	5.677	1.418
9	18	0.876	1.753	6.1025	6.103	1.420
10	20	0.899	1.798	6.5519	6.552	1.419
11	22	0.936	1.871	7.038	7.038	1.420
12	24	0.937	1.873	7.5796	7.580	1.421
13	26	0.911	1.823	8.2037	8.204	1.421
14	28	0.855	1.709	8.9497	8.950	1.422
15	30	0.793	1.587	9.8832	9.883	1.424
16	32	0.691	1.382	11.158	11.158	1.420
17	34	0.532	1.063	12.975	12.975	1.415
18	36	0.393	0.787	15.931	15.931	1.417
19	38	0.193	0.385	22.477	22.477	1.423

Tabella 2.9: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm.

PSM d = 0.25 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	σ_{peak} [MPa]	$\frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{nom}}$	K_{FE}^*
1	4	0.139	0.557	2.8436	2.844	1.412
2	8	0.253	1.010	3.995	3.995	1.410
3	12	0.359	1.437	4.8867	4.887	1.403
4	16	0.445	1.780	5.635	5.635	1.401
5	20	0.578	2.310	6.3004	6.300	1.406
6	24	0.636	2.543	6.92	6.920	1.402
7	28	0.757	3.028	7.5174	7.517	1.406
8	32	0.803	3.212	8.1118	8.112	1.404
9	36	0.876	3.505	8.7212	8.721	1.405
10	40	0.899	3.595	9.3639	9.364	1.404
11	44	0.936	3.743	10.062	10.062	1.404
12	48	0.937	3.747	10.84	10.840	1.405
13	52	0.911	3.645	11.737	11.737	1.405
14	56	0.855	3.418	12.808	12.808	1.405
15	60	0.793	3.174	14.144	14.144	1.407
16	64	0.691	2.765	15.9	15.900	1.409
17	68	0.532	2.127	18.434	18.434	1.408
18	72	0.393	1.573	22.78	22.780	1.402
19	76	0.193	0.771	32.108	32.108	1.409

Tabella 2.10: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.25 mm.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	σ_{peak} [MPa]	$\frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{nom}}$	K_{FE}^*
1	10	0.139	1.392	4.4363	4.436	1.431
2	20	0.253	2.525	6.2622	6.262	1.422
3	30	0.359	3.592	7.6475	7.648	1.417
4	40	0.445	4.450	8.8151	8.815	1.416
5	50	0.578	5.776	9.8565	9.857	1.421
6	60	0.636	6.358	10.827	10.827	1.417
7	70	0.757	7.571	11.762	11.762	1.421
8	80	0.803	8.030	12.694	12.694	1.418
9	90	0.876	8.763	13.648	13.648	1.420
10	100	0.899	8.988	14.655	14.655	1.418
11	110	0.936	9.357	15.748	15.748	1.419
12	120	0.937	9.367	16.969	16.969	1.419
13	130	0.911	9.113	18.376	18.376	1.419
14	140	0.855	8.546	20.057	20.057	1.418
15	150	0.793	7.934	22.155	22.155	1.420
16	160	0.691	6.912	24.93	24.930	1.421
17	170	0.532	5.317	28.921	28.921	1.419
18	180	0.393	3.933	35.363	35.363	1.428
19	190	0.193	1.927	50.238	50.238	1.424

Tabella 2.11: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm.

2.1.5.3 - Considerazioni conclusive

I risultati ottenuti nelle tabelle 2.7 - 2.11 sono quindi riassunti nel diagramma sottostante, dove è stato diagrammato il valore di K_{FE}^* in funzione del parametro adimensionale a/d .

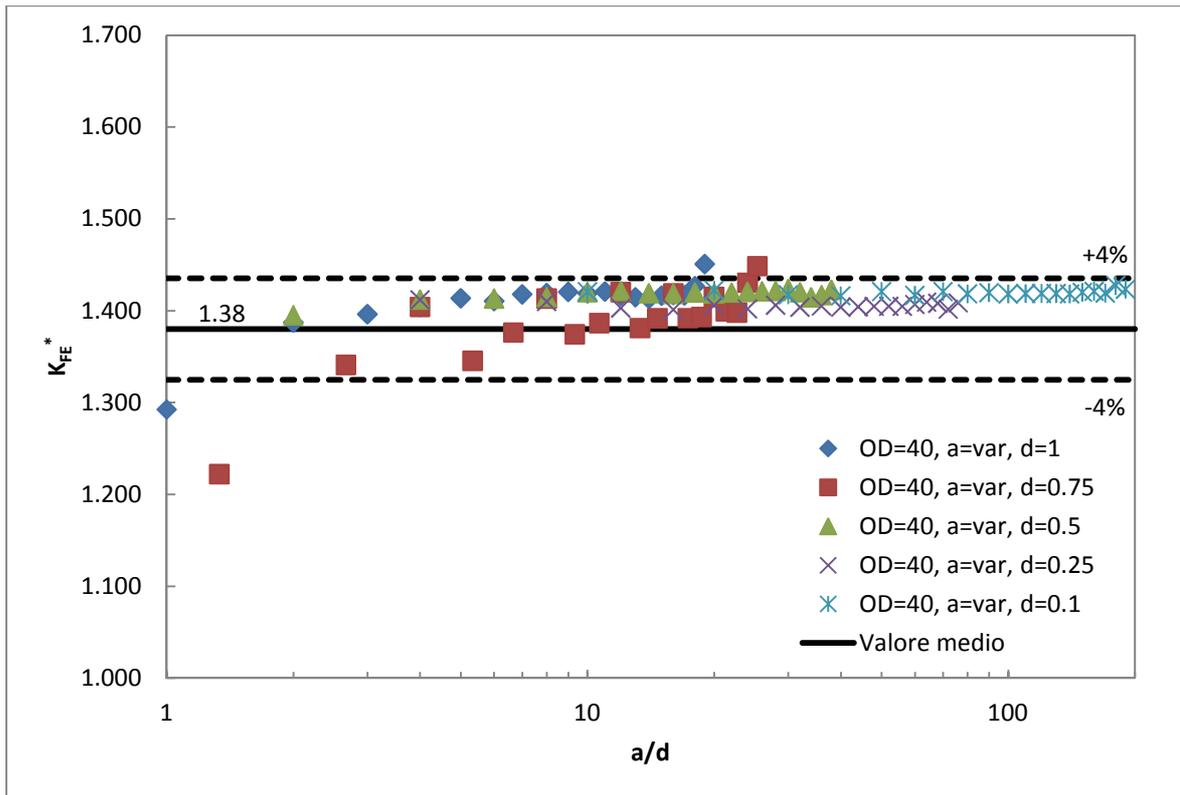


Figura 2.17: Andamento del K_{FE}^* in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [7] è pari a 1.38; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono rispettivamente il 96% e il 104% di quello medio.

Dapprima si può confermare che il valore di K_{FE}^* derivato dalla letteratura [7] e pari a 1.38 è coerente coi risultati ottenuti; si osserva infatti che la maggior parte dei punti a convergenza rientra nella banda di dispersione del $\pm 4\%$. In questo caso particolare risulterebbe altresì più adatto un valore medio per il K_{FE}^* di circa 1.405, che permetterebbe un restringimento delle già limitate bande di dispersione.

Si osserva però che alcuni punti, relativi soprattutto alle dimensioni globali d'elemento più grandi, fuoriescono dalla banda dei valori accettabili nonostante il requisito di convergenza in a/d del metodo sia pienamente soddisfatto; ricordando che ogni curva è stata ottenuta fissando la global element size e facendo variare la dimensione della cricca si osserva che i punti che fuoriescono dalla banda d'accettabilità sono quelli relativi alle dimensioni di cricca più elevate a parità di dimensione globale d'elemento. Come premesso questo comportamento è accentuato per le dimensioni d'elemento più grandi, ma è presente anche in quelle più piccole nonostante quest'ultime non fuoriescano dalla banda d'accettabilità. Di

seguito si riportano i layout delle mesh ottenute nei due casi che fuoriescono dalla banda suddetta che, si premette, risultano comunque accettabili rispetto a quanto suggerito in 1.4.

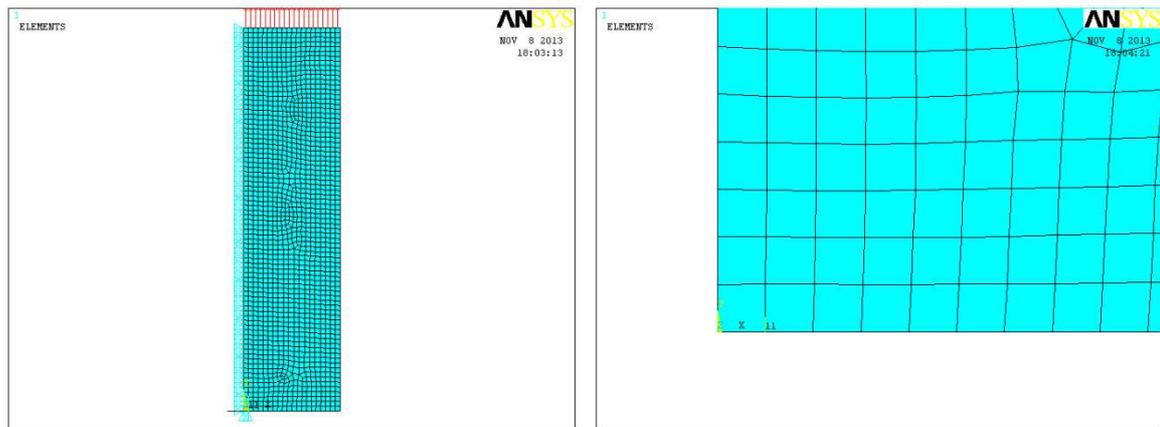


Figura 2.18: Mesh ottenuta con l'approccio PSM per una dimensione d'elemento $d=1$ mm e una dimensione di cricca $a=19$ mm. Nell'immagine ingrandita si nota anche il sistema di riferimento 11 che è localizzato all'apice della cricca utilizzato per l'output dei risultati. Il caso rappresentato è uno dei due che fuoriescono dalla banda d'accettabilità nonostante si trovi a convergenza.

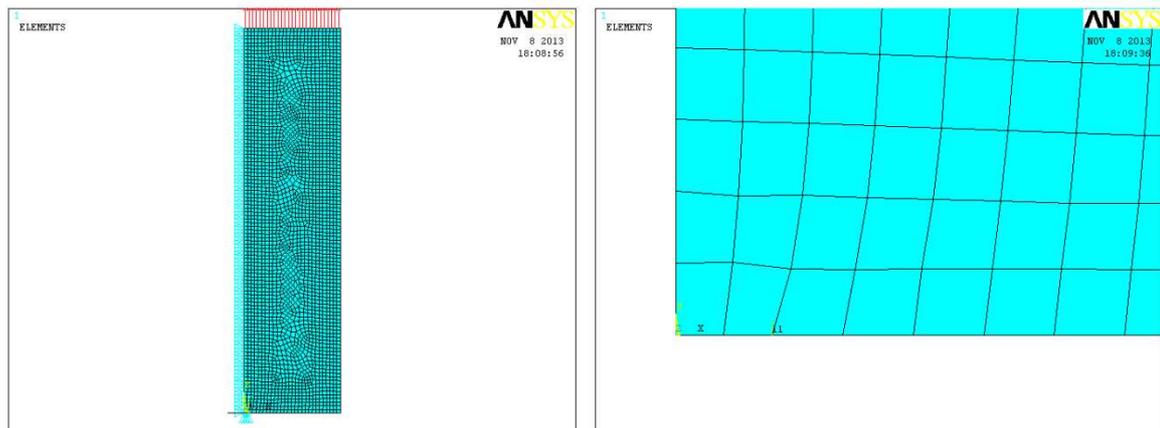


Figura 2.19: Mesh ottenuta con l'approccio PSM per una dimensione d'elemento $d=0.75$ mm e una dimensione di cricca $a=19$ mm. Nell'immagine ingrandita si nota anche il sistema di riferimento 11 che è localizzato all'apice della cricca utilizzato per l'output dei risultati. Il caso rappresentato è uno dei due che fuoriescono dalla banda d'accettabilità nonostante si trovi a convergenza.

Da questi risultati sembrerebbe quindi che per cricche di dimensioni rilevanti il metodo non possa più ritenersi valido, poiché una serie di valori fuoriesce dalla banda accettabile nonostante si trovino a convergenza, e cioè a valori di a/d superiori alla soglia limite minima.

Analizzando però tutte le informazioni raccolte finora si può dedurre che:

- Quando la dimensione di cricca è esigua anche l'estensione del campo locale di tensione è molto piccola (vedere i valori di x^*_{num} nella tabella 2.5); dalla figura 2.17 e dalle tabelle dei risultati si osserva che i punti relativi a piccole cricche rientrano nella banda solamente per piccole dimensioni globali d'elemento. Nel diagramma di figura 2.17 i punti che possiedono una a molto piccola e una global element size grande non entrano nella banda d'accettabilità perché non soddisfano il requisito di convergenza del PSM in termini di a/d ; estendendo il ragionamento con le considerazioni appena fatte sull'estensione del campo locale di tensione si può affermare che il vincolo di convergenza in a/d può essere tradotto in un medesimo requisito espresso in x^*/d , evidenziando la necessità di garantire che un numero minimo di elementi siano posizionati all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione;
- Per lunghezze di cricca intermedie l'estensione del campo locale di tensione aumenta rispetto alle precedenti (vedere ancora una volta i valori di x^*_{num} nella tabella 2.5 o rivedere quando descritto in precedenza riguardo all'estensione del campo locale di tensione in funzione della dimensione di cricca); dalla figura 2.17 si osserva che i punti relativi alle cricche di dimensione intermedia risultano tutti interni alla banda d'accettabilità poiché il requisito di convergenza in termini di a/d è soddisfatto e, dato che x^* per cricche intermedie tende a crescere rispetto al caso precedente in parallelo con a , anche il secondo criterio di convergenza in x^*/d risulta soddisfatto. Collegandosi a quanto appena detto per cricche di piccole dimensioni si può affermare che in questo caso si ha effettivamente un certo numero d'elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione;
- Infine quando le cricche assumono dimensioni rilevanti si osserva (vedere x^*_{num} in tabella 2.5) che l'estensione del campo locale di tensione decresce nuovamente rispetto a quelle intermedie, coerentemente con quanto osservato anche dalla figura 2.14 e discusso in precedenza; in questo caso, nonostante i valori considerati si trovino a convergenza in termini di a/d perché a assume valori molto elevati, i valori della costante K_{FE}^* fuoriescono dalla banda d'accettabilità come si osserva in figura 2.17. Questo fenomeno è legato al fatto che non si riesce più ad assicurare un numero minimo d'elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di

tensione poiché quest'ultima decresce e quindi il secondo criterio di convergenza viene meno.

Quanto sopra osservato spiega la fuoriuscita dei punti nella figura 2.17 nonostante si trovino a convergenza in termini di a/d ; tutto ciò può quindi tradursi in una regola metodologica che riporta il metodo a funzionare correttamente sia per cricche di dimensione esigua sia rilevante nel caso in cui si utilizzi il criterio di convergenza in x^*/d . È perciò necessario che all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione, calcolato all'apice di una cricca o di un intaglio acuto, sia presente un numero minimo d'elementi per poter trarre un'informazione corretta dal PSM.

Tutto ciò si traduce nell'esigenza di calcolare il numero minimo d'elementi posizionati all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione che permettono di ottenere dei valori di K_{FE}^* contenuti all'interno della banda d'accettabilità. Per valutarlo s'intende quindi modificare la figura 2.17 posizionando in ascissa non più il valore di a/d ma quello di x^*/d .

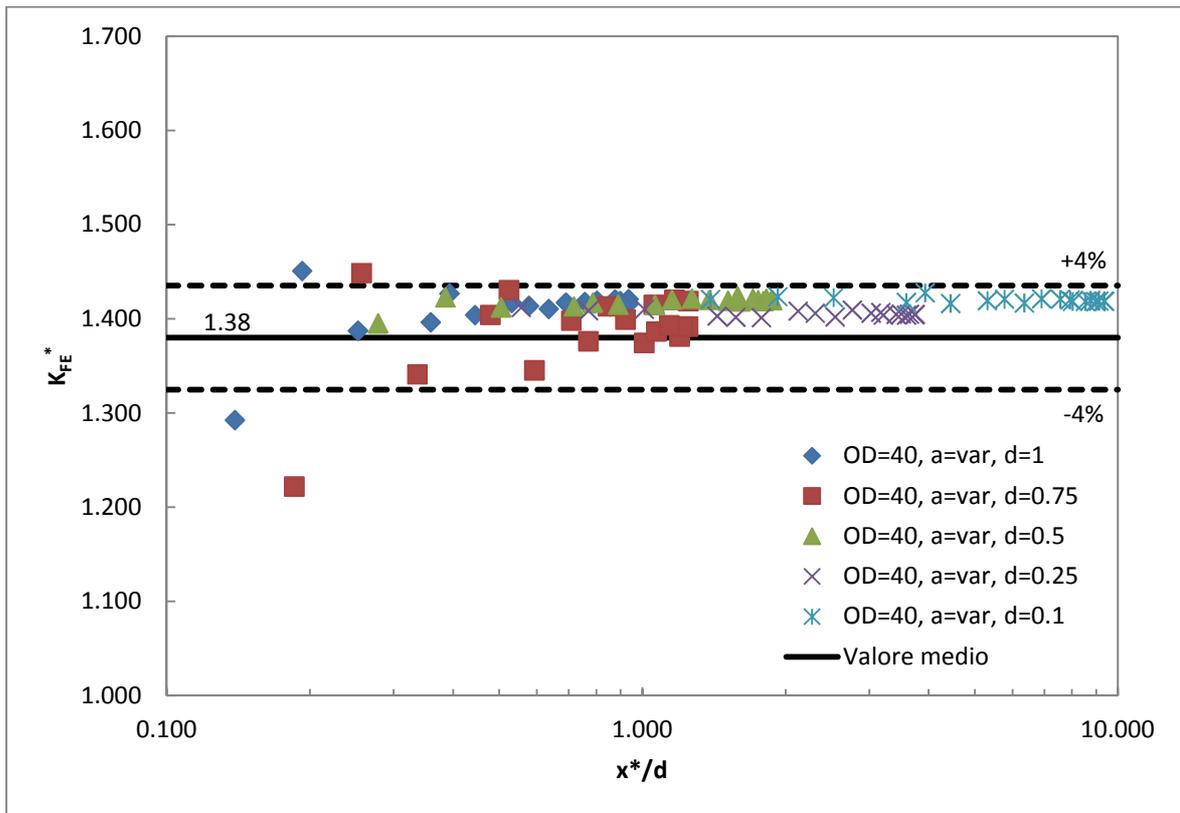


Figura 2.20: Andamento del K_{FE}^* in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [7] è pari a 1.38; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono rispettivamente il 96% e il 104% di quello medio.

Dalla figura 2.20 si osserva che i punti che presentano un numero troppo basso di elementi contenuti all'interno del campo locale di tensione sono collocati nella parte sinistra del diagramma e risultano fuori dalla banda d'accettabilità a prescindere che siano relativi a cricche di piccola o grande dimensione; nella parte più a destra ora non sono presenti punti che fuoriescono dalla banda poiché quelli che presentavano questa problematica utilizzando in ascissa a/d ora sono stati spostati a sinistra per le considerazioni appena fatte. In questo modo il metodo risulta nuovamente efficace potendo ancora assumere il valore medio di K_{FE}^* pari a 1.38 e costante [7]; inoltre si osserva che, in questo caso particolare nel quale si sono analizzate solo cricche, il punto di convergenza si trova a valori di x^*/d inferiori ad 1, indicando che per una corretta analisi PSM di modo I è sufficiente avere solamente un elemento posto all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione. Si ritiene comunque quest'ultima informazione non definitiva a causa dell'esiguo numero di casi studiati in questo modo; ulteriori analisi sono necessarie per trarre maggiori informazioni.

2.2 - PSM nel caso di ruota dentata cilindrica a denti dritti

2.2.1 - Modello fisico e numerico utilizzati

Nel presente paragrafo s'intende estendere l'utilizzo del PSM nel caso di modo I ad una ruota dentata cilindrica a denti dritti già dimensionata in precedenza; il modello geometrico della stessa è stato fornito dal docente ed è stato analizzato in [8].

Quando ci si appresta a compiere una verifica di una ruota dentata bisogna tenere in considerazione svariate modalità di cedimento. Una di queste è quella dovuta a rottura a fatica per flessione del dente ma ne esistono svariate altre tipologie tra cui si ricordano l'usura, il pitting, ecc; tutte queste sono dovute ad una moltitudine di cause, sulle quali non si ritiene opportuno approfondire in questa sede.

Nel caso in esame si vuole prendere in considerazione il cedimento a fatica della ruota dentata, causato dal carico di flessione applicato al dente; in questa eventualità la rottura si verifica tipicamente al piede del dente, dove è presente un marcato effetto d'intaglio dovuto al collegamento tra il dente stesso e la corona della ruota. Il carico di fatica è causato da due diverse motivazioni: la prima è legata al fatto che un singolo dente non è sempre in presa durante un'intera rotazione della ruota e quindi è soggetto a dei cicli di carico/scarico, mentre la seconda è legata al fatto che il punto di contatto tra due denti di due ruote dentate

ingranate cambia posizione sul profilo del dente al variare dell'istante considerato. Questo cambiamento comporta la variazione del braccio con il quale viene trasmessa la forza tra le ruote e genera quindi un momento flettente variabile.



Figura 2.21: Immagine di una ruota dentata sezionata che evidenzia la propagazione di una cricca per fatica al piede del dente.

Si potrebbe perciò pensare di utilizzare il PSM per la stima della vita a fatica della ruota dentata; è però necessario dimostrare che anche in questo caso è possibile applicare il metodo considerando un K_{FE}^* costante e pari a 1.38 [7].

Di seguito si riportano le dimensioni geometriche della ruota:

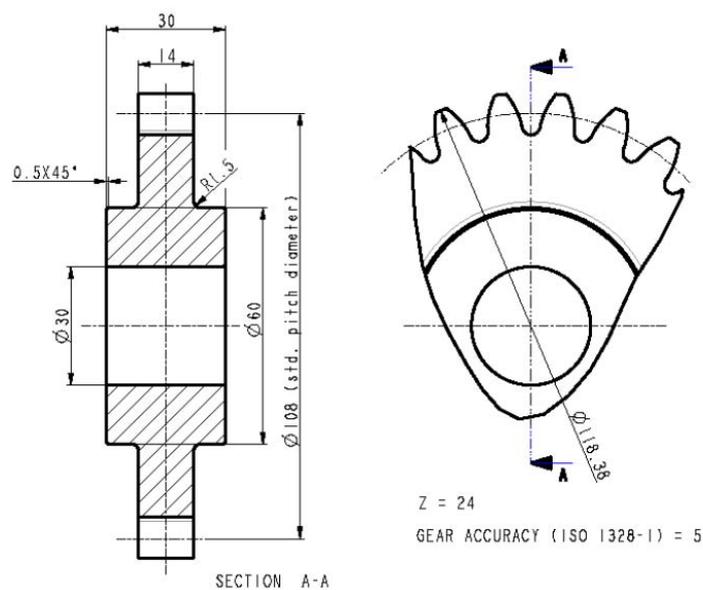


Figura 2.22: Dimensioni geometriche della ruota dentata (da [8]).

Si è deciso di utilizzare un modello numerico piano per lo scopo prefissato; una volta importato il profilo della ruota dentata (figura 2.23) è stato però necessario effettuare una modifica della geometria al piede del dente studiato per ottenere l'intaglio a spigolo vivo necessario per l'applicazione del metodo, dato che nella realtà la ruota presenta un raggio di raccordo (figura 2.24). L'angolo d'apertura dell'intaglio riflette quello che tipicamente è l'angolo tra il profilo alla base del dente e la corona della ruota, ed è pari a 120° ; il carico di flessione al piede del dente corrisponde quindi a una sollecitazione di modo I sull'intaglio.

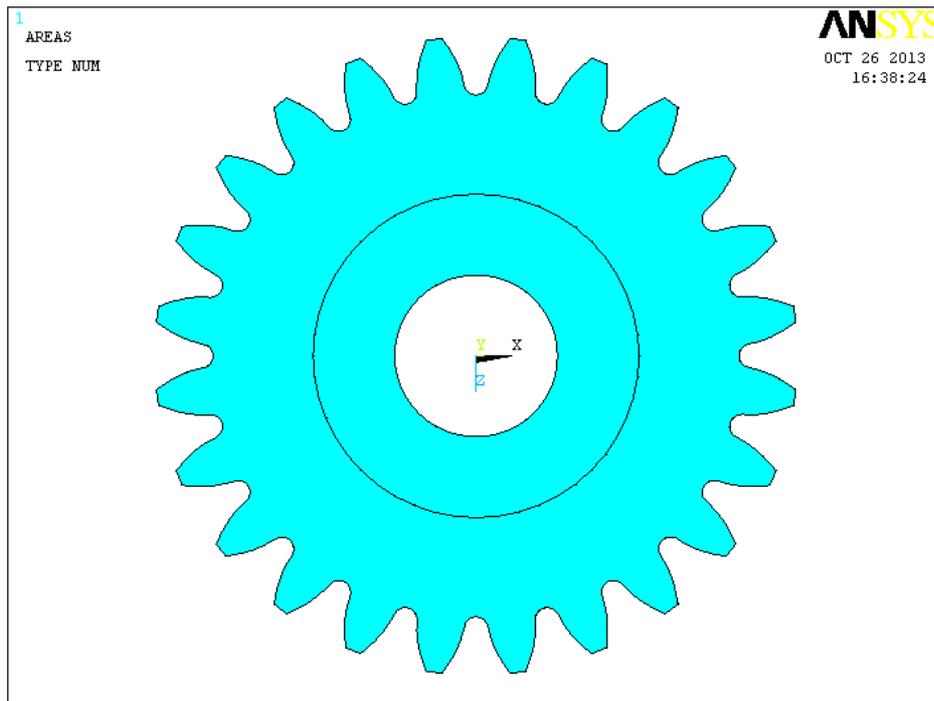


Figura 2.23: Immagine del profilo originale importato della ruota dentata.

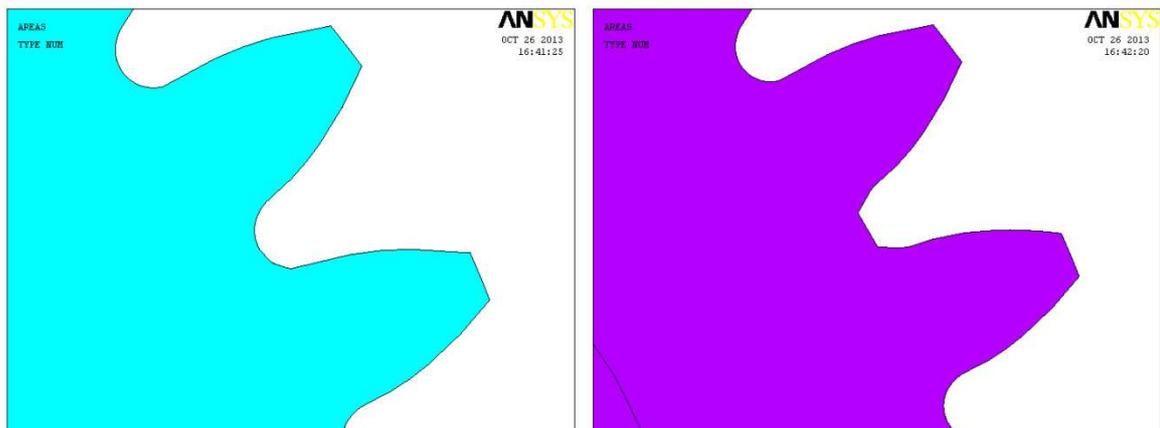


Figura 2.24: Confronto tra il profilo originale raccordato (a sinistra) e quello modificato per ottenere l'intaglio a spigolo vivo con apertura di 120° (a destra).

2.2.2 - Tipologia d'elemento scelta e layout delle mesh utilizzate

La tipologia d'elemento scelta per eseguire l'analisi è lo SHELL63, elemento 2D a quattro nodi che permette di tener conto degli effetti flessionali e membranali; consente inoltre l'utilizzo di forze sia sul piano d'analisi che ortogonali allo stesso. I nodi dell'elemento hanno 6 gradi di libertà ciascuno che corrispondono alle 3 traslazioni e alle 3 rotazioni attorno agli assi. Tutte le analisi sono state eseguite mediante Ansys® 14. Si noti che l'analisi 2D poteva essere svolta anche utilizzando gli elementi PLANE182 ma, poiché quest'ultimi lavorano solo se la geometria è contenuta nel piano x-y e il modello geometrico fornito è posizionato sul piano x-z, si è preferito l'utilizzo degli elementi SHELL che possono lavorare anche per geometrie contenute in quest'ultimo. Le Key Options settate per l'elemento sono le seguenti:

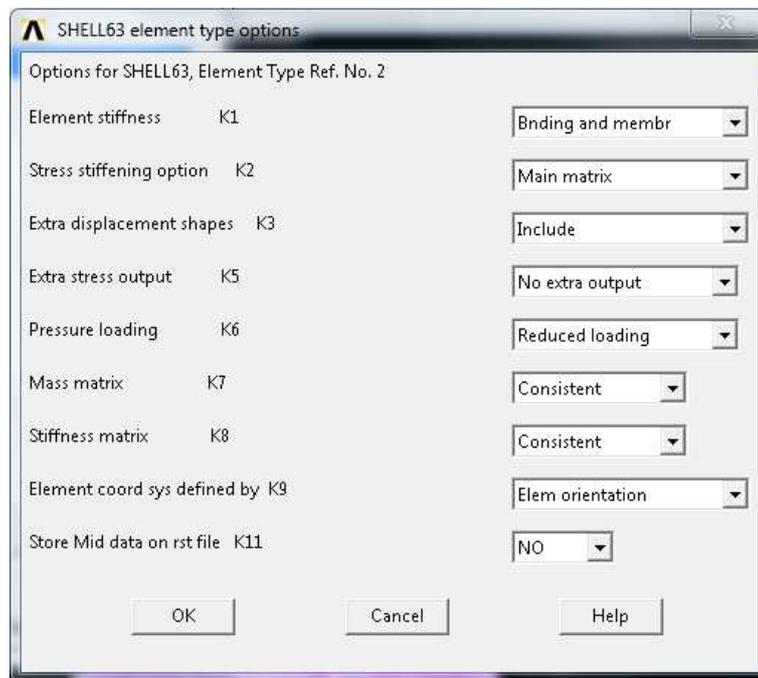


Figura 2.25: Key Options adottate per le analisi tramite elementi SHELL63.

Come si osserva dall'immagine che descrive le dimensioni geometriche la ruota è composta da due spessori diversi; per modellare in Ansys® tale geometria sono state imposte due diverse Real Constant alle aree riportate nella figura successiva:

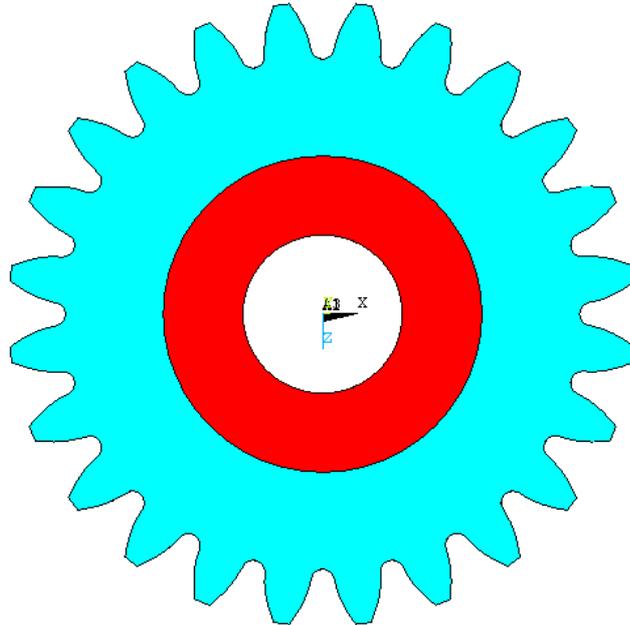


Figura 2.26: Aree del modello 2D in Ansys®.

Le Real Constant assegnate sono perciò:

- Spessore pari a 30 mm per l'area rossa di figura 2.26;
- Spessore pari a 14 mm per l'area azzurra di figura 2.26.

Il materiale col quale si è modellata la ruota ha le seguenti proprietà:

- Strutturale, elastico, lineare e isotropo;
- Modulo di elasticità pari a $1.63 \cdot 10^5 \text{ Mpa}$;
- Coefficiente di Piosson pari a 0.3.

Anche in questo caso valgono tutte le considerazioni esposte nel paragrafo precedente nel riguardo delle attenzioni da porre durante la fase di creazione della mesh; in questo caso, con angolo d'apertura maggiore di 0° , è però necessario avere delle nuove accortezze per svolgere correttamente l'analisi.

Per il calcolo del valore di K_I^V numerico si esegue il procedimento già descritto in precedenza imponendo la global element size, eseguendo una mesh free e successivamente raffinandola nelle prossimità del punto di singolarità geometrica; ricordando però che l'analisi NSIF deve essere svolta lungo la bisettrice dell'angolo d'apertura, in questo caso è necessario dapprima creare una linea, che corrisponde alla bisettrice stessa, per poterci adagiare una serie di nodi in fase di creazione della mesh. Si è quindi scelto di creare due areole distinte con il lato in comune che corrisponde alla bisettrice dell'angolo d'apertura e con il punto di singolarità come vertice in comune (figura 2.27); il layout delle areole è stato scelto secondo particolari criteri che verranno discussi nel successivo capitolo relativo al modo III e che sono legati alla volontà di ottenere determinate configurazioni della mesh nei dintorni del punto di singolarità quando si utilizza il metodo del PSM con un angolo d'apertura non nullo. Nel caso di applicazione del PSM con angolo d'apertura di 120° è infatti necessario avere due elementi soltanto che condividono il punto di singolarità geometrica e una mesh il più possibile uniforme nel suo intorno, accettando elementi distorti o di collegamento solo ad una certa distanza da esso; un esempio della mesh desiderata in questo caso è riportato nella figura 1.4 nel caso d'angolo d'apertura di 135° . Infatti, ricordando che in quell'immagine è riportata solo un quarto di piastra, anche in quel caso si hanno due elementi in totale che condividono il punto di singolarità e una mesh molto uniforme nel suo intorno. La volontà è stata quindi quella di creare la suddivisione in areole descritta in figura 2.27 in modo tale da sfruttare la bisettrice dell'angolo nel caso del calcolo NSIF e la mesh uniforme nel caso PSM; si è inoltre eseguita un'analisi PSM senza creazione delle areole per effettuare un confronto tra i risultati ottenuti attraverso i due procedimenti.

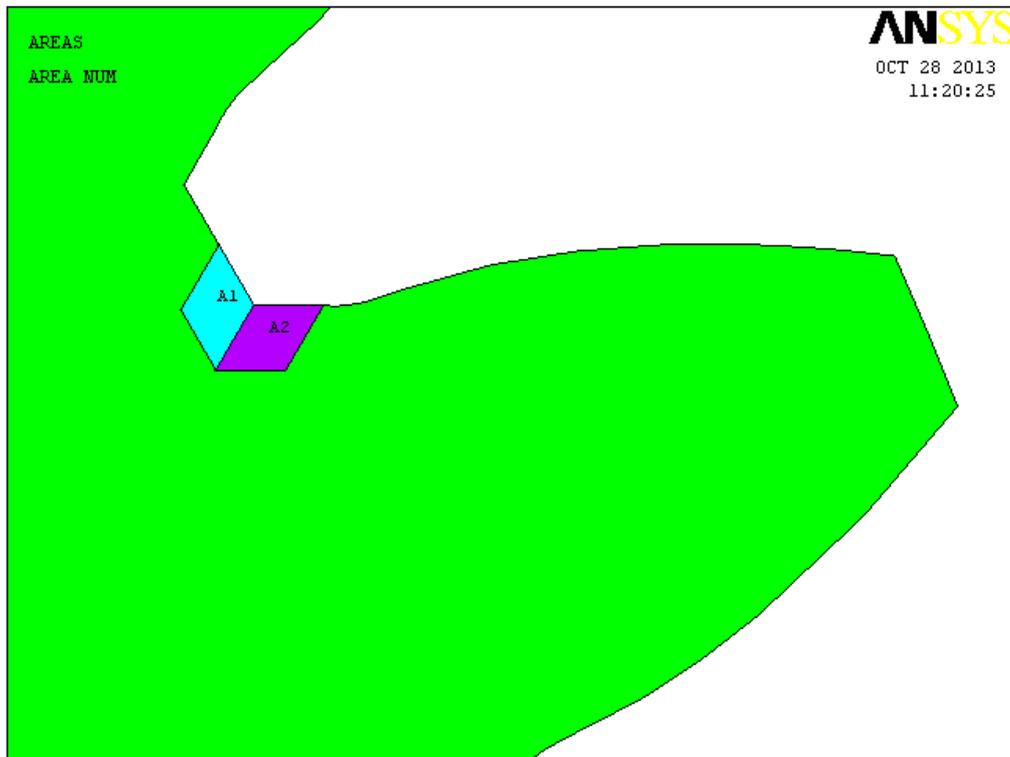


Figura 2.27: Layout delle areole create per ottenere una serie di nodi lungo la bisettrice dell'angolo nelle analisi NSIF e per uniformare la mesh nell'intorno del punto di singolarità nel caso del PSM.

Si riporta quindi un'immagine della mesh ottenuta per il calcolo degli NSIF:

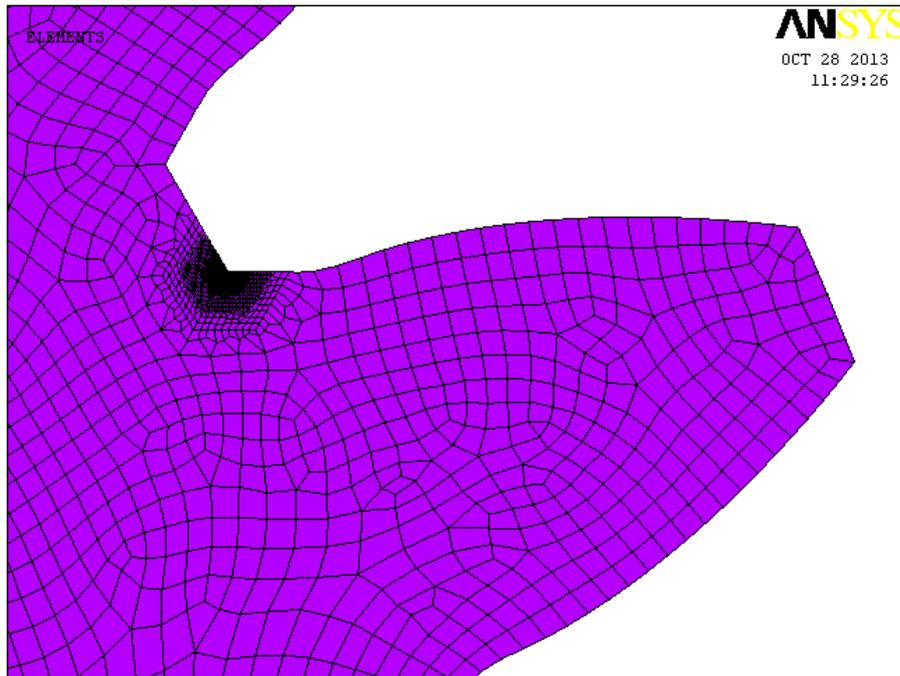


Figura 2.28: Layout della mesh nel calcolo NSIF; la dimensione minima d'elemento, localizzata al punto di singolarità, è pari a circa $5 \cdot 10^{-3}$ mm.

Esempio di layout della mesh nel caso di applicazione del PSM senza divisione in areole:

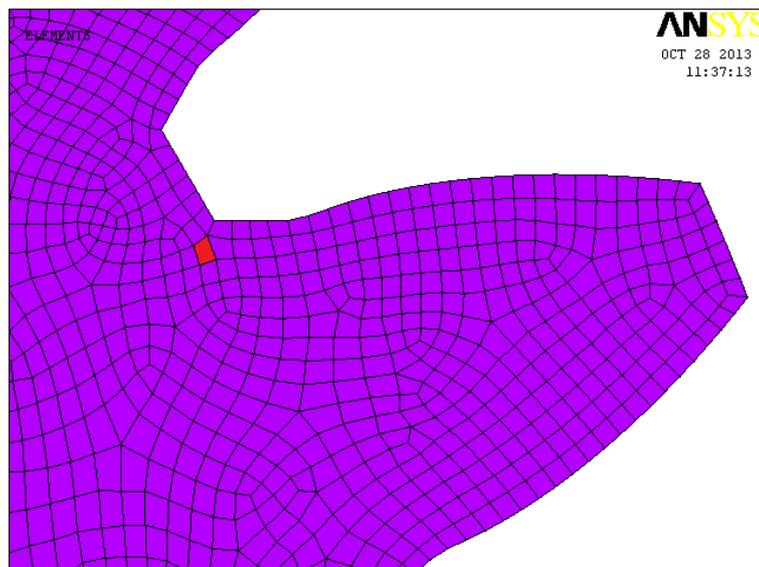


Figura 2.29: Layout della mesh utilizzata nel calcolo PSM senza utilizzare la suddivisione in areole; in rosso è indicato l'elemento di collegamento non desiderato.

Esempio di layout della mesh nel caso di applicazione del PSM sfruttando la suddivisione in areole:

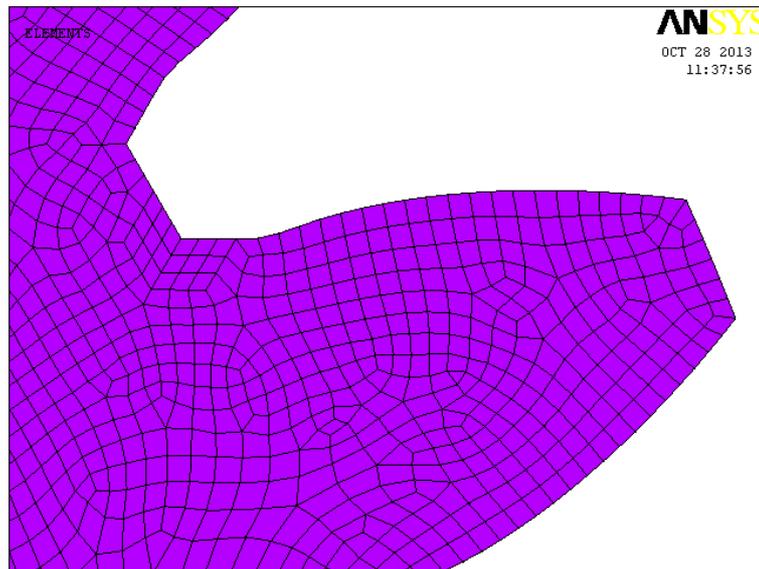


Figura 2.30: Layout della mesh utilizzata nel calcolo PSM con la suddivisione in areole.

Confrontando le mesh ottenute nel PSM (figure 2.29 e 2.30) con quella desiderata (figura 1.4 caso $2\alpha=135^\circ$) si nota che la mesh senza suddivisione in areole (figura 2.29) garantisce effettivamente due elementi appoggiati sul punto di singolarità come desiderato, ma presenta un elemento di collegamento adiacente a questi (evidenziato in rosso in figura 2.29); quest'ultima caratteristica compromette l'uniformità della mesh nelle vicinanze del punto di singolarità, che invece è recuperata nel caso con suddivisione in areole (figura 2.30). Quanto appena osservato in termini di layout della mesh e il metodo di meshatura con areole per il controllo della stessa è stato sviluppato nel caso di torsione ma, come si vedrà, fornisce ottimi risultati anche in questo caso di modo I; per ulteriori informazioni si faccia riferimento alle linee guida riportate in un capitolo successivo del presente elaborato.

2.2.3 - Condizioni al contorno

L'ultima parte relativa alla configurazione delle analisi FEM consiste nell'applicazione delle condizioni al contorno; si riportano di seguito le forze e i vincoli applicati per effettuare le analisi.

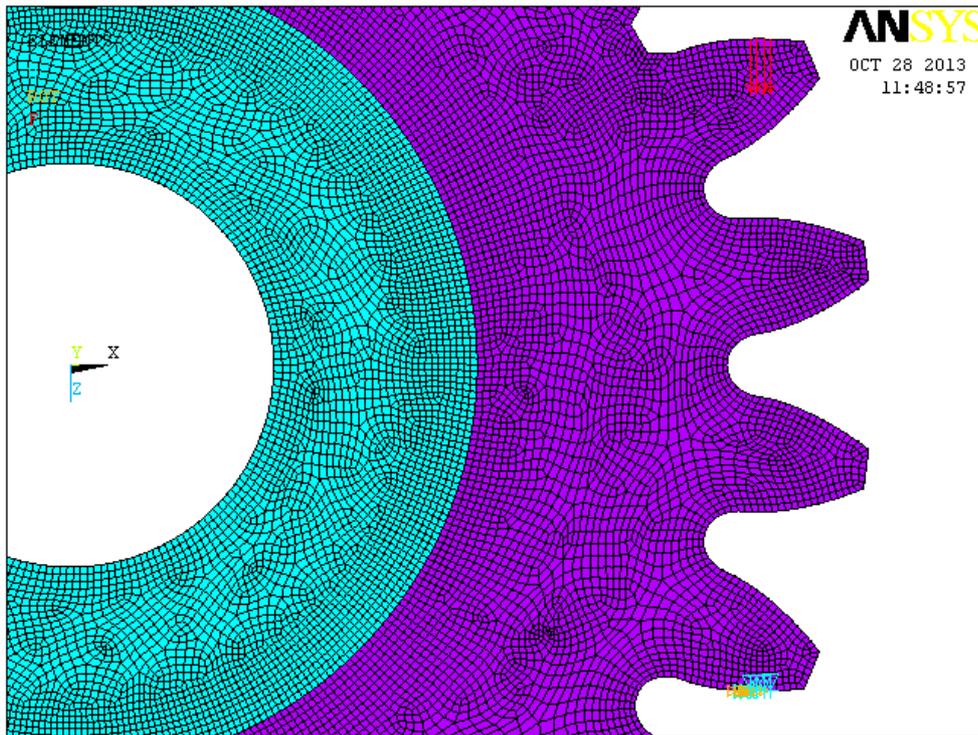


Figura 2.31: Condizioni al contorno applicate durante le analisi; la mesh in esame si riferisce a un caso di PSM.

Come si osserva dalla precedente figura sono state applicate 4 forze sul dente adiacente al punto di singolarità per modellare lo sforzo di flessione al piede dello stesso.

Si notano inoltre, nella parte inferiore della figura, i vincoli imposti: sono stati bloccati i gradi di libertà legati alle traslazioni nelle tre direzioni e alla rotazione attorno all'asse x relativi ai nodi posizionati su una certa lunghezza del profilo del dente.

2.2.4 - Risultati ottenuti

Si è dapprima ricavato il valore di λ_1 nel caso d'angolo d'apertura pari a 120° . L'equazione alla quale si deve fare riferimento, ottenuta grazie a Williams [3], per il calcolo dell'esponente di singolarità nel caso di sollecitazione di modo I è:

$$\sin[\lambda_1 \cdot (2\pi - 2\alpha)] - \lambda_1 \cdot \sin(2\alpha) = 0 \quad (2.11)$$

Quest'equazione può essere risolta per via grafica; nel caso in esame, per il quale si ha $2\alpha=120^\circ$, è stato sfruttato il toolbox per il calcolo simbolico di Matlab® per diagrammare la funzione ottenendo:

$$\lambda_1 \cong 0.616 \quad (2.12)$$

Ricavato quindi il valore del coefficiente di singolarità si può diagrammare il campo locale di tensione ottenuto per via numerica confrontandolo con quello ricavato imponendo la pendenza calcolata:

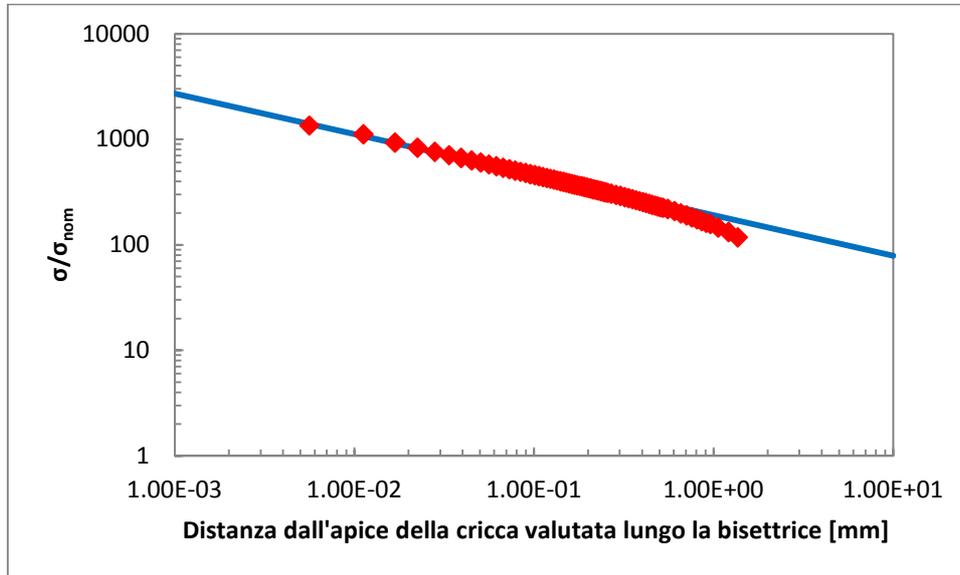


Figura 2.32: Campo di tensione numerico (rosso) e campo di tensione con pendenza ricavata dal valore di λ_1 (blu).

Si osserva che la pendenza dei valori numerici ha una buona correlazione con quella analitica (2.12). Si noti inoltre che, nel caso delle analisi NSIF, è stato necessario limitare i refine fino ad ottenere una dimensione minima d'elemento pari a circa $5e^{-3}$. Il software permetteva l'esecuzione di successivi raffinamenti della mesh ma il solutore perdeva notevolmente in stabilità, presentando grosse difficoltà nel convergere a una soluzione.

Allo stesso modo si riporta quanto ottenuto in termini di distribuzione di K_I^V numerico:

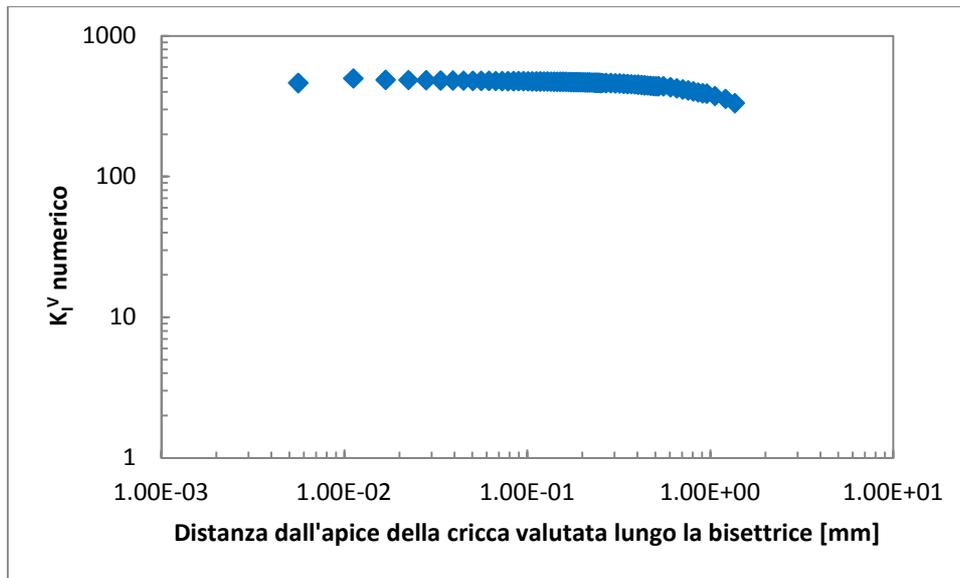


Figura 2.33: Distribuzione del K_I^V numerico nel caso della ruota dentata.

Mediando il valore del K_I^V numerico in molteplici punti, come descritto nel caso di cricca sollecitata di modo I, si è infine ottenuto:

$$K_I^V = 478.5 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.384} \quad (2.13)$$

Applicando il PSM attraverso l'utilizzo di una mesh free senza l'ausilio delle areole di suddivisione applicate all'apice dell'intaglio (figura 2.29) e utilizzando una global element size pari a 0.5 mm, si ottiene:

$$\sigma_{\text{peak}} = 502.28 \text{ MPa} \quad (2.14)$$

Dalla quale:

$$K_{FE}^* = \frac{K_I^V}{\sigma_{\text{peak}} \cdot d^{(1-\lambda_1)}} = \frac{478.5}{502.28 \cdot 0.5^{(1-0.616)}} = 1.243 \quad (2.15)$$

Confrontando questo risultato con quello suggerito dalla letteratura [7], pari a 1.38, si ottiene uno scostamento percentuale pari a:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{1.38 - K_{FE}^*}{1.38} = 100 \cdot \frac{1.38 - 1.243}{1.38} = 9.93\% \quad (2.16)$$

Si osserva quindi che i risultati sono coerenti con quanto atteso, ma presentano degli scostamenti troppo elevati rispetto ai valori suggeriti nella letteratura.

Sempre applicando il medesimo approccio senza l'ausilio di areole di suddivisione, si è svolta un'ulteriore analisi avvalendosi di una global element size inferiore scegliendo un valore arbitrario di 0.23 mm. Si ottiene:

$$\sigma_{peak} = 654 \text{ MPa} \quad (2.17)$$

Dalla quale:

$$K_{FE}^* = \frac{K_I^V}{\sigma_{peak} \cdot d^{(1-\lambda_1)}} = \frac{478.5}{654 \cdot 0.23^{(1-0.616)}} = 1.286 \quad (2.18)$$

Confrontando questo risultato con quello suggerito dalla letteratura [7], pari a 1.38, si ottiene uno scostamento percentuale pari a:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{1.38 - K_{FE}^*}{1.38} = 100 \cdot \frac{1.38 - 1.286}{1.38} = 6.81\% \quad (2.19)$$

Si nota perciò un significativo miglioramento della soluzione dovuto all'infittimento della mesh, ma purtroppo si ritiene ancora eccessiva la discordanza tra il valore consigliato in letteratura e quello ottenuto; per questo motivo sono state svolte le analisi col PSM sfruttando la suddivisione in areole precedentemente esposta (figura 2.27).

Con la suddivisione in areole e una global element size di 0.5 mm che consente di avere delle areole di 3x3 elementi all'apice della cricca si è ottenuto:

$$\sigma_{peak} = 479.87 \text{ MPa} \quad (2.20)$$

Dalla quale:

$$K_{FE}^* = \frac{K_I^V}{\sigma_{peak} \cdot d^{(1-\lambda_1)}} = \frac{478.5}{479.87 \cdot 0.5^{(1-0.616)}} = 1.301 \quad (2.21)$$

Confrontando questo risultato con quello suggerito dalla letteratura [7], pari a 1.38, si ottiene uno scostamento percentuale pari a:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{1.38 - K_{FE}^*}{1.38} = 100 \cdot \frac{1.38 - 1.301}{1.38} = 5.72\% \quad (2.22)$$

Confrontando questo risultato con quello relativo alla medesima global element size senza la divisione in areole (2.16) si osserva perciò un'ulteriore miglioramento dello scarto

percentuale calcolato grazie all'ausilio di questa procedura; utilizzando una dimensione d'elemento pari a 0.23, per la quale si ottengono due areole da 6x6 elementi adagate all'apice dell'intaglio, si ha:

$$\sigma_{peak} = 625.252 \text{ MPa} \quad (2.23)$$

Dalla quale:

$$K_{FE}^* = \frac{K_I^V}{\sigma_{peak} \cdot d^{(1-\lambda_1)}} = \frac{478.5}{625.25 \cdot 0.23^{(1-0.616)}} = 1.346 \quad (2.24)$$

Confrontando questo risultato con quello suggerito dalla letteratura [7], pari a 1.38, si ottiene uno scostamento percentuale pari a:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{1.38 - K_{FE}^*}{1.38} = 100 \cdot \frac{1.38 - 1.346}{1.38} = 2.46\% \quad (2.25)$$

Dal confronto col medesimo risultato ottenuto senza la suddivisione in areole (2.19) si osserva che, anche in questo caso, l'utilizzo di quest'ultime comporta un notevole miglioramento dello scarto percentuale ottenuto.

Come ultima prova si è aumentata la dimensione dell'areola in modo tale da consentirle di ospitare un 6x6 elementi di dimensione media pari a 0.5 mm. Si ottiene quindi:

$$\sigma_{peak} = 474.74 \text{ MPa} \quad (2.26)$$

Dalla quale:

$$K_{FE}^* = \frac{K_I^V}{\sigma_{peak} \cdot d^{(1-\lambda_1)}} = \frac{478.5}{474.74 \cdot 0.5^{(1-0.616)}} = 1.315 \quad (2.27)$$

Confrontando questo risultato con quello suggerito dalla letteratura [7], pari a 1.38, si ottiene uno scostamento percentuale pari a:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{1.38 - K_{FE}^*}{1.38} = 100 \cdot \frac{1.38 - 1.315}{1.38} = 4.71\% \quad (2.28)$$

Riassumendo i risultati:

K_{FE}^*	Senza divisione areole (figura 2.29)	Δ [%]
d = 0.5 mm	1.243	9.93%
d = 0.5 mm	1.243	9.93%
d = 0.23 mm	1.286	6.81%

Tabella 2.12: Riassunto dei K_{FE}^* ottenuti mediante l'applicazione del PSM

K_{FE}^*	Con divisione areole (figura 2.30)	Numero d'elementi contenuti nell'areola	Δ [%]
d = 0.5 mm	1.301	3x3	5.72%
d = 0.5 mm	1.315	6x6	4.71%
d = 0.23 mm	1.346	6x6	2.46%

Tabella 2.13: Riassunto dei K_{FE}^* ottenuti mediante l'applicazione del PSM.

Dalle tabelle si osserva che tutti i risultati ottenuti sono coerenti con quanto atteso; inoltre grazie alla suddivisione in areole e all'infittimento della mesh utilizzata nel PSM è stato possibile limitare l'errore percentuale dei risultati numerici, rispetto a quanto suggerito in letteratura [7], fino a valori inferiori al 3%.

Si conferma pertanto il corretto funzionamento del metodo PSM anche in quest'applicazione per la quale l'angolo di apertura è pari a 120° .

2.3 - Conclusioni del capitolo

Si conferma il corretto funzionamento del PSM nel caso a modo I, limitatamente all'angolo d'apertura trattato in questo elaborato pari cioè a 0° , applicato mediante l'utilizzo degli elementi PLANE182 della versione attuale di Ansys®, cioè 14; si ricorda che in letteratura [7] il metodo, nei casi a modo I, è stato calibrato utilizzando gli elementi PLANE42. Si elencano di seguito le Key Options che permettono agli elementi attualmente disponibili di comportarsi come quelli utilizzati per la calibrazione del metodo:

- Key Option 1: Element technology = "Simple Enhanced Strn", in Ansys®: K1=3;

- Key Option 3: Element behavior = "Plane stress", in Ansys®: K3=0;
- Key Option 6: Element formulation = "Pure displacement", in Ansys®: K6=0.

Il corretto funzionamento del PSM è stato confermato, applicandolo al caso pratico di una ruota dentata, anche nel caso d'intaglio con angolo d'apertura pari a 120° e utilizzo degli elementi SHELL63 con le Key Options riportate in figura 2.25.

Si ipotizza quindi che il metodo possa essere esteso per entrambe le tipologie d'elemento citate anche per i casi con angoli d'apertura differenti da quelli trattati; per la conferma di tale supposizione si rendono necessarie ulteriori analisi numeriche.

Un'importante informazione sull'applicazione del metodo proviene inoltre dal confronto tra i risultati ottenuti dalle mesh free non controllate e quelle controllate con un'areola posizionata all'apice dell'intaglio per ottenere il layout degli elementi desiderato; le due tipologie di mesh sono state confrontate nell'applicazione del metodo alla ruota dentata. Sembra infatti che le linee guida del metodo PSM che sono state sviluppate nel presente elaborato per gli intagli sollecitati a modo III, valgano anche nel caso d'intagli sollecitati a modo I. Per ulteriori informazioni a riguardo delle suddette linee guida si faccia riferimento al capitolo dedicato riportato successivamente; anche in questo caso per la conferma di tale supposizione risultano necessarie ulteriori indagini numeriche.

Capitolo 3: ANALISI DEI RISULTATI PRESENTI IN LETTERATURA

Nella letteratura sono già presenti alcune prove sperimentali relative a provini saldati sollecitati a modo III. Tutte le geometrie in questione sono costituite da un tubo saldato con delle flange di supporto; quest'ultime possono essere applicate ad una sola estremità, ad entrambe oppure posizionate in una zona intermedia del tubo stesso.

Il materiale dei provini testati in letteratura varia molto da caso a caso; i cordoni di saldatura analizzati sono sia a piena penetrazione sia a cordone d'angolo, e presentano varie dimensioni. Di seguito si riportano i materiali con i quali i giunti analizzati sono realizzati:

Ref.	Material	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Welding process	Testing condition
Sonsino [9]	StE 460	520	670	Semi-automatic MAG welding	Stress relieved
Yousefi et al. [10]	StE 460	520	670	Arc-welding	Stress relieved
Amstutz et al. [11]	StE 460	520	670	N.A.	Stress relieved
Seeger and Olivier [12]	St 35.29	240	390	Automatic MAG welding	Stress relieved
Seeger and Olivier [13]	StE 770	770	830	Automatic MAG welding	Stress relieved
Yung and Lawrence [14]	ASTM A519	552	700	Automatic MIG welding	As-welded
Siljander et al. [15]	Tube: ASTM A 519; Flange: ASTM A 36	552	700	Automatic MIG welding	Stress relieved
Razmjoo [16]	BS4360 50E	415	577	Manual metal arc-welding	As-welded

Figura 3.1: Materiali e processo saldatura utilizzati nei provini in letteratura [4].

Di seguito si riassumono, per ogni paragrafo, le varie geometrie analizzate e i risultati ottenuti in termini di resistenza a fatica, entrambi ricavati dalla letteratura. Inoltre sono riportate le analisi, svolte in questo elaborato, sia in termini di NSIF che di PSM per ciascuna geometria. Per le analisi sono stati adottati degli elementi bidimensionali a quattro nodi utilizzati per modellare strutture assialsimmetriche con carichi non assialsimmetrici: i PLANE25 disponibili dalla libreria di Ansys® 14. Ogni nodo dell'elemento possiede 3 gradi di libertà che corrispondono alle traslazioni nelle 3 direzioni; le Key Options impostate per tutte le analisi sono le seguenti:

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0	Include	0	0	0	0

Tabella 3.1: Riassunto delle Key Options impostate per le analisi con l'elemento PLANE25.

Si noti che queste sono le Key Option utilizzate di default quando si sceglie il PLANE25 in Ansys® 14.

Il materiale utilizzato per tutte le analisi è acciaio con modulo d'elasticità pari a 206000 MPa e coefficiente di Poisson uguale a 0.3.

3.1 - Programma automatico Matlab® utilizzato per le analisi dei provini in letteratura

Per le analisi sui provini testati in letteratura è stato sviluppato un programma Matlab® dedicato; di seguito se ne elencano le principali peculiarità e si descrivono gli input da fornire allo stesso per eseguire le analisi.

Anche quest'ultimo programma ricalca le linee guida dettate per quello di modo I; pure in questo caso si sceglie il tipo di elemento, le opportune Key Options, il materiale da utilizzare e si realizza la geometria. Dopo questi passi si crea una mesh free, controllata solo dall'imposizione della global element size; se si svolge un'analisi PSM la mesh ottenuta è già quella definitiva, mentre se si esegue un'analisi attraverso il metodo NSIF bisogna eseguire dei successivi refinement. Quest'ultimi sono, anche in questo caso, tarati in modo tale da raggiungere la più piccola dimensione d'elemento per quella data geometria; questo grazie alla peculiarità del programma stesso che itera finché non ricava il limite massimo di refine applicabili. Terminata la creazione della mesh il programma impone le condizioni al contorno e posiziona il sistema di riferimento locale sul punto di singolarità analizzato; quest'ultimo può essere sia il piede che la radice del cordone di saldatura nel caso in cui il cordone sia d'angolo, ma la scelta fra quale dei due analizzare è affidata all'utente.

Il programma automatico tiene conto di tutte queste diverse esigenze di modellazione e permette di scegliere la combinazione di caratteristiche desiderate.

Di seguito si riporta la descrizione degli input da fornire al programma:

1. Riga 9 - Variabile "start". Se posta = 0 il programma crea solamente il file apdl e termina la propria esecuzione, mentre se posta = 1 il programma crea il file apdl, lancia un'esecuzione batch di Ansys® ed esegue il postprocess dei risultati;
2. Riga 15 - Variabile "NSIF". Se posta = 1 il programma esegue l'analisi dell'intaglio attraverso il metodo NSIF, mentre se posta = 0 il programma esegue un'analisi sfruttando il PSM;

3. Riga 20 - Variabile "piede". Specifica se l'analisi NSIF o PSM è effettuata alla radice o al piede della saldatura;
4. Riga 24 - Variabile "sizable". Specifica la dimensione globale degli elementi nel caso d'analisi NSIF;
5. Riga 27 - Variabile "sizable". Vettore che specifica le dimensioni di elemento da testare durante la batteria d'analisi PSM;
6. Riga 35 - Variabile "nrefi1". Numero massimo di refine nel metodo NSIF che coinvolgono una profondità di 10 elementi;
7. Riga 35 - Variabile "nrefi2". Numero massimo di refine nel metodo NSIF che coinvolgono una profondità di 6 elementi;
8. Riga 46 - Variabile "sons". Specifica se la geometria analizzata è congruente con quella proposta da Sonsino (=1) oppure no (=0) (vedere figura 3.3);
9. Riga 48 - Variabile "forata". Specifica se la flangia di fissaggio del provino presenta un foro al centro (=1) oppure no (=0);
10. Riga 51 - Variabile "paramfor". Specifica se l'eventuale foro presente sulla flangia di fissaggio ha diametro pari al diametro interno del tubo (=1) oppure differente (=0); questa variabile è chiamata in causa solo se "forata"=1, altrimenti il programma non ne tiene conto;
11. Riga 77 - Variabile "diametroforo". Specifica il diametro del foro eventualmente presente sulla flangia di fissaggio quando esso è diverso dal diametro interno del tubo; il programma tiene conto di questa variabile quando "forata"=1 e "paramfor"=0;
12. Riga 55 - Variabile "b". Specifica la dimensione del lato della saldatura in mm;
13. Riga 57 - Variabile "de". Specifica il diametro esterno del tubo in mm;
14. Riga 59 - Variabile "t". Specifica lo spessore del tubo in mm;
15. Riga 61 - Variabile "spt". Specifica lo spessore della flangia di fissaggio qualora essa sia localizzata all'estremità del tubo, come per esempio in figura 3.3; nel caso

in cui la flangia sia posizionata in una posizione intermedia del tubo stesso (vedere figura 3.41) questa variabile deve essere posta = 0;

16. Riga 95 - Variabile "axi". Specifica la distanza in mm della posizione della flangia di fissaggio dall'estremità del tubo nel qual caso essa non sia posizionata alla sua estremità;
17. Riga 97 - Variabile "spl". Specifica lo spessore della flangia di fissaggio in mm nel caso in cui quest'ultima non sia posizionata all'estremità del tubo;
18. Riga 63 - Variabile "dext". Specifica il valore del diametro esterno della flangia di fissaggio in mm;
19. Riga 65 - Variabile "lt". Specifica la lunghezza totale del tubo in mm al netto della dimensione dell'eventuale flangia di fissaggio all'estremità dello stesso;
20. Riga 68 - Variabile "int". Specifica la tipologia del cordone di saldatura; se è posta =1 si analizza un cordone d'angolo, mentre se è =0 un cordone a piena penetrazione;
21. Riga 70 - Variabile "dcf". Specifica il diametro centro fori relativo ai fori di fissaggio della flangia in mm;
22. Riga 72 - Variabile "dfori". Specifica il diametro dei fori utilizzati per il fissaggio della flangia in mm;
23. Riga 85 - Variabile "fs". Utilizzata solo nella geometria di Sonsino; in tutti gli altri casi il programma ignora il contenuto di questa variabile. Per la sua definizione riferirsi alla figura 3.2;
24. Riga 87 - Variabile "fps". Utilizzata solo nella geometria di Sonsino; in tutti gli altri casi il programma ignora il contenuto di questa variabile. Per la sua definizione riferirsi alla figura 3.2;
25. Riga 89 - Variabile "ss". Utilizzata solo nella geometria di Sonsino; in tutti gli altri casi il programma ignora il contenuto di questa variabile. Per la sua definizione riferirsi alla figura 3.2;

26. Riga 91 - Variabile "spfps". Utilizzata solo nella geometria di Sonsino; in tutti gli altri casi il programma ignora il contenuto di questa variabile. Per la sua definizione riferirsi alla figura 3.2;
27. Riga 100 - Variabile "TAU". Permette di impostare la tensione tangenziale nominale applicata al tubo in [MPa].

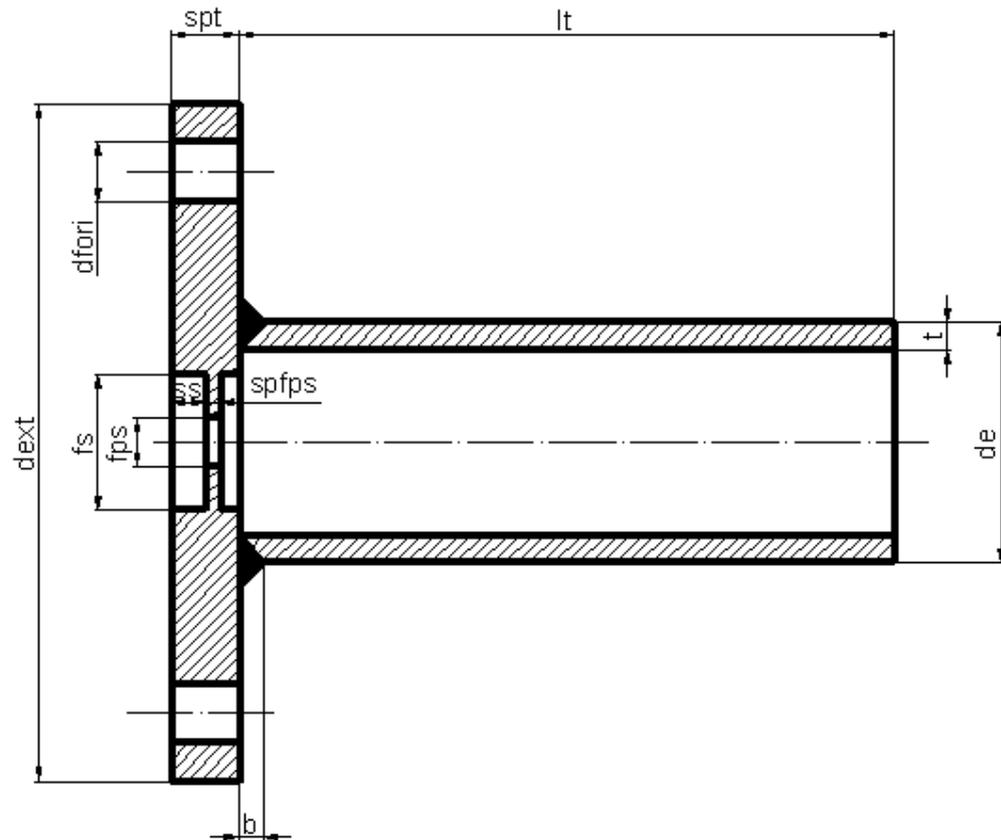


Figura 3.2: Esempio di definizione delle grandezze utilizzate all'interno del programma automatico; la geometria in esame è tratta dai provini testati da Sonsino [4].

3.2 - Sonsino

3.2.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

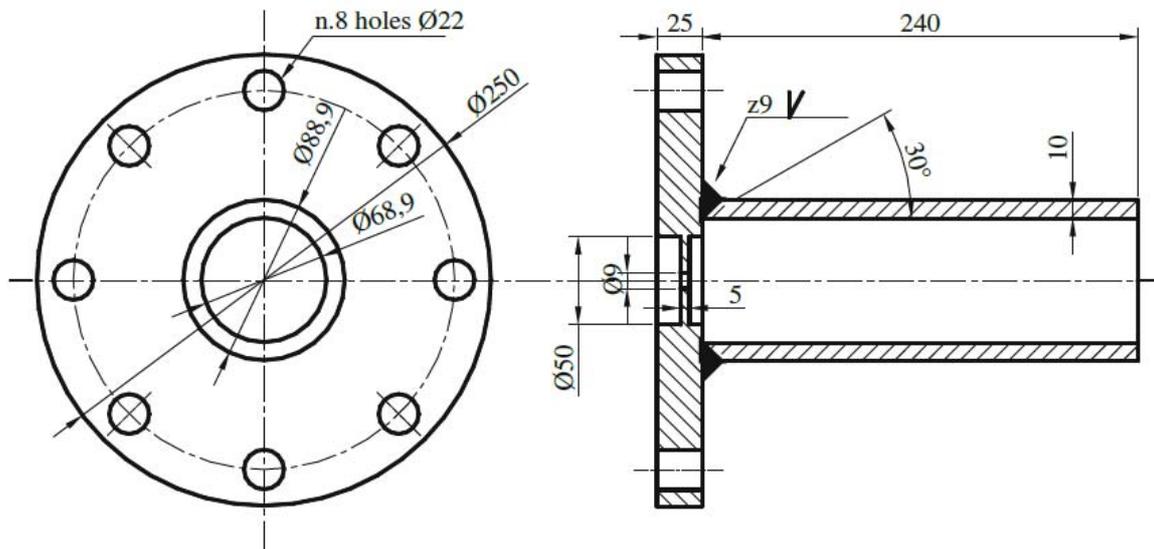


Figura 3.3: Geometria del giunto analizzata da Sonsino (tratta da[4]; l'articolo originale è [9]).

I risultati ottenuti in letteratura sono:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	324	371000	Tubo
	320	302000	Tubo
	458	16500	Piede
	436	21500	Piede
	462	6920	Tubo
	440	19900	Piede
	376	66000	Tubo
	362	70200	Tubo
	362	65100	Piede
	280	495000	Tubo

Tabella 3.2: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame (da [9]).

I risultati utilizzabili sono solo quelli evidenziati in grassetto, per i quali l'innesco della cricca origina dal piede della saldatura (si rammenta che in questo caso la saldatura è a piena penetrazione); in tutti gli altri casi l'innesco parte dal tubo, in corrispondenza del

punto d'afferraggio, per cui i dati non sono utilizzabili per svolgere analisi al cordone di saldatura poiché è il materiale base che cede.

Si riporta un diagramma di riassunto dei risultati:

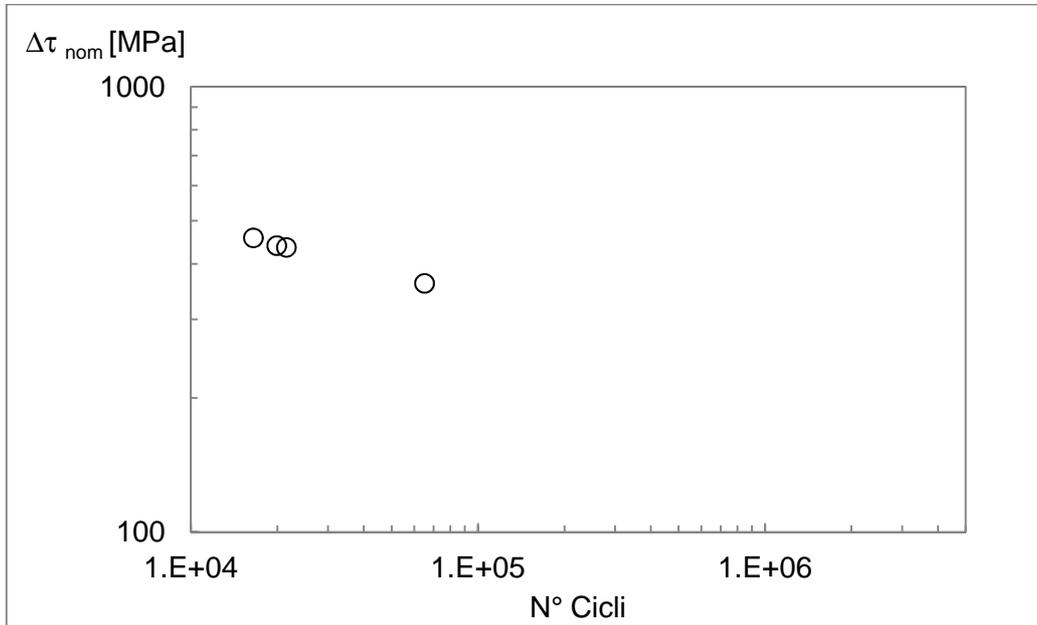


Figura 3.4: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

3.2.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

Dapprima si riporta quanto ottenuto dall'analisi NSIF del provino. La geometria di Sonsino prevede cordoni di saldatura a piena penetrazione, perciò l'analisi NSIF può essere effettuata solamente al piede del cordone. La mesh utilizzata è raffinata all'apice dell'intaglio ed è costituita da elementi della più piccola dimensione possibile in quella zona. Questo procedimento è stato esteso anche a tutti gli altri casi analizzati dalla letteratura.

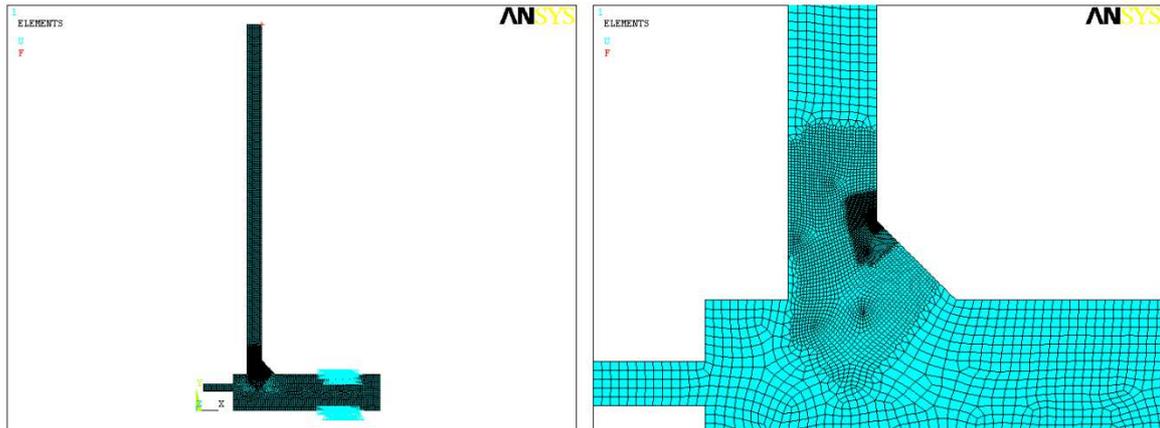


Figura 3.5: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

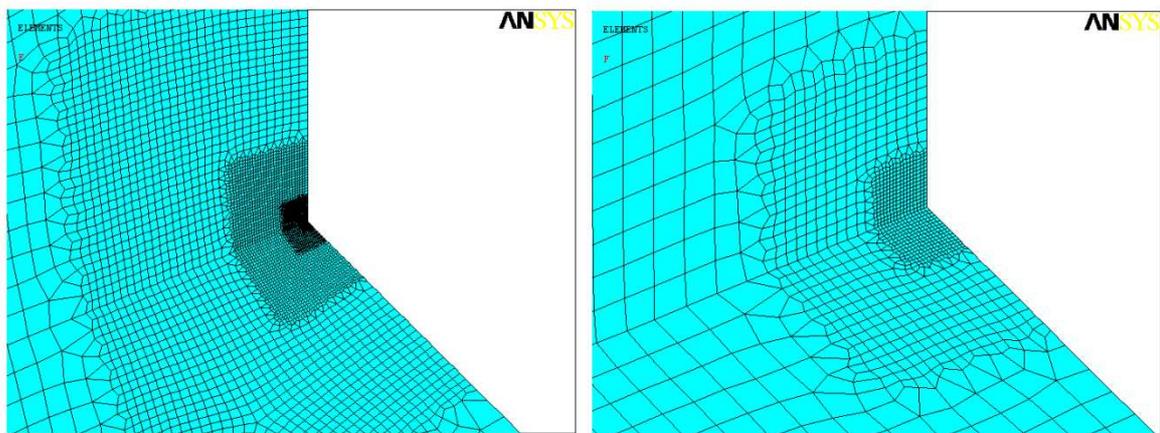


Figura 3.6: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $1.5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Dalla figura soprastante, nell'immagine a sinistra, è inoltre possibile osservare le condizioni al contorno applicate:

- Vincoli, applicati su una parte della flangia, che bloccano tutti i gradi di libertà di traslazione per un'estensione definita; questi hanno lo scopo di modellare l'azione del collegamento bullonato tra la flangia e l'organo di sostegno. I vincoli in questione sono applicati solo sulle linee superiore ed inferiore della flangia, per una lunghezza pari al diametro del foro che ospita la vite e posizionati in modo tale che la mezziera della linea vincolata si trovi in corrispondenza del diametro centro fori della flangia. Questo modello è stato sviluppato dopo alcuni test per valutare la differenza sui risultati al variare delle condizioni di vincolo; in questa sede è sufficiente notare che anche vincolando completamente la linea inferiore della

flangia i risultati rimangono coerenti, ma si preferisce adottare il modello di vincolo già descritto poiché ritenuto più fedele alla realtà;

- Forza ortogonale al piano di lavoro, applicata all'estremità del tubo, che modella la torsione sul provino.

Analoghe condizioni al contorno sono state imposte per tutti gli altri casi analizzati dalla letteratura.

Nel caso di applicazione del PSM si ha:

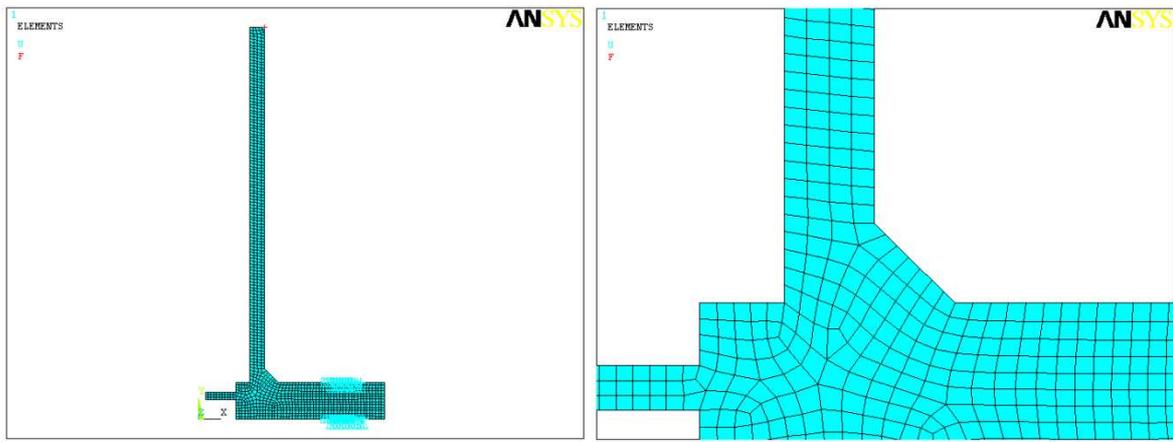


Figura 3.7: Mesh utilizzata per l'analisi PSM e relativo ingrandimento.

I vincoli in questo caso sono i medesimi già illustrati nel caso di NSIF, ma la mesh è di alcuni ordini di grandezza meno fitta.

Si riportano i risultati ottenuti in termini di NSIF e di estensione del campo locale di tensione in questo caso.

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	2.981
$x^* [mm]$	1.695

Tabella 3.3: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente come descritto in precedenza.

Si noti che il valore dell'NSIF riportato in tabella è stato calcolato seguendo le stesse linee guida riportate nel paragrafo dedicato al modo I; si è diagrammato l'andamento dell'NSIF numerico in funzione della distanza dall'apice dell'intaglio, si è individuato il plateau

numerico formato e si è mediato il valore su più punti di quest'ultimo. L'estensione del campo locale di tensione, indicata con x^* , è stata invece calcolata come il valore della distanza x locale, misurata lungo la bisettrice dell'angolo di apertura dell'intaglio, per la quale si ha uno scostamento percentuale del 5% dei valori dell'NSIF numerico rispetto a quello calcolato attraverso la media.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM in termini di K_{FE}^{***} :

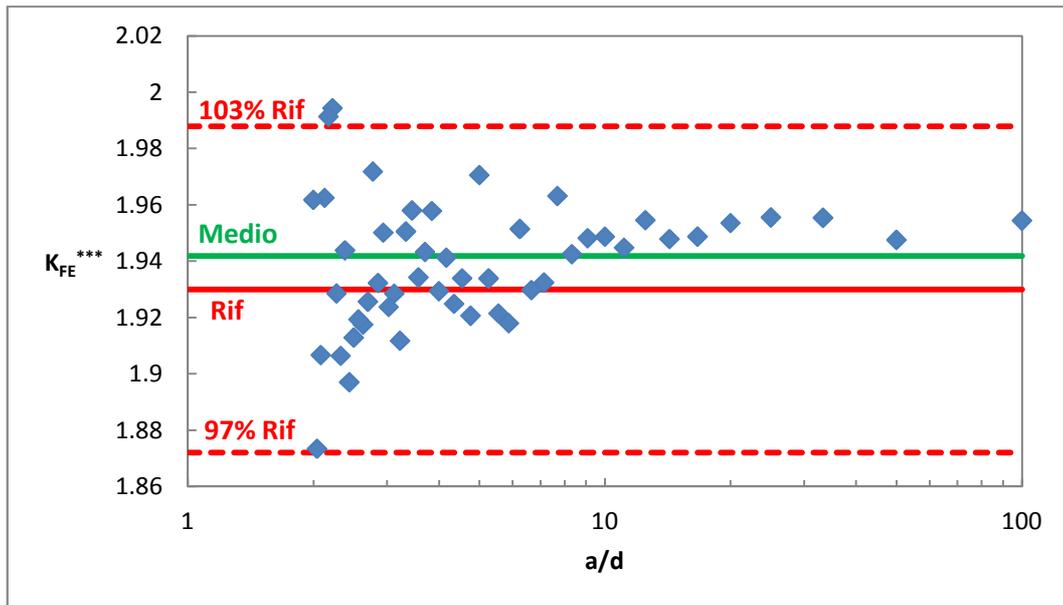


Figura 3.8: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 3$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

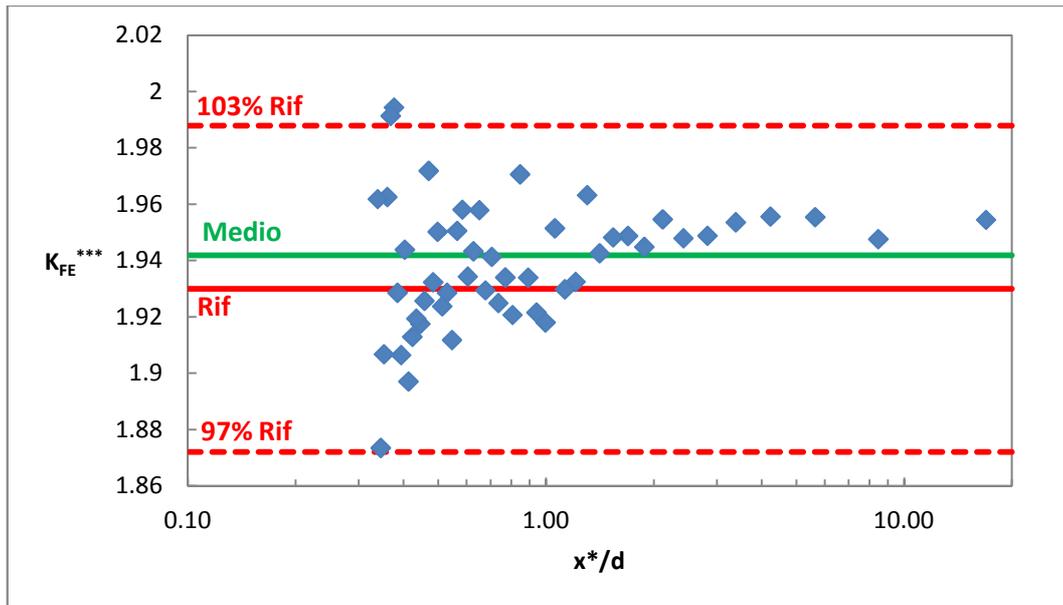


Figura 3.9: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Nella prima immagine si è riportato l'andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d , mentre nella seconda in funzione di x^*/d .

Il K_{FE}^{***} numerico medio è ottenuto mediando i valori numerici che si trovano ad $a/d \geq 3$, che corrisponde al limite di convergenza del metodo PSM definito in letteratura, è pari a 1.942; si noti perciò la coerenza col valore 1.93 proposto in letteratura [7] e il fatto che il valore medio ricavato è contenuto all'interno della banda d'accettabilità del 3% rispetto a quest'ultimo.

L'utilizzo della seconda definizione per diagrammare il K_{FE}^{***} , cioè quella in x^*/d , in questo caso non comporta significativi miglioramenti rispetto alla definizione classica in a/d poiché entrambi i diagrammi non presentano valori che fuoriescono dalla banda d'accettabilità nella zona a convergenza. Tutto ciò è legato al fatto che si sta analizzando una geometria fissata variando solo la dimensione globale degli elementi mentre nel capitolo di modo I, dove si notava una significativa differenza tra i due approcci, si fissava una dimensione globale d'elemento e si variava la dimensione caratteristica dell'intaglio, causando tutte le conseguenze già analizzate dovute all'interazione dei campi locali di tensione. Entrambi gli approcci di convergenza risultano pertanto validi in questo caso; si nota inoltre che per la geometria in esame il limite di convergenza in a/d è di poco

inferiore al valore 3 suggerito in letteratura nel caso di rottura al piede mentre in x^*/d è inferiore all'unità e approssimato al valore 0.5.

3.3 - Yousefi et al.

3.3.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

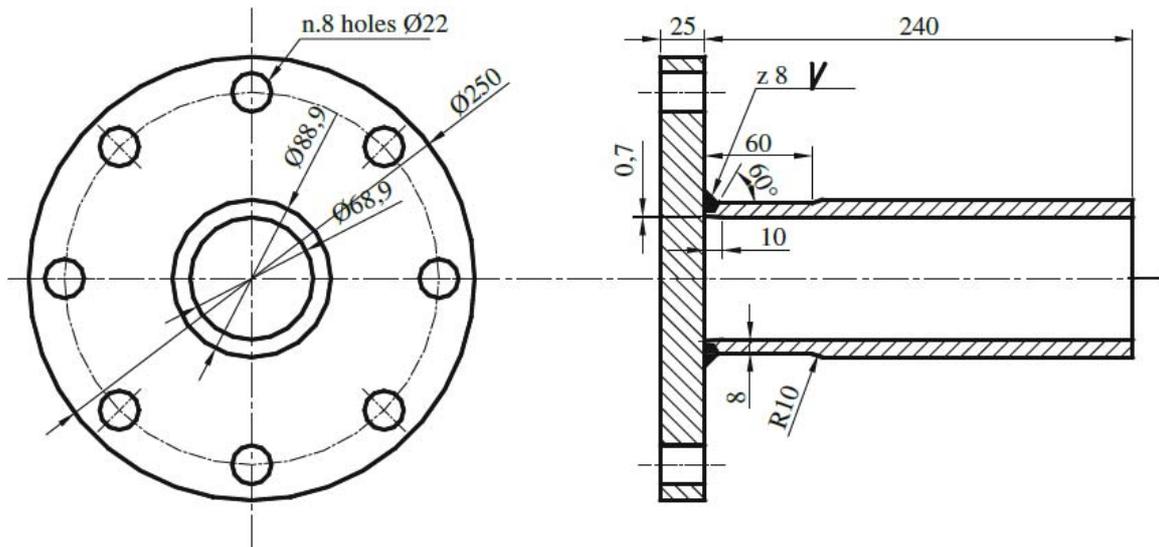


Figura 3.10: Geometria del giunto analizzata da Yousefi e al. (tratta da[4]; l'articolo originale è [10]).

Si riporta una tabella con i risultati ottenuti dalla letteratura:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	400.65	14863	Piede
	401.73	21060	Piede
	321.67	198086	Piede
	300.60	200481	Piede
	301.42	227444	Piede
	241.35	734096	Piede
	242.66	832828	Piede
	299.79	214180	Piede
R=0	303.59	294093	Piede
	301.19	404275	Piede
	261.62	760750	Piede
	268.46	458381	Piede
	270.60	371801	Piede
	244.08	888219	Piede
	208.67	1437560	Piede
	233.65	1210808	Piede
	241.19	1063426	Piede

Tabella 3.4: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame (da [10]).

Si riporta inoltre un diagramma di riassunto dei risultati:

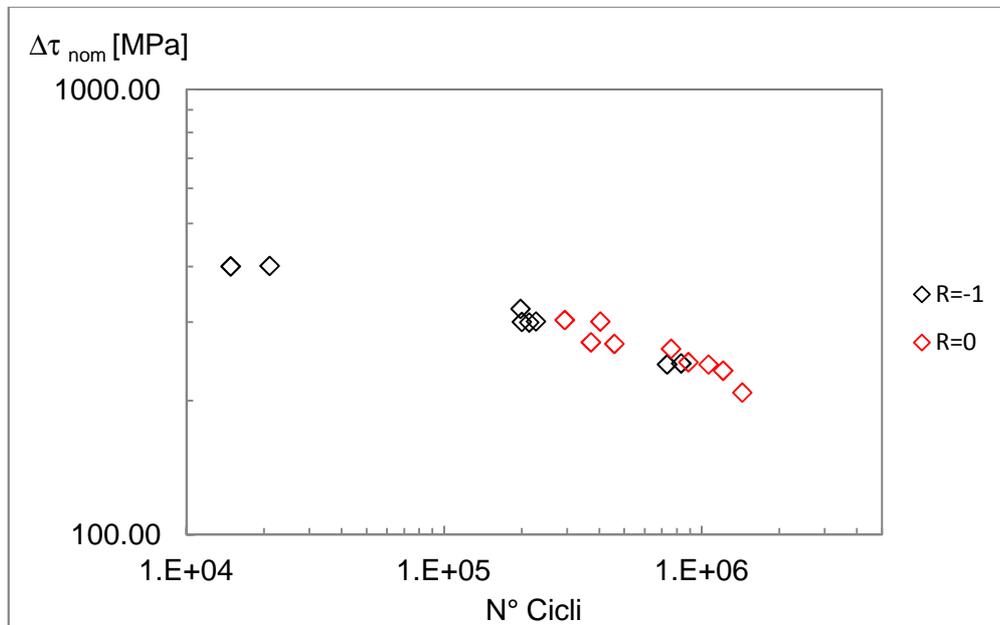


Figura 3.11: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

3.3.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

Anche in questo caso il cordone è a piena penetrazione; si analizza quindi il piede della saldatura. La geometria è stata opportunamente modificata considerando il tubo completamente di spessore pari a 8 mm, mentre nella realtà esso presenta uno spessore variabile lungo la sua estensione (vedere figura 3.10). Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

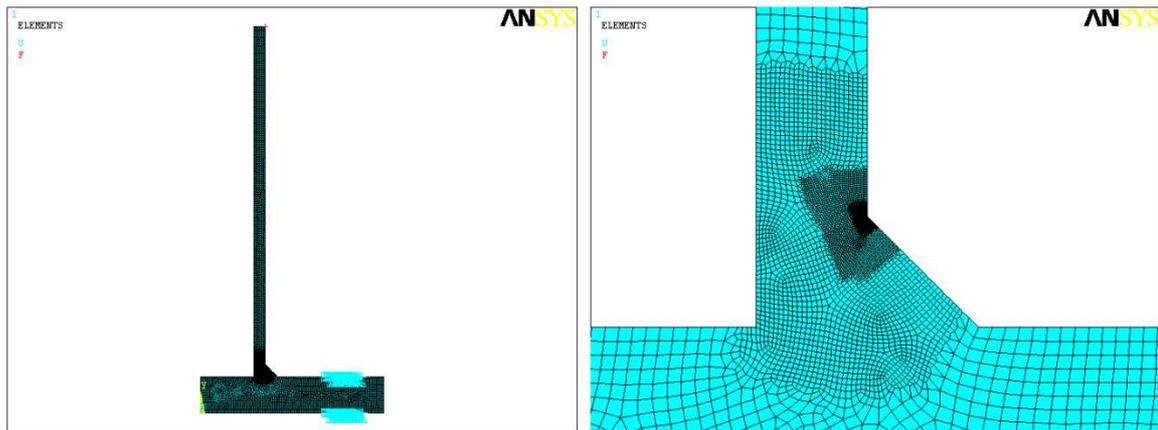


Figura 3.12: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

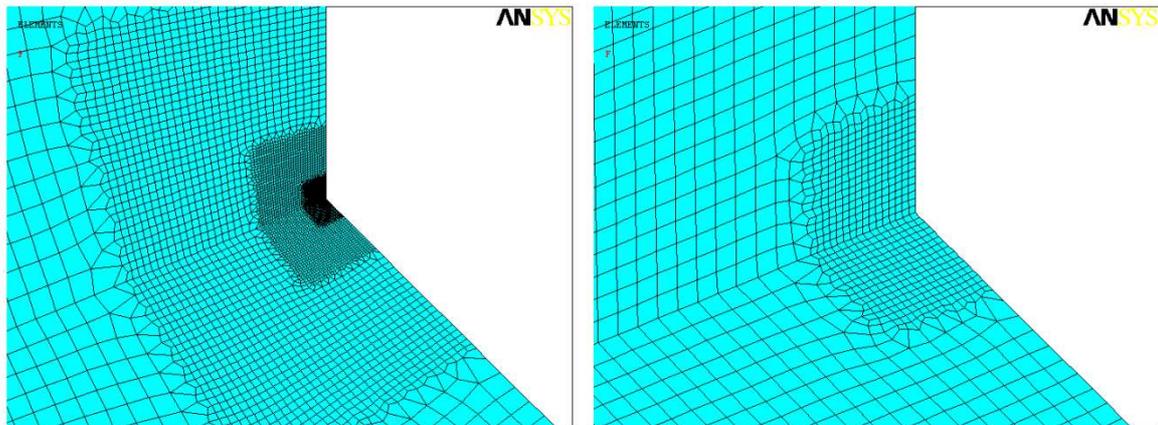


Figura 3.13: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Le condizioni al contorno applicate sono le medesime descritte nel paragrafo dedicato alle analisi effettuate sulla geometria di Sonsino.

Nel caso di applicazione del PSM si ha invece:

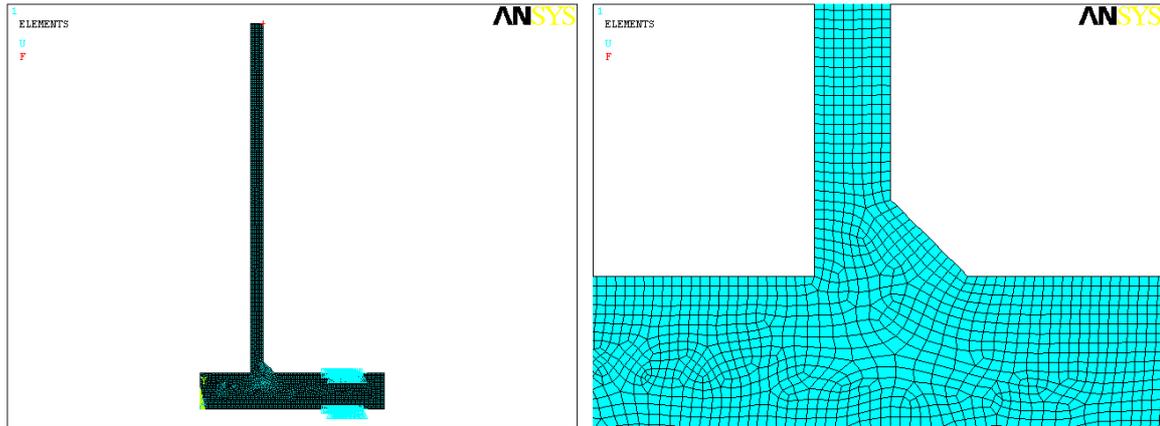


Figura 3.14: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Si riportano i risultati ottenuti in termini di NSIF e di estensione del campo locale di tensione in questo caso.

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	2.858
$x^* [mm]$	1.677

Tabella 3.5: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente seguendo le regole precedentemente descritte.

Per ulteriori informazioni sulle metodologie utilizzate per ricavare tali valori riferirsi al paragrafo dedicato alla geometria di Sonsino.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

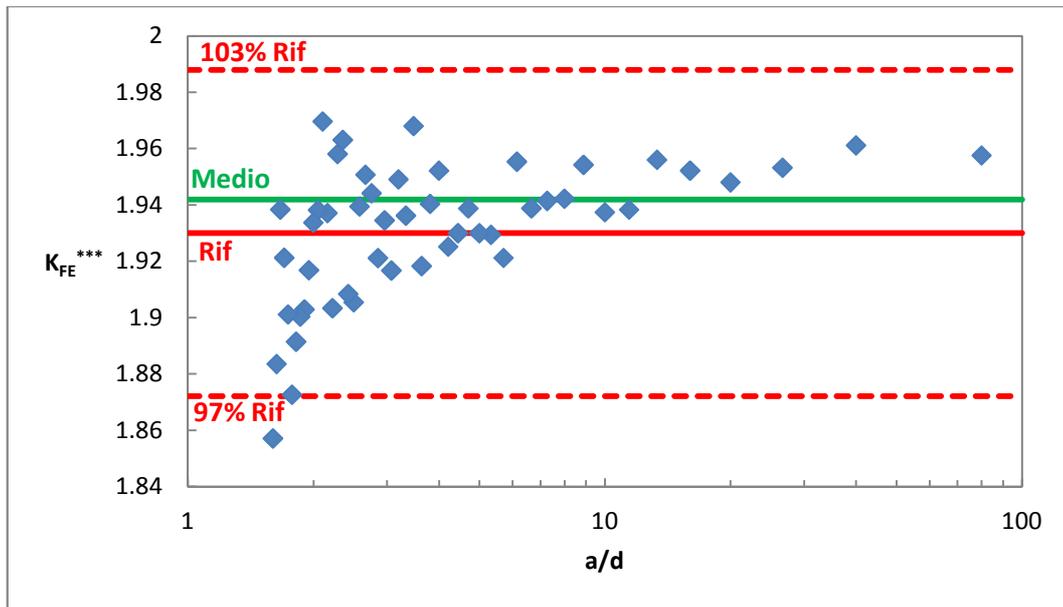


Figura 3.15: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 3$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

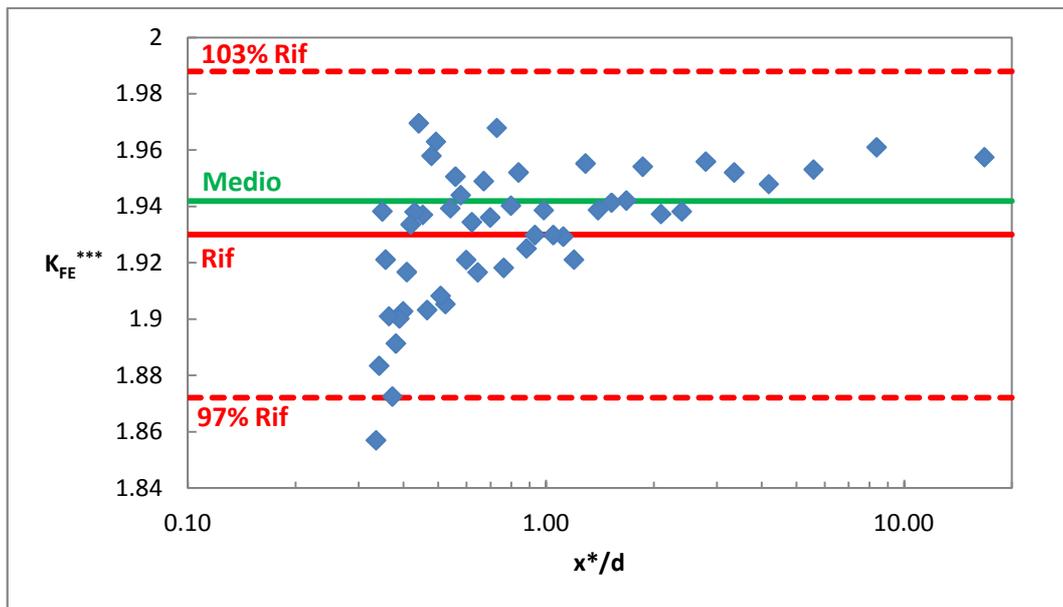


Figura 3.16: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è di 1.942, coerente col valore 1.93 proposto in letteratura [7] e contenuto all'interno della banda d'accettabilità del 3% rispetto a quest'ultimo; il valore medio è stato calcolato mediando i valori di K_{FE}^{***} ricavati per $a/d \geq 3$.

L'utilizzo del secondo criterio di convergenza, cioè quello in x^*/d , per diagrammare il K_{FE}^{***} non comporta significativi miglioramenti rispetto alla definizione classica, come già osservato e discusso per la geometria di Sonsino. Entrambi gli approcci di convergenza risultano pertanto validi; in questo caso particolare il limite di convergenza nel caso di a/d è di poco inferiore al valore 3 suggerito in letteratura [4] per rotture al piede, mentre nel caso di x^*/d è inferiore all'unità e pari a circa 0.5.

3.4 - Amstutz et al.

3.4.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

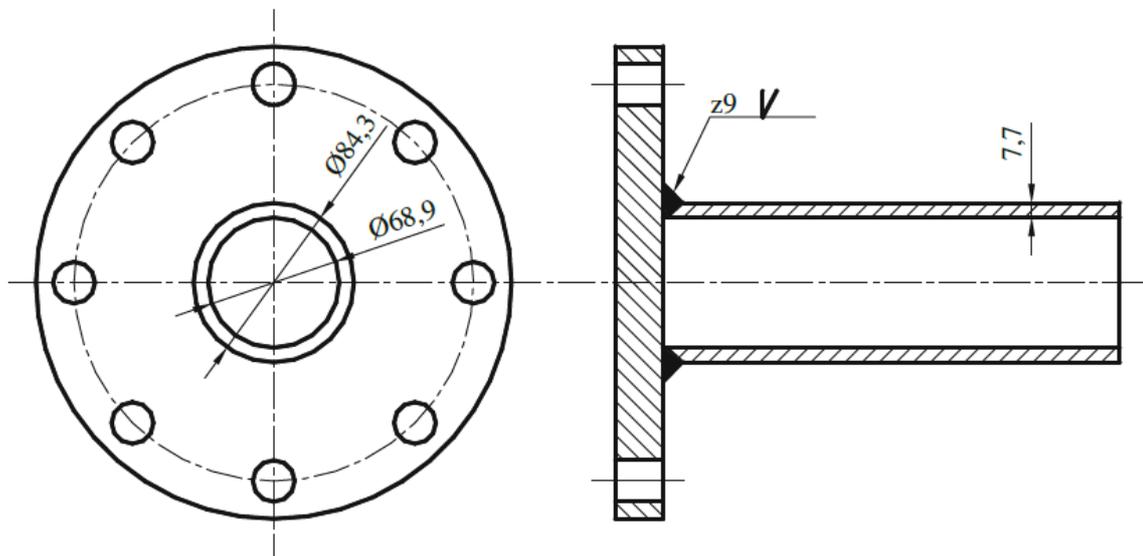


Figura 3.17: Geometria del giunto analizzata da Amstutz e al. (tratta da[4]; articolo originale [11]).

Si riassumono i risultati ottenuti in letteratura:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	296.00	26738	Piede
	296.00	51709	Piede
	236.00	104737	Piede
R=0	308.00	18042	Piede
	296.00	36544	Piede
	270.00	44488	Piede
	230.00	157029	Piede

Tabella 3.6: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame (da [11]).

Si riportano i risultati in un diagramma:

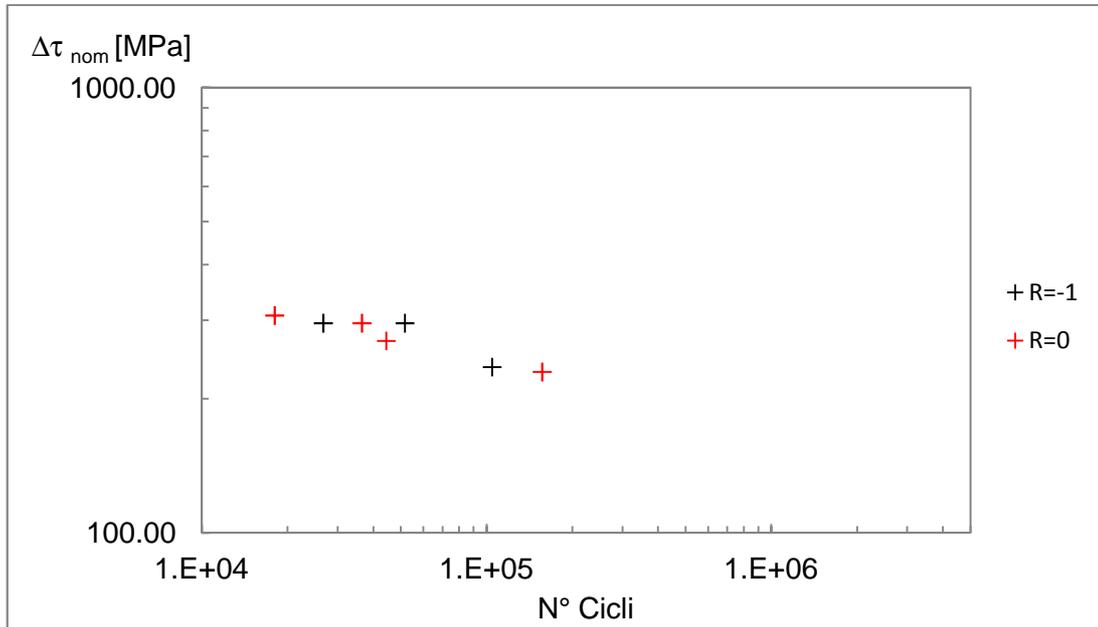


Figura 3.18: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

3.4.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

Il cordone è a piena penetrazione; si analizza quindi il piede della saldatura. Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

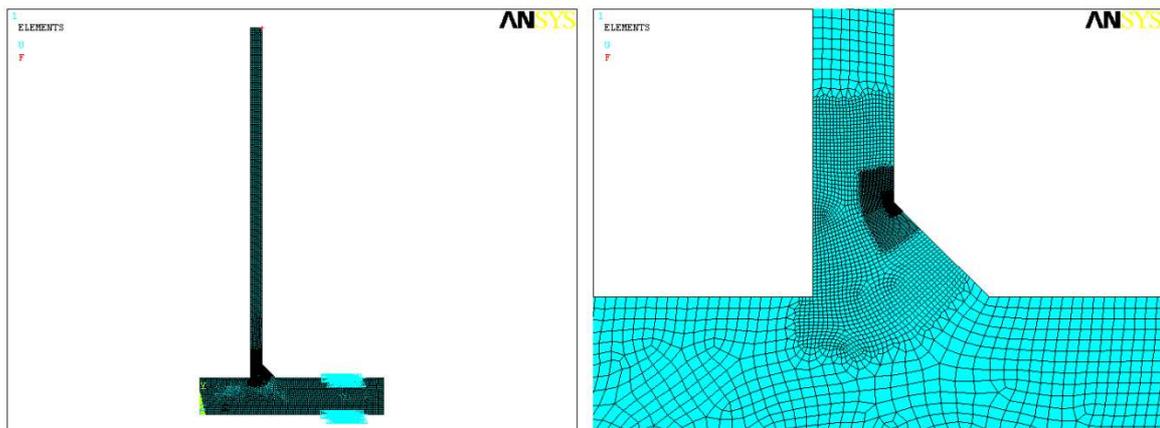


Figura 3.19: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

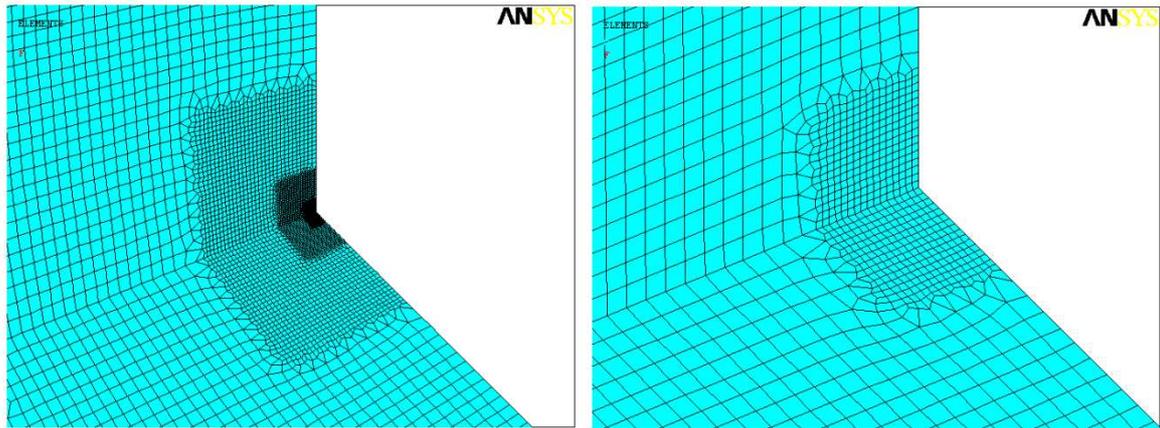


Figura 3.20: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Le condizioni al contorno applicate sono già state descritte in precedenza.

Nel caso di applicazione del PSM si ha invece:

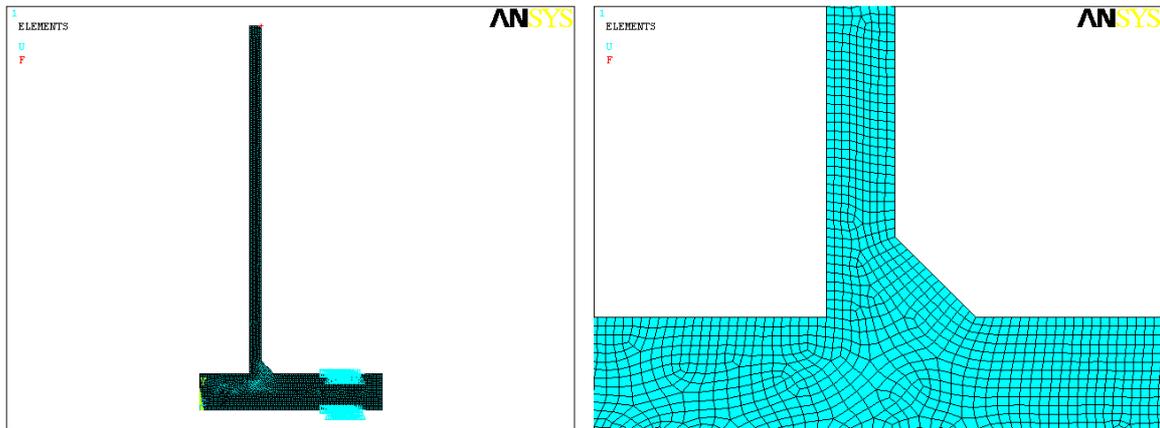


Figura 3.21: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Si riportano i risultati ottenuti in termini di NSIF e di estensione del campo locale di tensione in questo caso.

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	2.836
$x^* [mm]$	1.605

Tabella 3.7: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente; la metodologia di calcolo degli stessi è già stata descritta all'interno del paragrafo dedicato a Sonsino.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

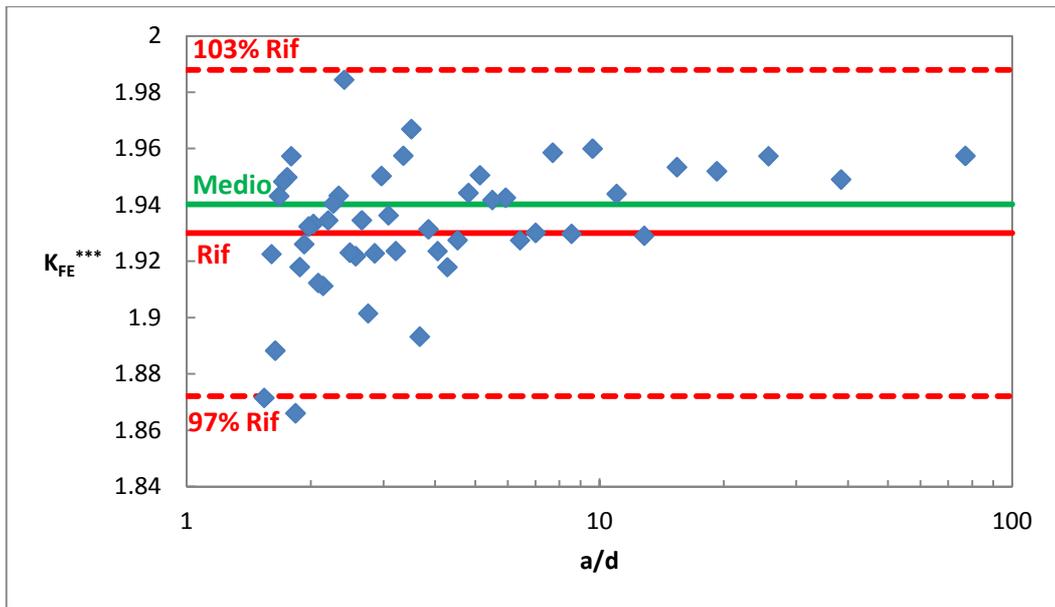


Figura 3.22: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 3$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

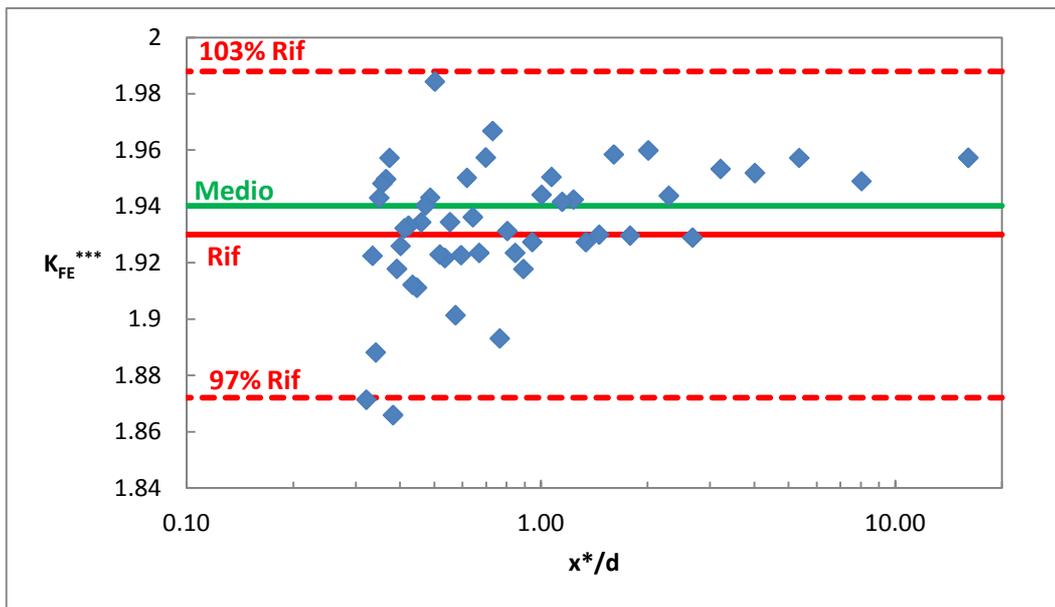


Figura 3.23: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è di 1.940, molto vicino al valore 1.93 proposto in letteratura [7] e contenuto all'interno della banda d'accettabilità del 3% rispetto a quest'ultimo.

Anche in questo caso valgono le medesime considerazioni svolte per la geometria Yousefi et al. per quanto riguarda i criteri e i valori di convergenza.

3.5 - Seeger and Olivier - piena penetrazione

3.5.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

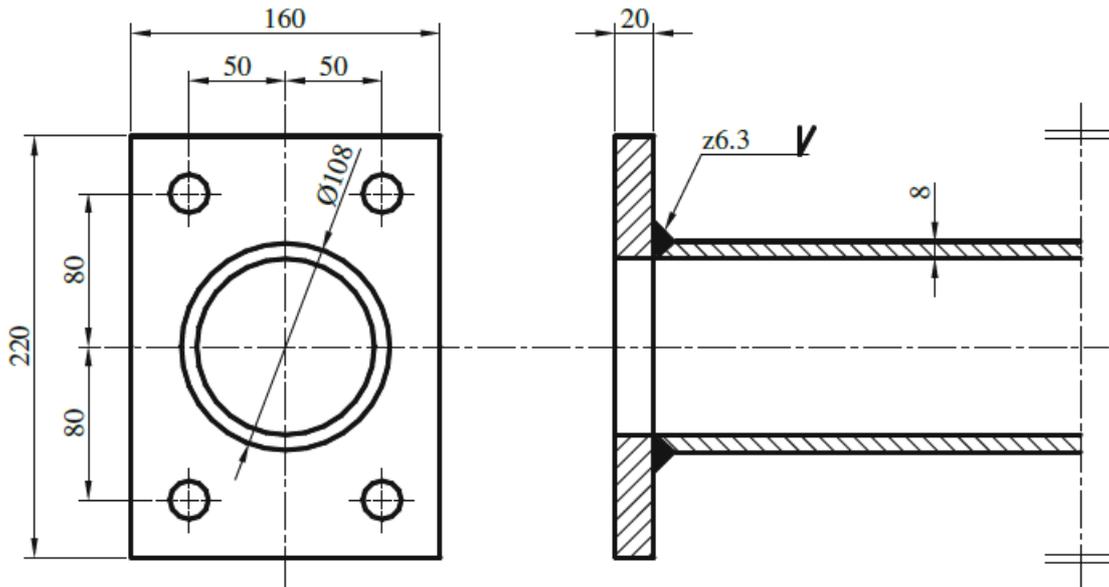


Figura 3.24: Geometria del giunto analizzata da Seeger e Olivier (tratta da[4]; articolo originale [12]).

Si riassumono i risultati ottenuti in letteratura in una tabella:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	208.00	820000	Piede
	208.00	1480000	Piede
	208.00	2000000	Piede
	180.00	2240000	Piede
	180.00	3000000	Piede

Tabella 3.8: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame (da [12]).

Si riporta inoltre un diagramma di riassunto dei risultati:

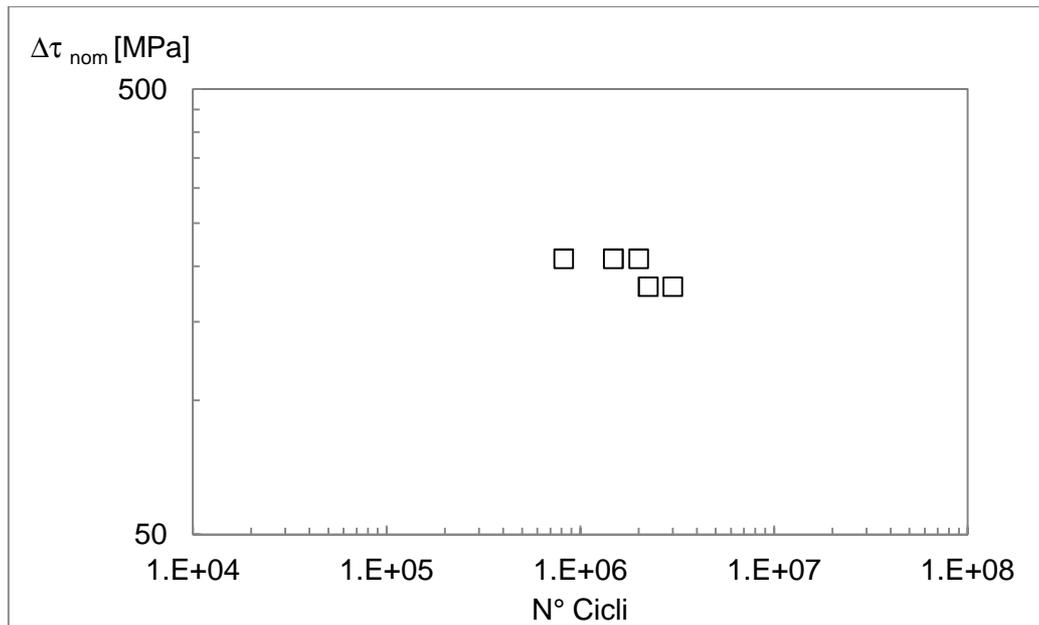


Figura 3.25: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

3.5.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

Anche in questo caso il cordone è a piena penetrazione; si analizza quindi il piede della saldatura. Si noti inoltre che, in questo caso e in alcuni successivi, la flangia di fissaggio ha forma rettangolare; poiché si sta semplificando il problema utilizzando una geometria 2D e imponendo l'assialsimmetria attorno all'asse y della stessa, non è possibile tenere conto di questa particolare forma e si semplifica il problema modellando il sistema come se la flangia di fissaggio fosse di forma circolare con diametro pari alla diagonale di quella rettangolare. Un'ulteriore semplificazione è legata al fatto che nelle analisi si è modellata solo la metà del provino, la stessa che è rappresentata in figura 3.24, focalizzando l'interesse sui fenomeni che avvengono sull'unico cordone di saldatura considerato e applicando la forza ortogonale al piano che modella la torsione all'estremità del modello numerico creato che corrisponde alla mezzeria del provino fisico.

Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

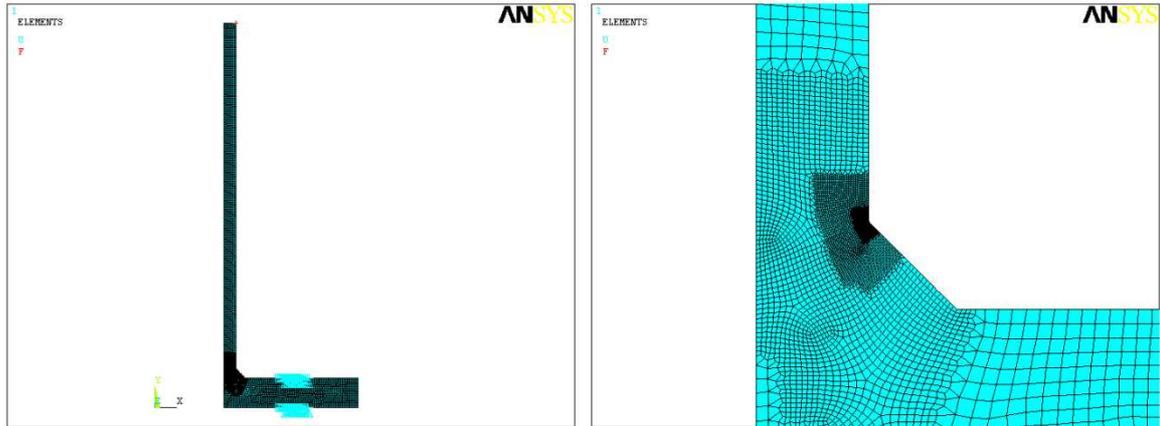


Figura 3.26: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

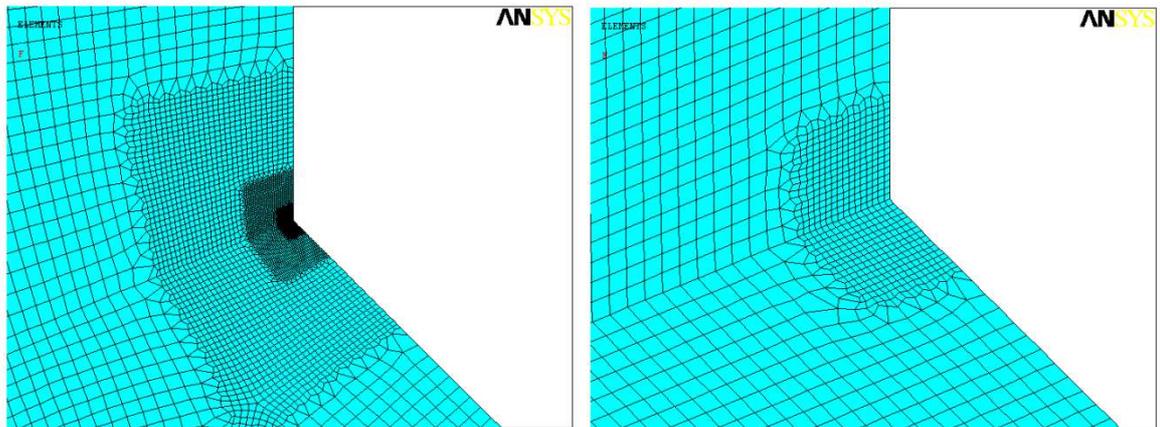


Figura 3.27: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Nel caso di applicazione del PSM si ha invece:

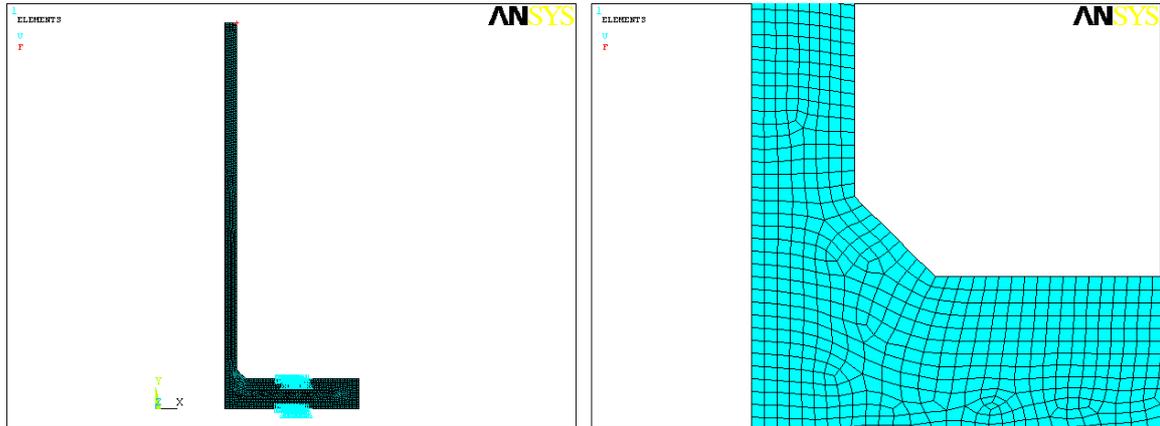


Figura 3.28: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Si riportano i risultati ottenuti in termini di NSIF e di estensione del campo locale di tensione in questo caso.

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	2.907
$x^* [mm]$	1.876

Tabella 3.9: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente seguendo le metodologie già descritte in precedenza.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

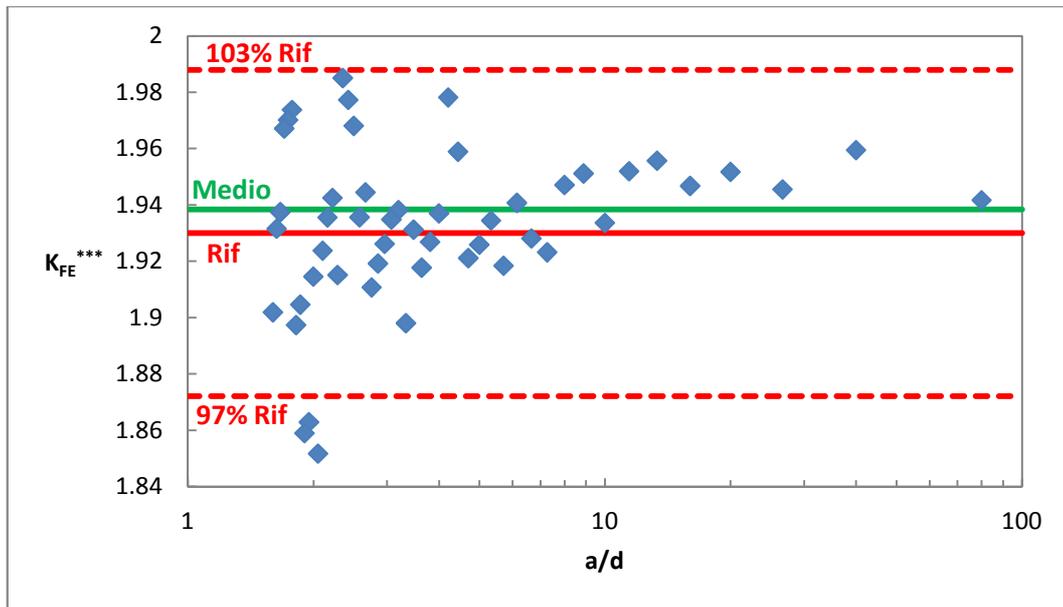


Figura 3.29: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 3$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

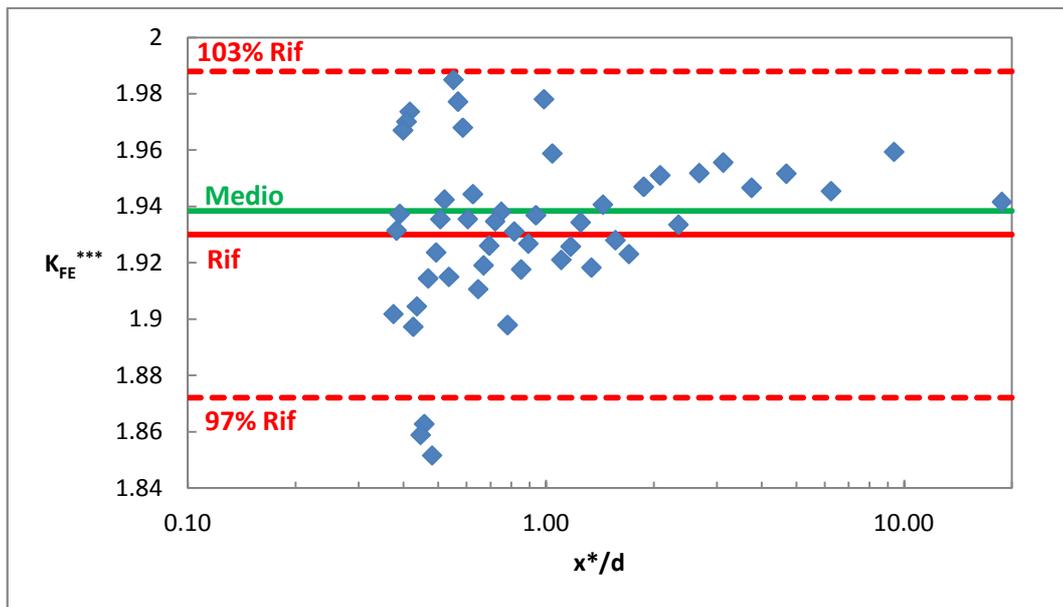


Figura 3.30: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è di 1.938, coerente col valore 1.93 proposto in letteratura [7] e contenuto all'interno della banda d'accettabilità del 3% rispetto a quest'ultimo.

Per quanto riguarda i metodi di convergenza per questa geometria valgono le osservazioni già svolte per quelle precedentemente trattate; i limiti di convergenza sono circa pari a 3 nel caso di a/d e circa pari a 0.7 nel caso di x^*/d .

3.6 - Seeger and Olivier - cordone d'angolo

3.6.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

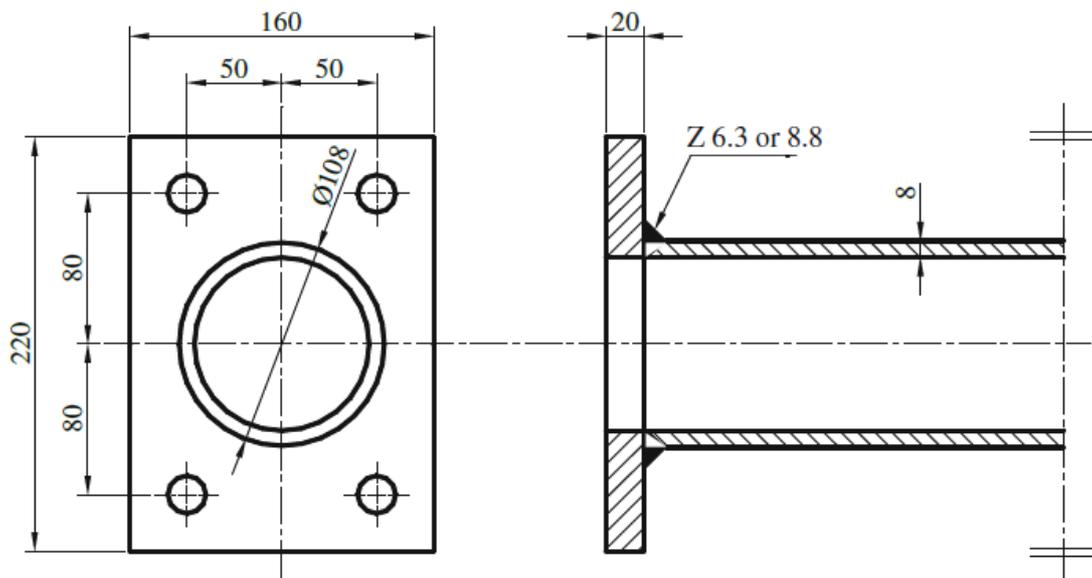


Figura 3.31: Geometria del giunto analizzata da Seeger e Olivier (tratta da[4]; articoli originali [12], [13]).

Si riassumono i risultati ricavati dalla letteratura, relativi alla geometria con cordone di saldatura di lato 6.3 mm, nella seguente tabella:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	116.71	2361032	Radice
	116.40	4430174	Radice
	102.13	4703825	Radice
	101.60	6475597	Radice
	101.87	10459785	Radice
	148.32	1000000	Radice
	148.32	130000	Radice
	148.32	152000	Radice
	132.93	959979	Radice
	132.54	1107506	Radice

	133.32	1873817	Radice
	117.04	1873817	Radice
	133.32	2161780	Radice
	133.32	3043479	Radice
	119.13	2862614	Radice
	132.54	5820586	Non rotto
	118.08	10051186	Non rotto
	101.87	10459785	Non rotto

Tabella 3.10: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame e prendendo in considerazione un cordone di saldatura di lato 6.3 mm (da [12]).

I risultati utilizzabili sono quelli evidenziati in grassetto; negli altri casi il provino non è giunto a rottura.

Si raccolgono i risultati in un diagramma:

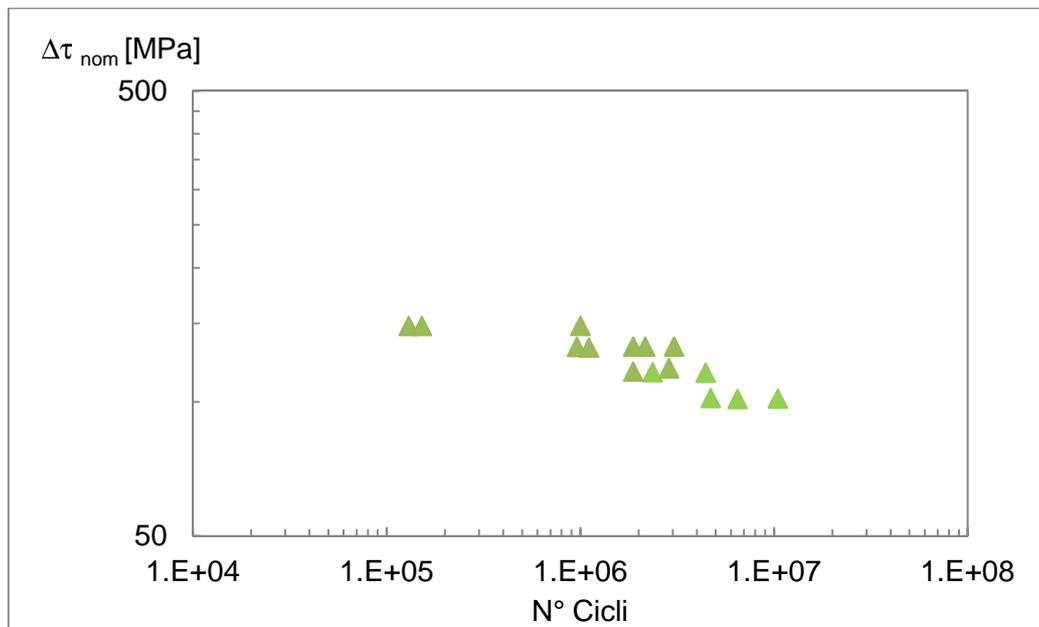


Figura 3.32: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

Si riassumono i risultati ricavati dalla letteratura, relativi alla geometria con cordone di saldatura di lato 8.8 mm, nella seguente tabella:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	295.54	162252	Radice
	296.96	234801	Radice
	207.07	438569	Radice
	214.16	556190	Radice
	181.87	934761	Radice
	150.78	2663653	Radice
	126.82	3992766	Radice
	87.58	19121795	Radice
	88.01	56939548	Radice
	149.33	10697920	Non rotto

Tabella 3.11: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame e prendendo in considerazione un cordone di saldatura di lato 8.8 mm (da [13]).

Anche in questo caso non si tiene conto dell'unico risultato che non è giunto a rottura.

Si raccolgono i risultati in un diagramma:

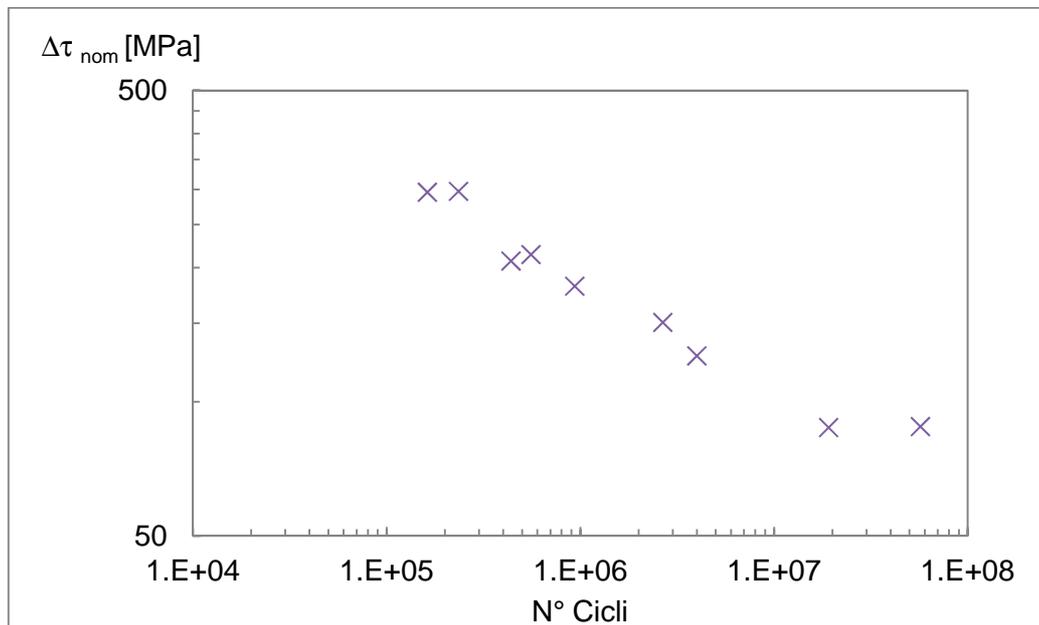


Figura 3.33: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

3.6.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

In questo caso si sta analizzando un giunto saldato a cordone d'angolo, perciò è teoricamente possibile che la giunzione ceda a causa di una cricca che parte dal piede oppure dalla radice del cordone di saldatura. Nel caso in esame si è però ricavato sperimentalmente che i cedimenti avvengono unicamente a causa di cricche che si propagano dalla radice del cordone, perciò s'intende analizzare solamente quest'ultima eventualità.

Valgono anche in questo caso le considerazioni svolte nel paragrafo 3.5.2 riguardo alle semplificazioni adottate sulla flangia di fissaggio e sulla modellazione della metà del provino.

Per la creazione della mesh NSIF si è sempre tenuto fede all'obiettivo di ricerca della minima dimensione d'elemento analizzabile tramite Ansys®, localizzando i refine alla radice del cordone.

Si riporta un esempio di mesh utilizzata nel caso NSIF:

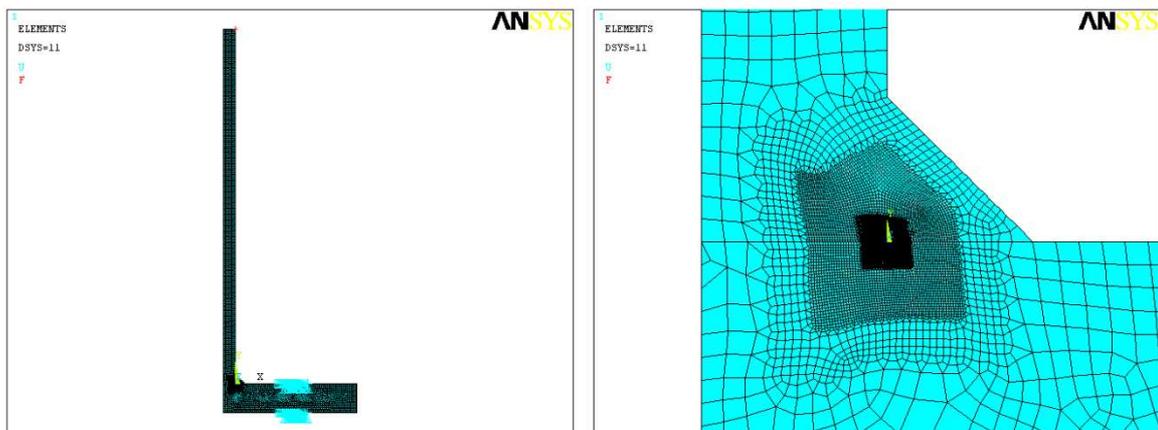


Figura 3.34: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

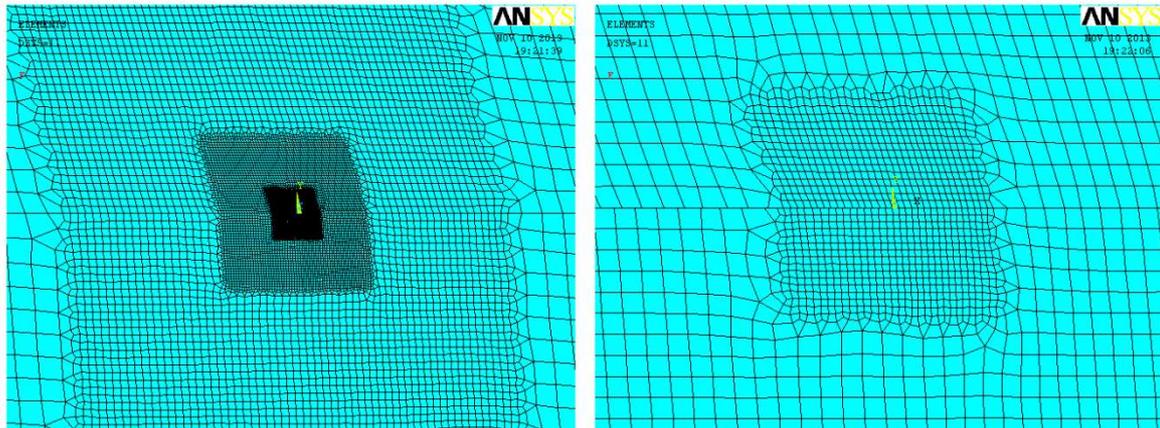


Figura 3.35: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $2 \cdot 10^{-4}$ mm.

Le condizioni al contorno applicate sono le medesime descritte nel paragrafo dedicato alle analisi effettuate sulla geometria di Sonsino.

Per il PSM valgono tutte le considerazioni già menzionate, fatta eccezione che in questo caso di analisi alla radice è necessario, per una corretta applicazione del PSM, che il layout della mesh all'apice dell'intaglio sia tale da condividere l'apice stesso con quattro elementi; questa necessità è dettata dal fatto che la radice viene analizzata come un intaglio con angolo d'apertura nullo. Nel caso di applicazione del PSM si ha per esempio:

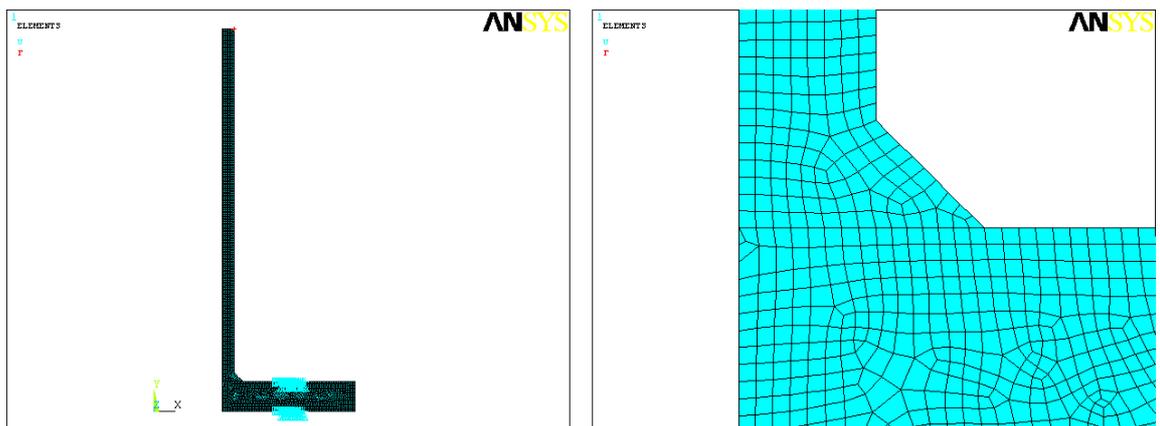


Figura 3.36: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Per questa geometria sono state analizzate due diverse dimensioni del lato del cordone di saldatura, come indicato in figura 3.31; nel caso di cordone di saldatura con lato di 6.3 mm si ha dall'analisi NSIF:

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	2.565
$x^* [mm]$	0.532

Tabella 3.12: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente, per una dimensione del cordone di saldatura pari a 6.3 mm. Entrambi i valori sono stati ricavati seguendo le linee guida descritte in precedenza.

Nel caso invece di cordone con lato da 8.8 mm si ottiene:

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	1.992
$x^* [mm]$	0.526

Tabella 3.13: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente, per una dimensione del cordone di saldatura pari a 8.8 mm. Entrambi i valori sono stati ricavati seguendo le linee guida descritte in precedenza.

In entrambi i casi si osserva una diminuzione del valore di $\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ rispetto alle analisi effettuate al piede del cordone di saldatura; analogamente anche x^* , in entrambi i casi, presenta un valore molto inferiore rispetto al caso del piede del cordone, indicando che alla radice dello stesso l'estensione del campo locale di tensione è inferiore rispetto alla medesima valutata al piede.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM nel caso di cordone di lato 6.3 mm:

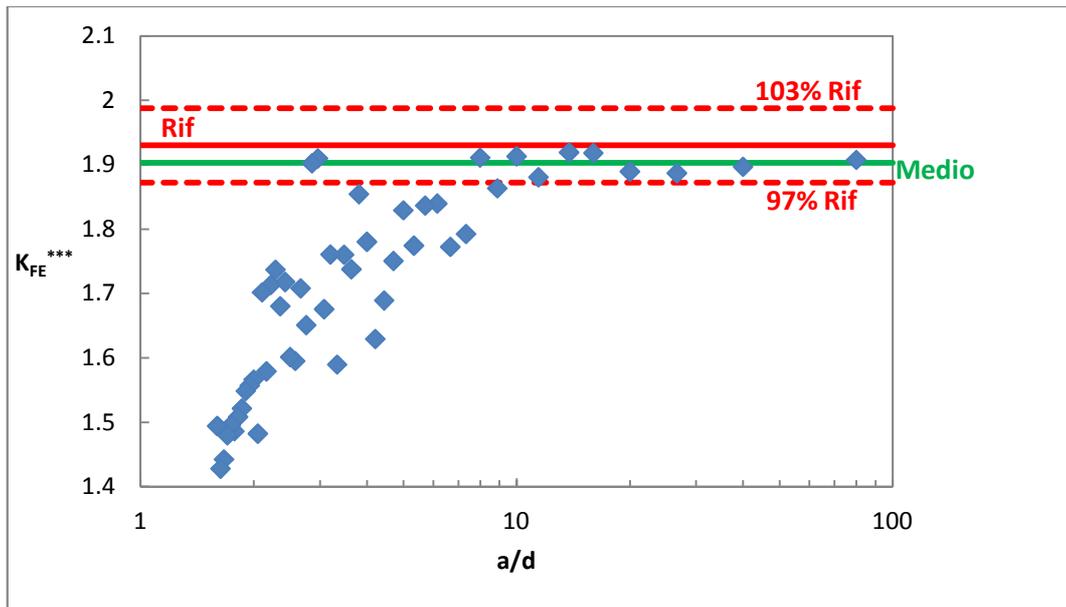


Figura 3.37: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 12$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

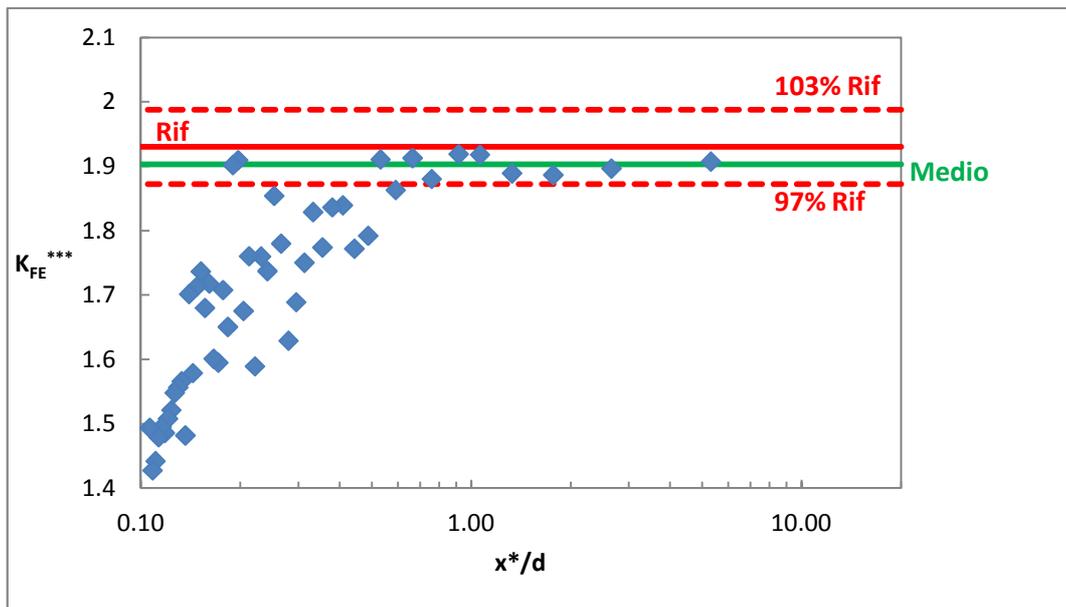


Figura 3.38: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM nel caso di cordone di lato 8.8 mm:

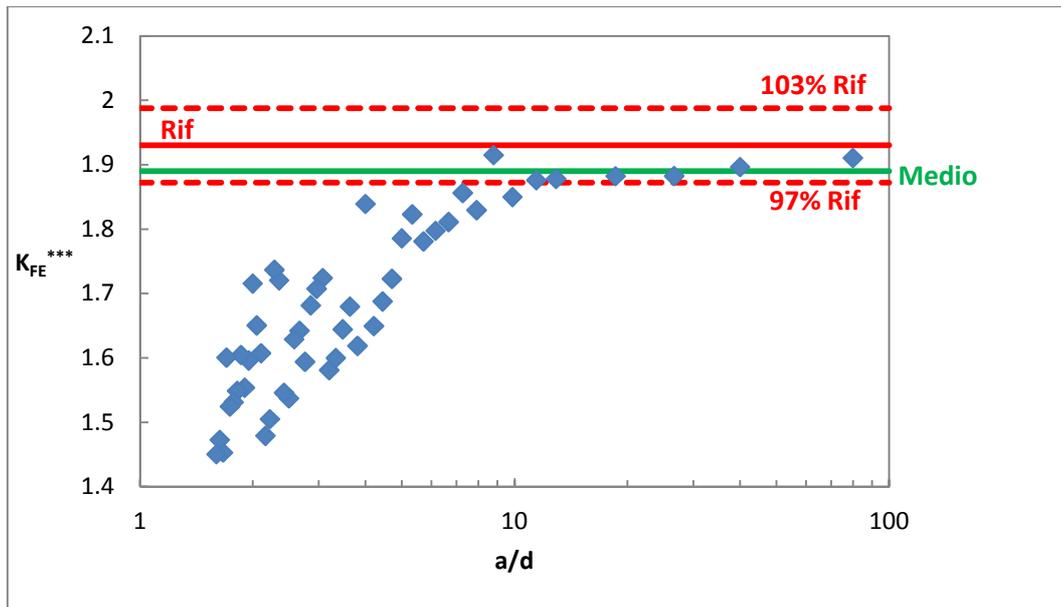


Figura 3.39: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 12$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

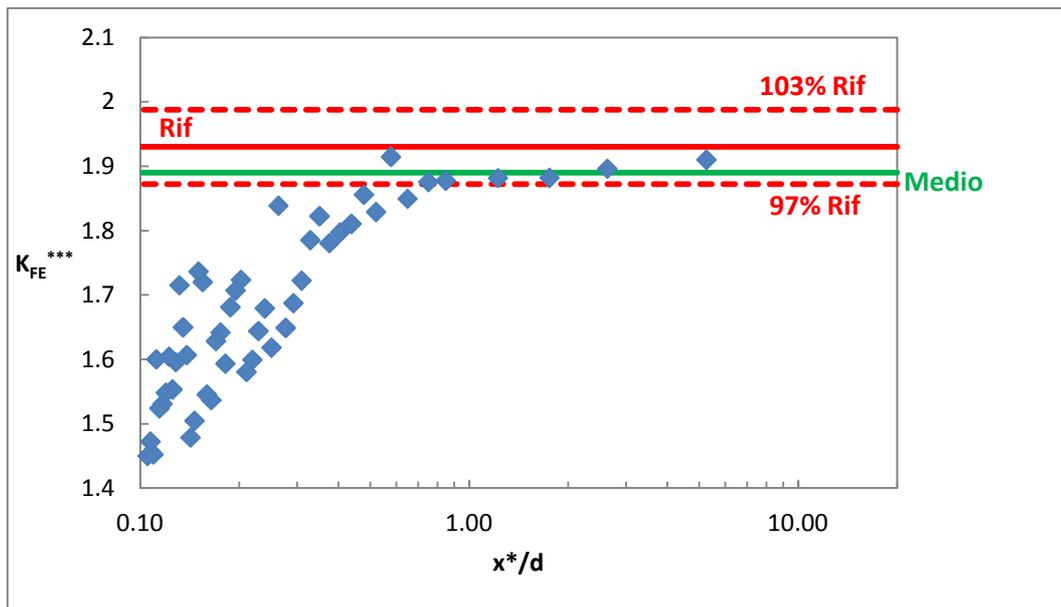


Figura 3.40: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato nel primo caso, cioè quello con cordone di saldatura di lato 6.3 mm, è di 1.903, mentre nel secondo si ottiene un 1.89; in entrambi si osserva che i valori medi convergono a livelli inferiori rispetto a quelli ottenuti per le analisi al piede del

cordone di saldatura delle altre geometrie, pur rimanendo all'interno della banda del 3 % rispetto al valore suggerito in letteratura, che è pari a 1.93 [4].

L'utilizzo della seconda definizione, cioè quella in x^*/d , per diagrammare il K_{FE}^{***} non comporta significativi miglioramenti rispetto alla definizione classica, come già osservato e discusso nei casi precedenti. In questo caso particolare il limite di convergenza, considerata la peggiore delle due geometrie, è leggermente superiore a 11 nel caso di a/d ; se confrontato col valore suggerito in letteratura pari a 12 si nota una buona correlazione. Nel caso di x^*/d , sempre considerando la peggiore tra le due geometrie analizzate, si osserva che il metodo converge per valori maggiori di 0.8 circa. Tenendo conto di entrambi gli approcci di convergenza utilizzati si osserva che il metodo PSM nel caso d'analisi alla radice del cordone di saldatura si rivela più esigente in termini di fittezza della mesh per assicurare la convergenza rispetto a quanto richiesto nel caso d'analisi al piede del cordone.

3.7 - Yung and Lawrence

3.7.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

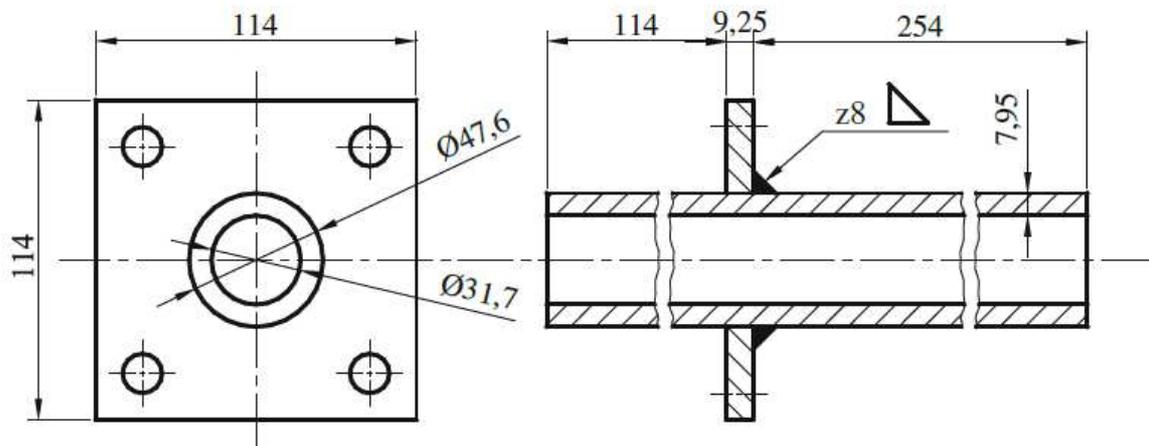


Figura 3.41: Geometria del giunto analizzata da Yung e Lawrence (tratta da[4]; articolo originale [14]).

Si riassumono i risultati ricavati dalla letteratura nella seguente tabella:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	280.00	466860	Tubo
	240.00	827560	Tubo

Tabella 3.14: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame (da [14]).

Entrambi i casi riportati nella tabella soprastante evidenziano una rottura a partire dal materiale base e non dal piede o dalla radice del cordone di saldatura; i due dati non sono quindi collegati ad una rottura dovuta a presenza d'intaglio e perciò non sono presi in considerazione per gli scopi di questo elaborato.

3.7.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

Anche in questo caso si sta analizzando un giunto saldato a cordone d'angolo, perciò è teoricamente possibile che la giunzione ceda o a partire dal piede oppure dalla radice del cordone di saldatura. Nel caso in esame si è ricavato sperimentalmente che i cedimenti sono causati da una cricca che innesca sul materiale base del tubo (tabella 3.14) e non in presenza degli intagli; si è quindi deciso di analizzare entrambe le eventualità di cricca che origina dal piede o dalla radice.

Valgono ancora le considerazioni svolte nel paragrafo 3.5.2 riguardo alla semplificazione adottata per modellare la flangia quadrata; inoltre si osserva che per la geometria in esame la flangia non è più posizionata sull'estremità del tubo, ma in una posizione intermedia dello stesso.

3.7.2.1 - Piede del cordone

Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

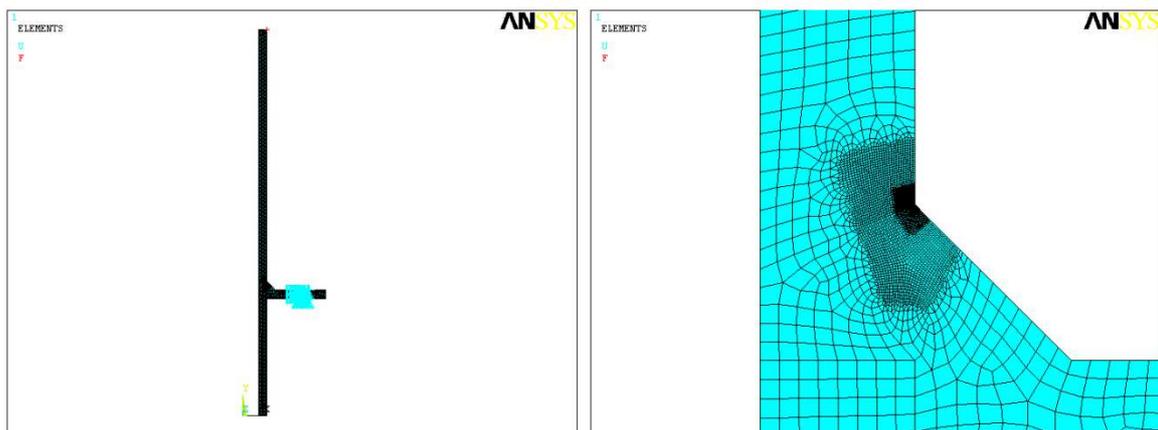


Figura 3.42: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

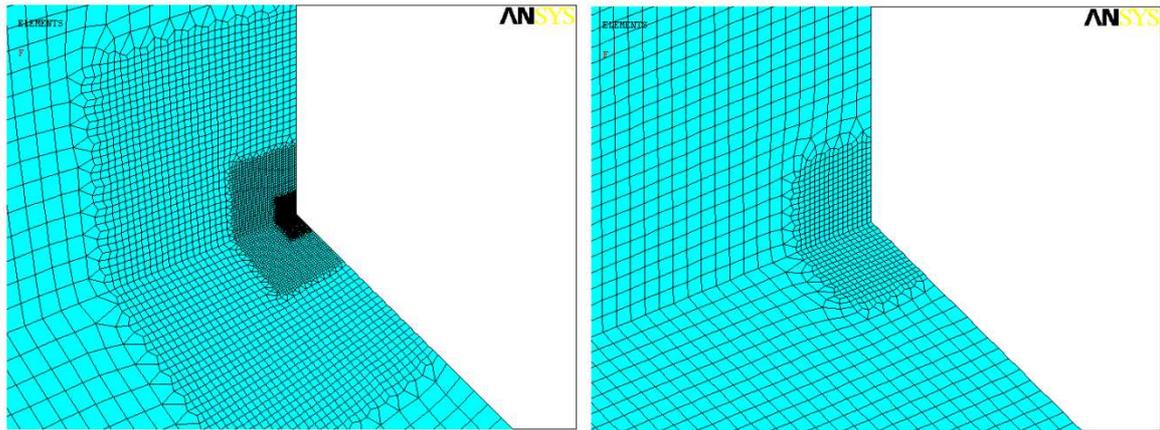


Figura 3.43: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Per il PSM valgono tutte le considerazioni già fatte e si ha quindi:

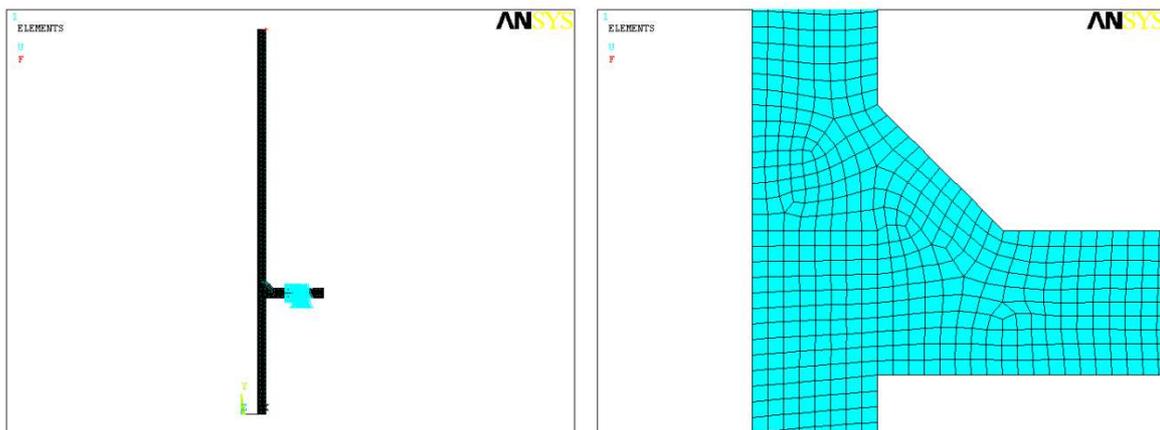


Figura 3.44: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

I vincoli utilizzati in questo caso sono i medesimi già illustrati.

Attraverso l'analisi NSIF si ottiene:

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	2.922
$x^* [mm]$	0.885

Tabella 3.15: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente seguendo le linee guida precedentemente descritte.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

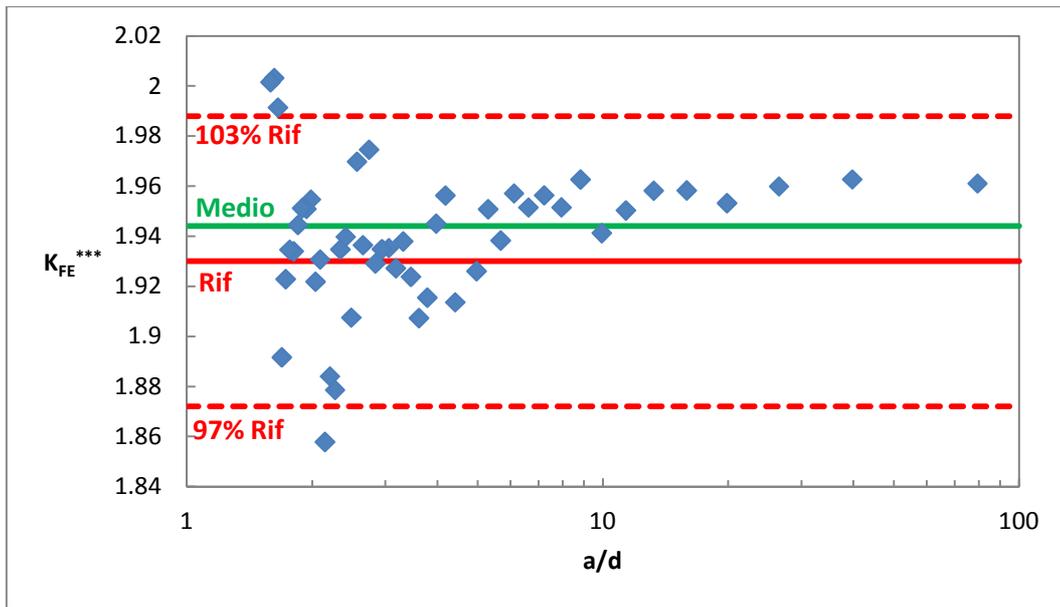


Figura 3.45: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 3$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

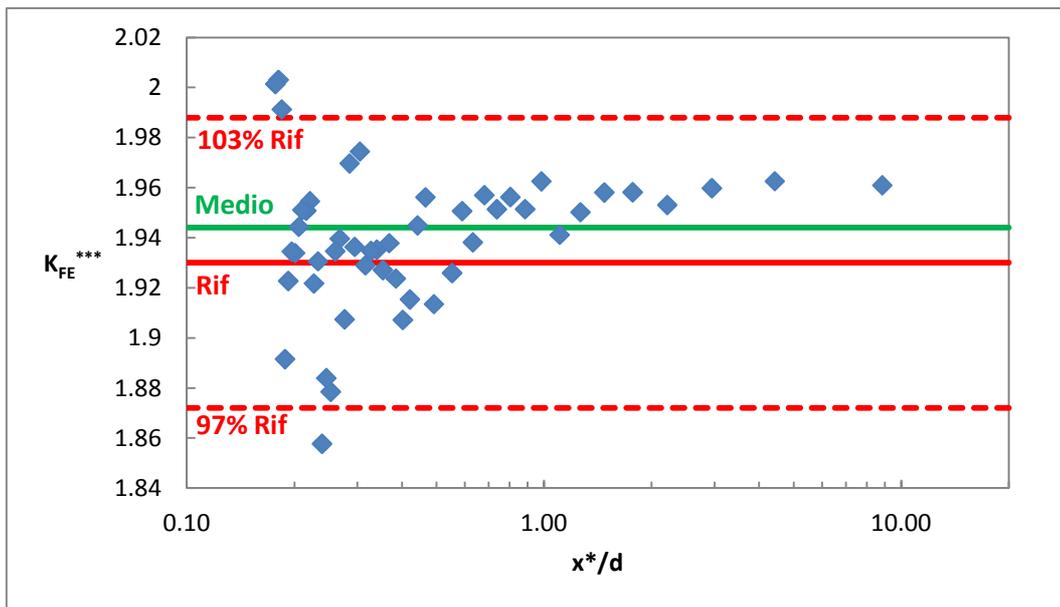


Figura 3.46: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è pari a 1.944 ed è contenuto all'interno della banda del 3% rispetto al valore suggerito in letteratura, che è pari a 1.93 [4].

Anche in questo caso entrambi i criteri di convergenza risultano validi e si osserva che, per assicurarla, è necessario un a/d di poco superiore a 2 e un x^*/d inferiore all'unità e pari a circa 0.3.

3.7.2.2 - Radice del cordone

Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

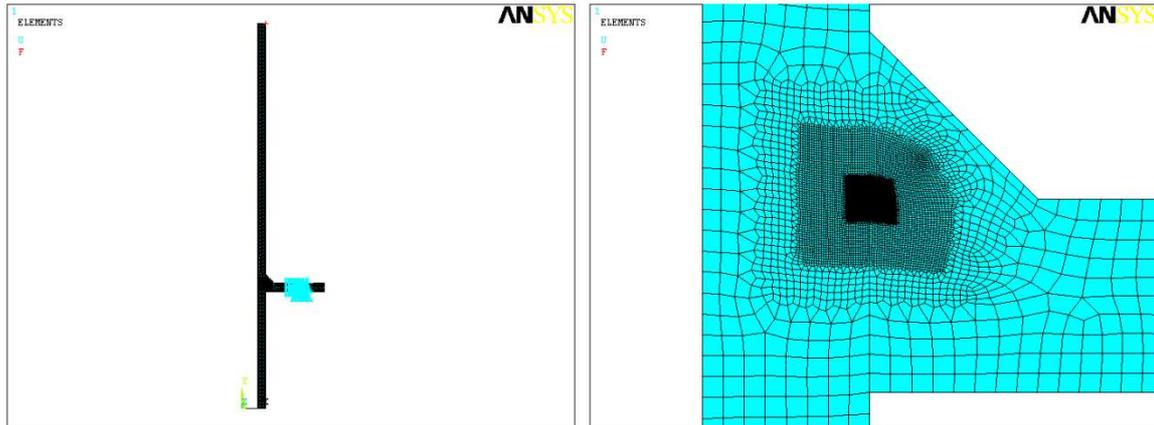


Figura 3.47: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

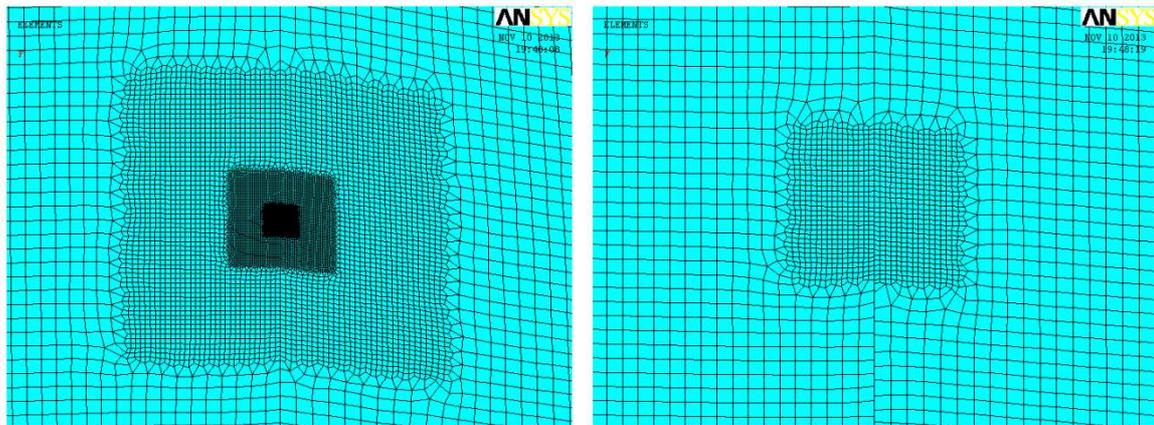


Figura 3.48: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $2 \cdot 10^{-4}$ mm.

Per il PSM valgono tutte le considerazioni già fatte e si ha quindi:

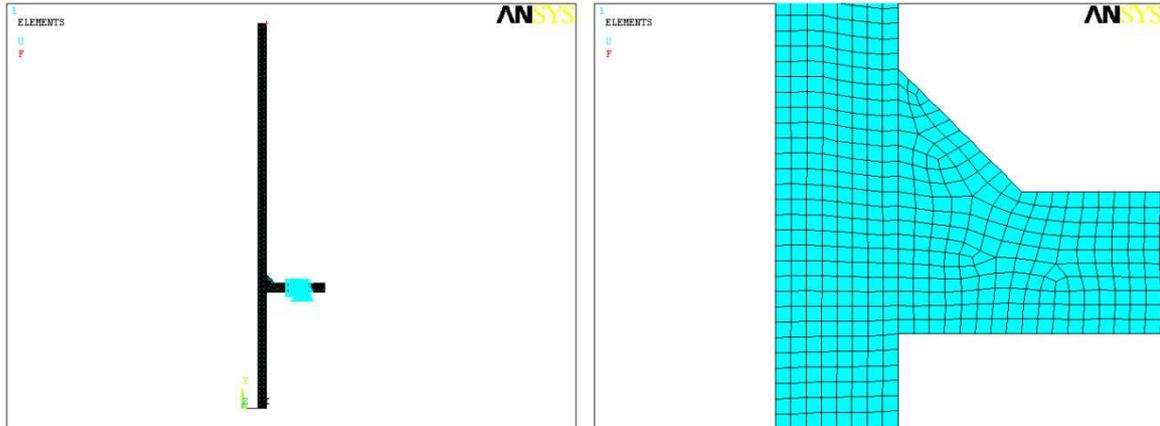


Figura 3.49: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Attraverso l'analisi NSIF si ottiene:

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	1.274
$x^* [mm]$	0.3581

Tabella 3.16: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente secondo le metodologie già descritte.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

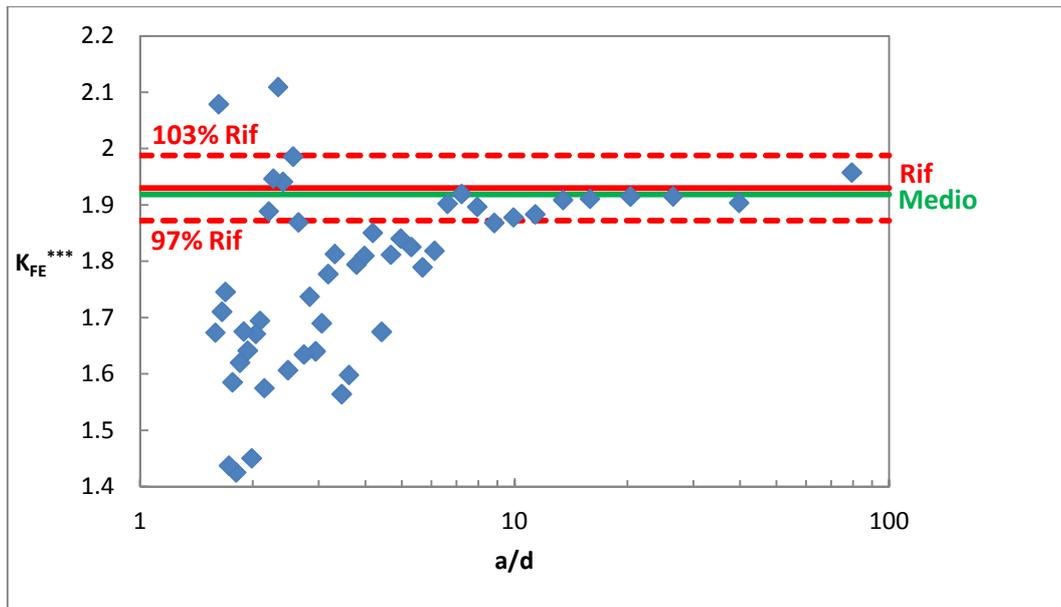


Figura 3.50: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 12$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

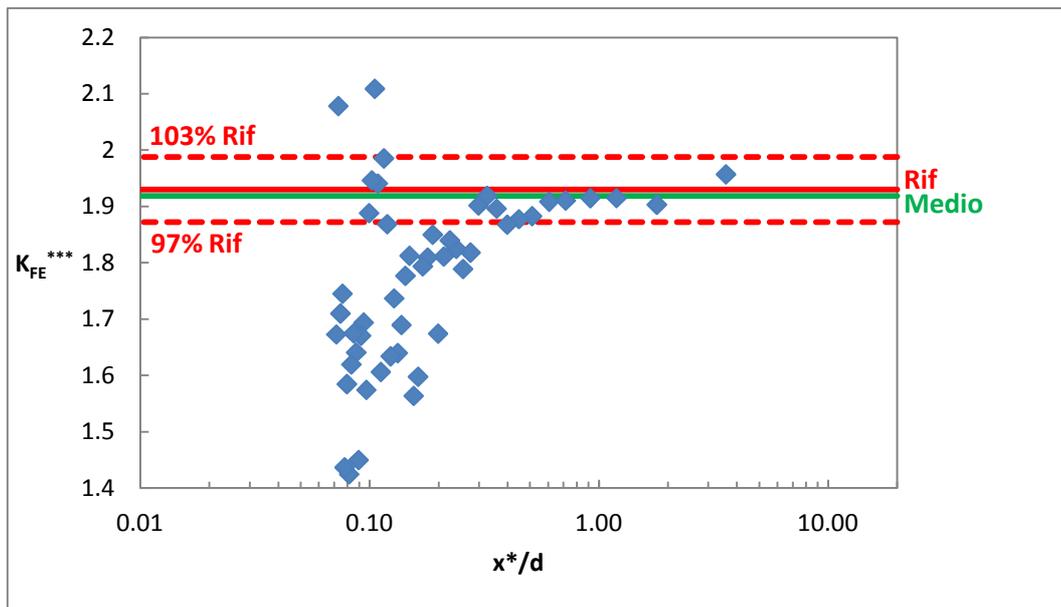


Figura 3.51: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è pari a 1.919 ed è contenuto all'interno della banda del 3% rispetto al valore suggerito in letteratura, che è pari a 1.93 [4].

Anche in questo caso entrambi i criteri di convergenza risultano validi e si osserva che, per assicurare quest'ultima, è necessario un a/d superiore a 10 circa e un x^*/d superiore a circa 0.5.

3.8 - Siljander et al.

3.8.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

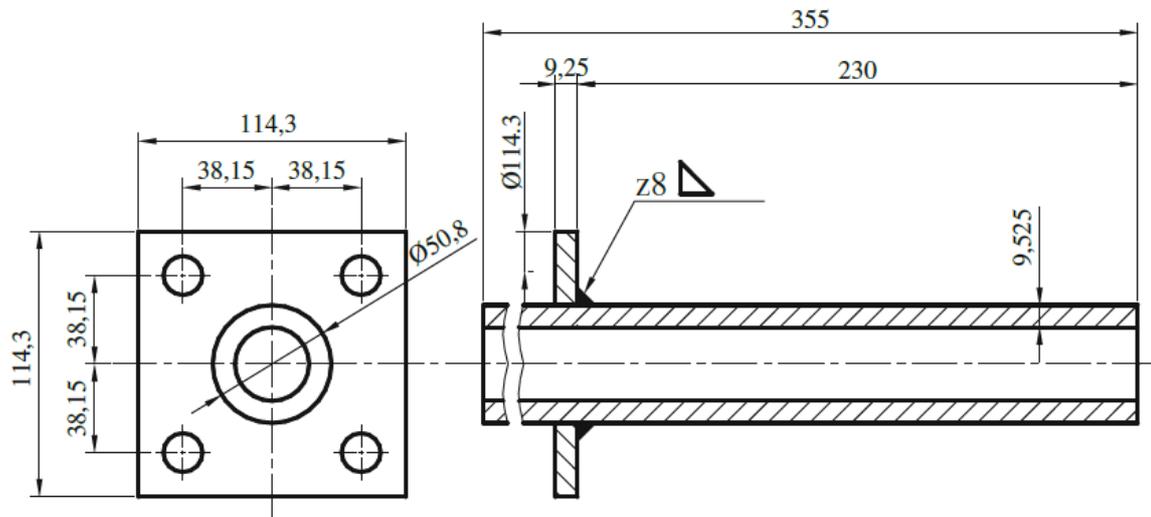


Figura 3.52: Geometria del giunto analizzata da Siljander e al. (tratta da[4]; articolo originale [15]).

Si riporta una tabella con i risultati ottenuti dalla letteratura:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=-1	140	1989000	Piede
	140	3303000	Piede
	220	132000	Piede
	170	1605000	Piede
R=0	220	374000	Piede
	170	919600	Piede

Tabella 3.17: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame (da [15]).

Si riporta inoltre un diagramma di riassunto dei risultati:

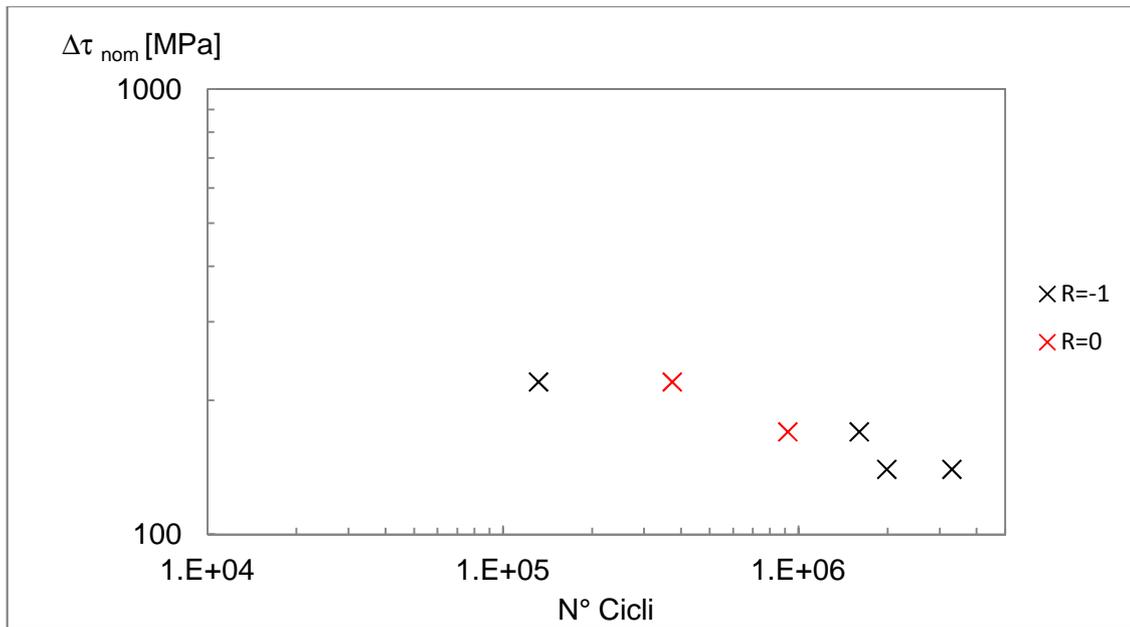


Figura 3.53: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

3.8.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

Anche per questa geometria si sta analizzando un cordone d'angolo, quindi è teoricamente possibile che la cricca inneschi sia dal piede che dalla radice del cordone di saldatura. Si osserva però sperimentalmente che in questo caso le rotture avvengono a causa di cricca che propaga dal piede (tabella 3.17); l'analisi si limiterà quindi a questa eventualità.

Valgono ancora le considerazioni svolte nel paragrafo 3.5.2 riguardo alla semplificazione adottata per modellare la flangia quadrata; inoltre si osserva che per la geometria in esame la flangia non è più posizionata sull'estremità del tubo, ma in una posizione intermedia dello stesso.

Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

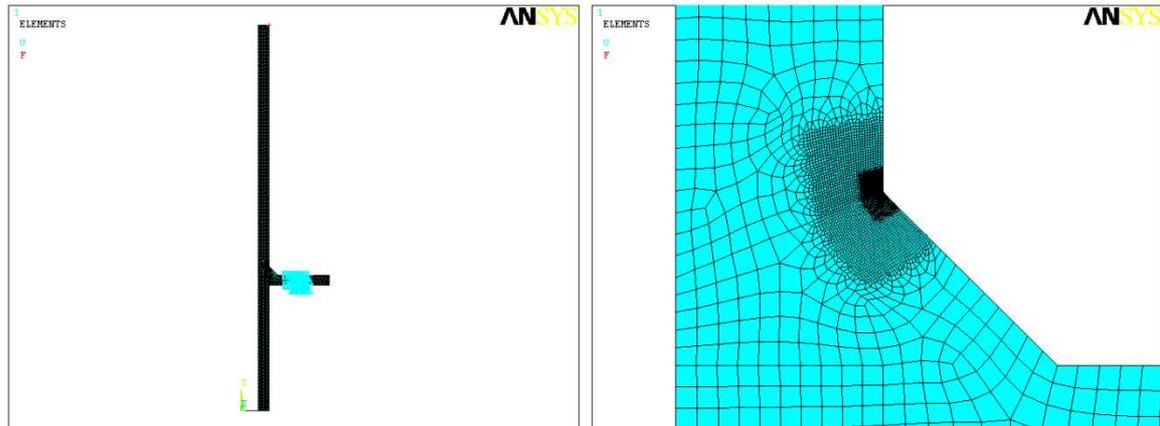


Figura 3.54: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

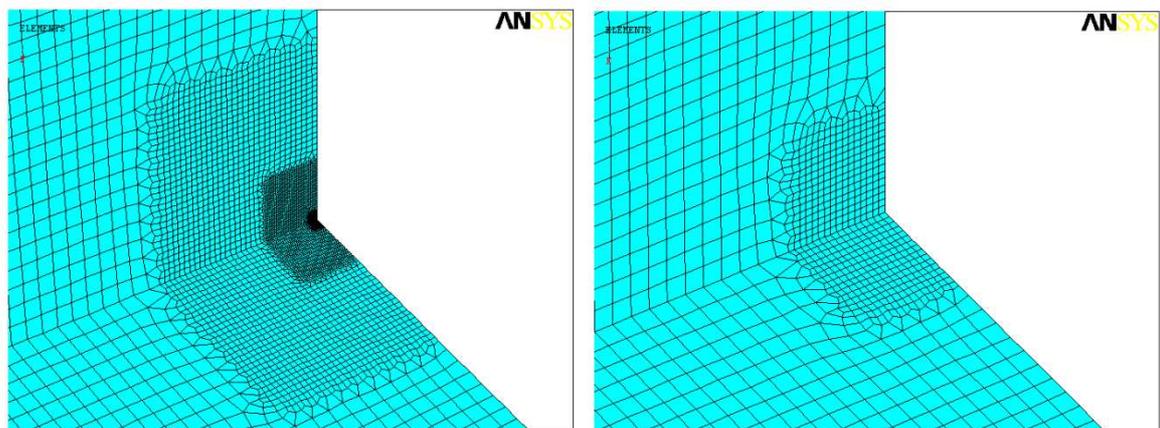


Figura 3.55: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $1.5 \cdot 10^{-3}$ mm.

Nel caso di applicazione del PSM si ha invece:

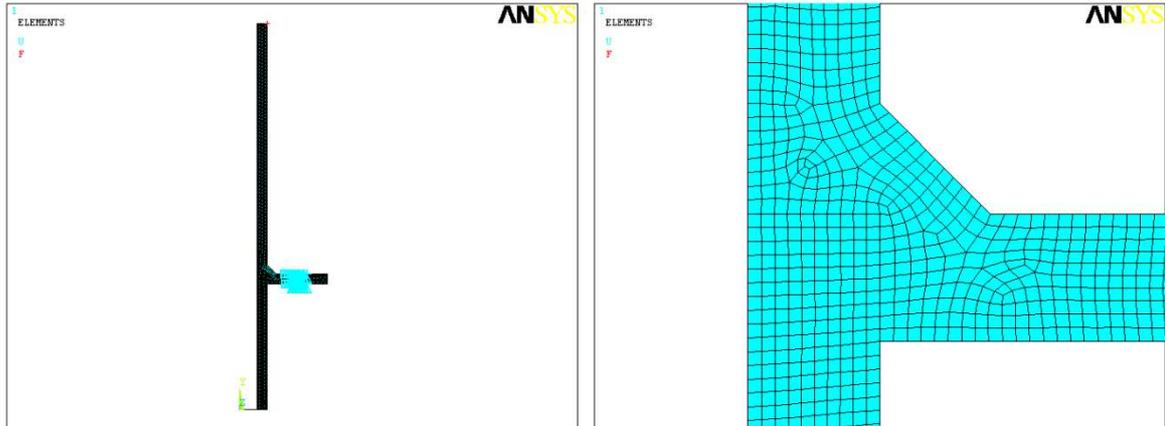


Figura 3.56: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Si riportano i risultati ottenuti in termini di NSIF e di estensione del campo locale di tensione in questo caso.

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	3.061
$x^* [mm]$	0.914

Tabella 3.18: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente seguendo le linee guida precedentemente descritte.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

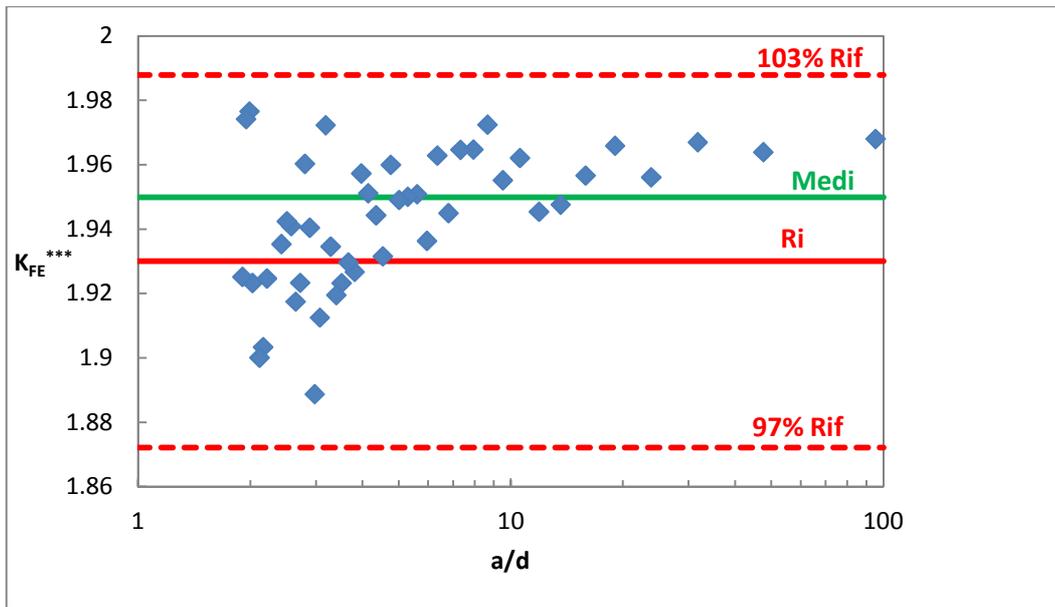


Figura 3.57: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 3$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

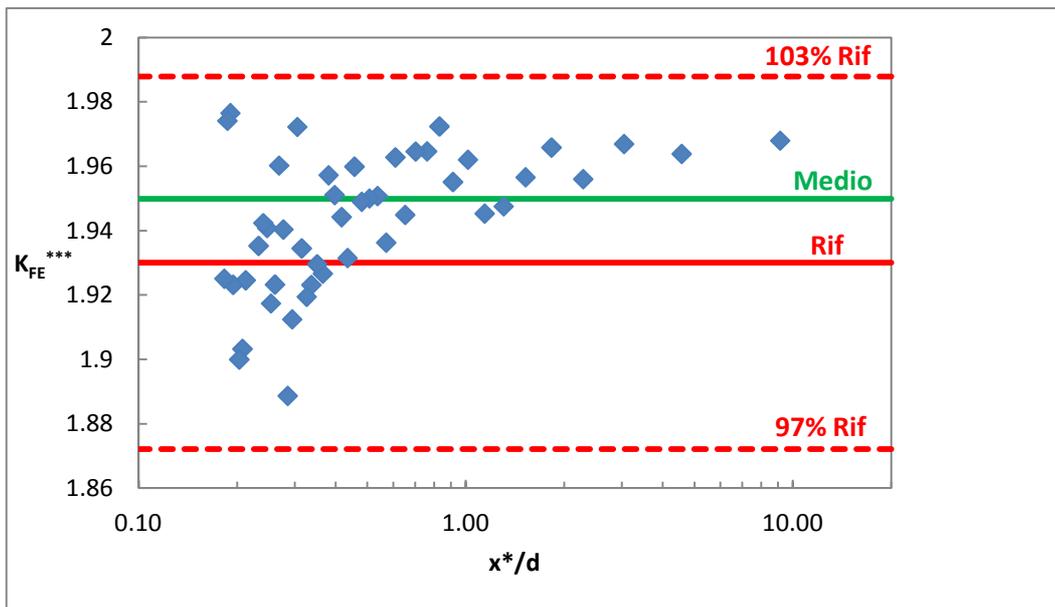


Figura 3.58: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è di 1.955, molto vicino al valore 1.93 proposto in letteratura [7] e contenuto all'interno della banda d'accettabilità del 3% rispetto a quest'ultimo.

Valgono ancora le considerazioni precedentemente svolte per quanto riguarda i criteri di convergenza; in questo caso non è possibile esprimersi sui limiti di convergenza della geometria poiché tutti i valori ricavati sono contenuti all'interno della banda di dispersione.

3.9 - Razmjoo

3.9.1 - Geometria e riassunto dei risultati ricavati in letteratura

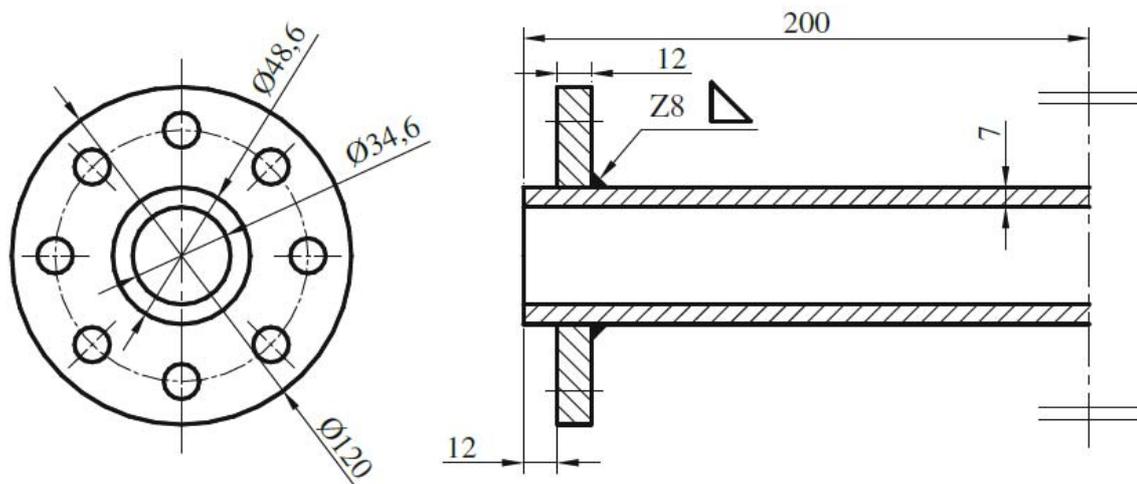


Figura 3.59: Geometria del giunto analizzata da Razmjoo (tratta da[4]; articolo originale [16]).

Si riporta una tabella con i risultati ottenuti dalla letteratura:

Rapporto di ciclo	$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	N° cicli	Innesco rottura
R=0	172.78	2.98E+06	Gola saldatura
	225.95	6.05E+05	Gola saldatura
	252.53	4.91E+05	Gola saldatura
	172.78	1.28E+06	Gola saldatura
	239.24	4.55E+05	Gola saldatura
	148.86	6.75E+06	Piede
	206.01	1.80E+06	Gola saldatura
	225.95	8.40E+05	Piede

Tabella 3.19: Riassunto dei risultati in termini di resistenza a fatica per la geometria in esame (da [16]).

In questo caso sono tenuti in considerazione i due risultati relativi alla rottura al piede della saldatura (evidenziati in grassetto) e non quelli alla gola della stessa.

Si riporta inoltre un diagramma di riassunto dei risultati:

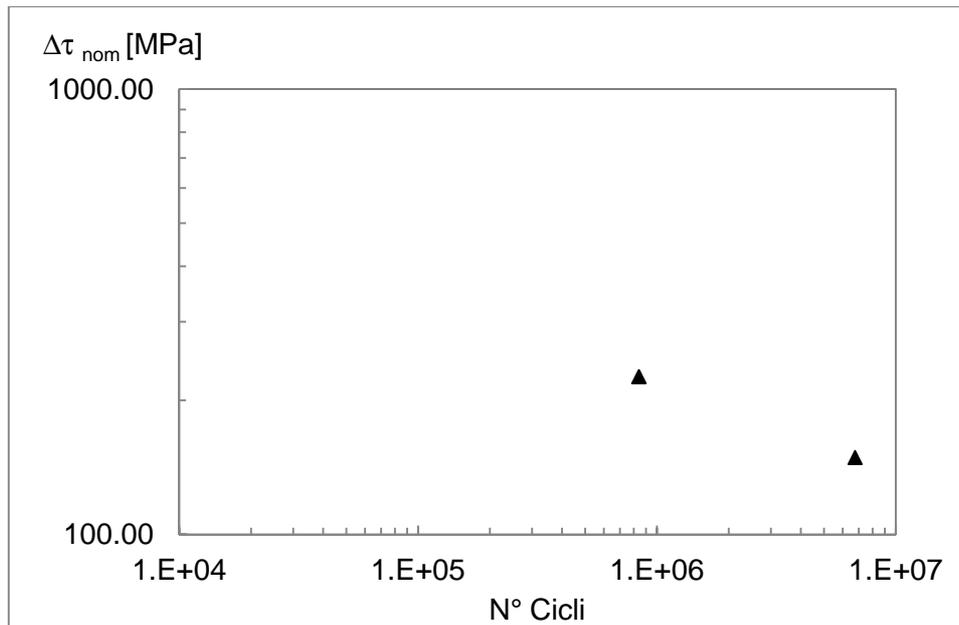


Figura 3.60: Riassunto dei risultati delle prove a fatica a torsione sulla geometria in esame espressi in termini di range di tensione τ nominale applicata al tubo in funzione del numero di cicli.

3.9.2 - Analisi NSIF e PSM del provino

Anche in questo caso si sta analizzando un giunto saldato a cordone d'angolo, perciò è teoricamente possibile che la giunzione ceda a partire dal piede oppure dalla radice del cordone di saldatura. Nel caso in esame si è ricavato sperimentalmente che i cedimenti avvengono a causa di cricca che si propaga dal piede del cordone e dalla gola dello stesso; si è quindi deciso di studiare sia il piede che la radice.

Anche in questo caso la flangia non è più posizionata sull'estremità del tubo, ma in una posizione intermedia dello stesso.

3.9.2.1 - Piede del cordone

Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

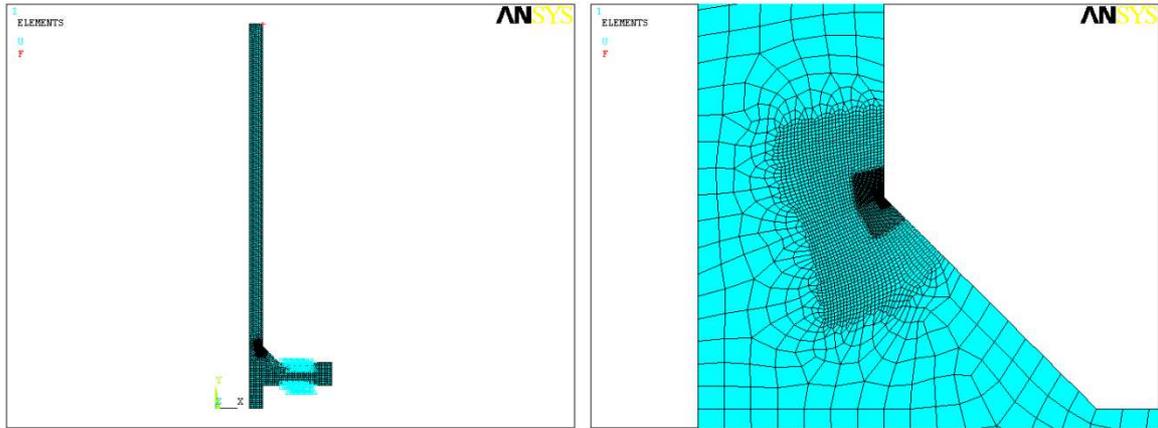


Figura 3.61: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

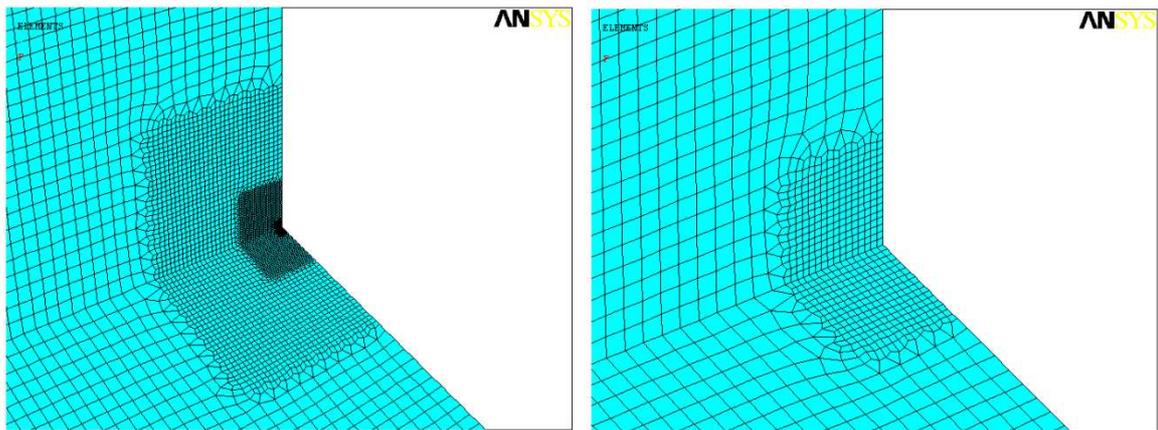


Figura 3.62: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $1.5 \cdot 10^{-3}$ mm.

Per il PSM valgono tutte le considerazioni già fatte e si ha quindi:

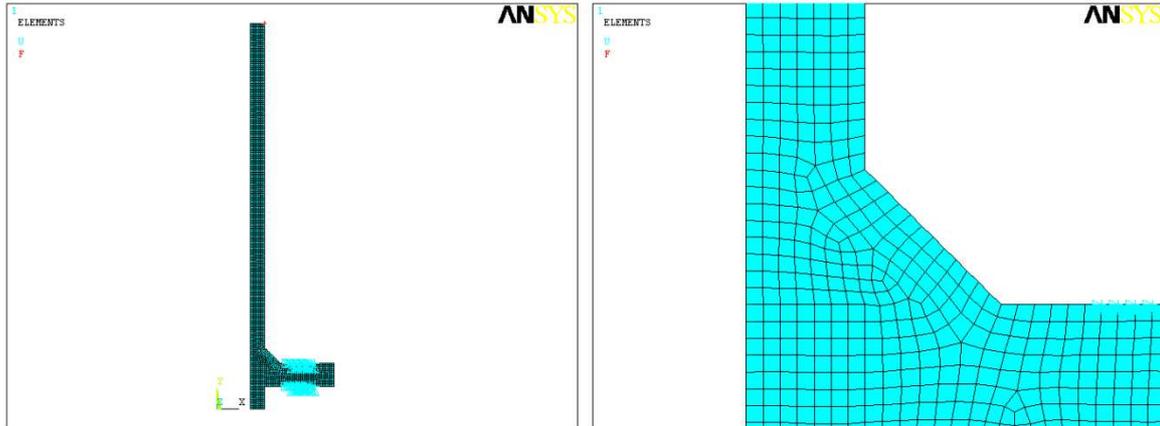


Figura 3.63: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Attraverso l'analisi NSIF si ottiene:

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	2.85
$x^* [mm]$	0.897

Tabella 3.20: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente seguendo le linee guida precedentemente descritte.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

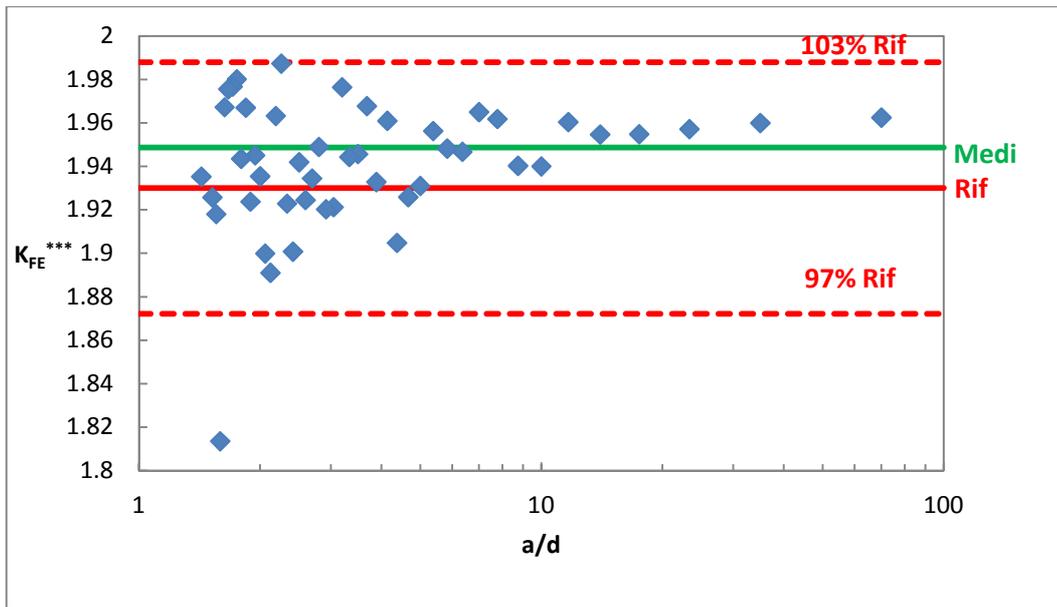


Figura 3.64: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 3$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

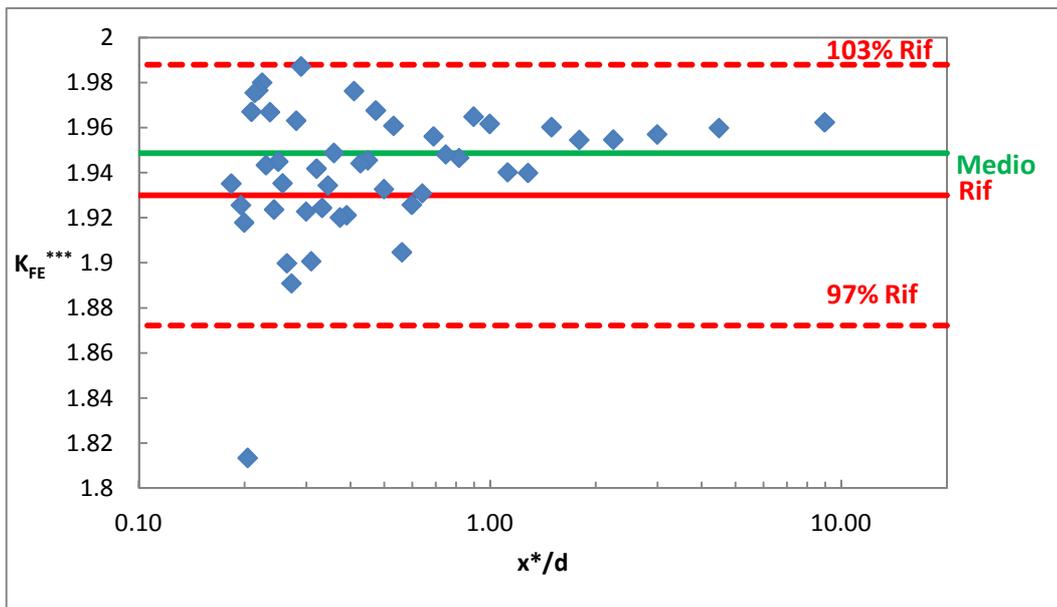


Figura 3.65: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è pari a 1.944 ed è contenuto all'interno della banda del 3% rispetto al valore suggerito in letteratura, che è pari a 1.93 [4].

Anche in questo caso entrambi i criteri di convergenza risultano validi e si osserva che, per assicurare quest'ultima, è necessario un a/d circa superiore a 2.5 e un x^*/d inferiore all'unità e pari a circa 0.4.

3.9.2.2 - Radice del cordone

Si riporta la mesh utilizzata nel caso NSIF:

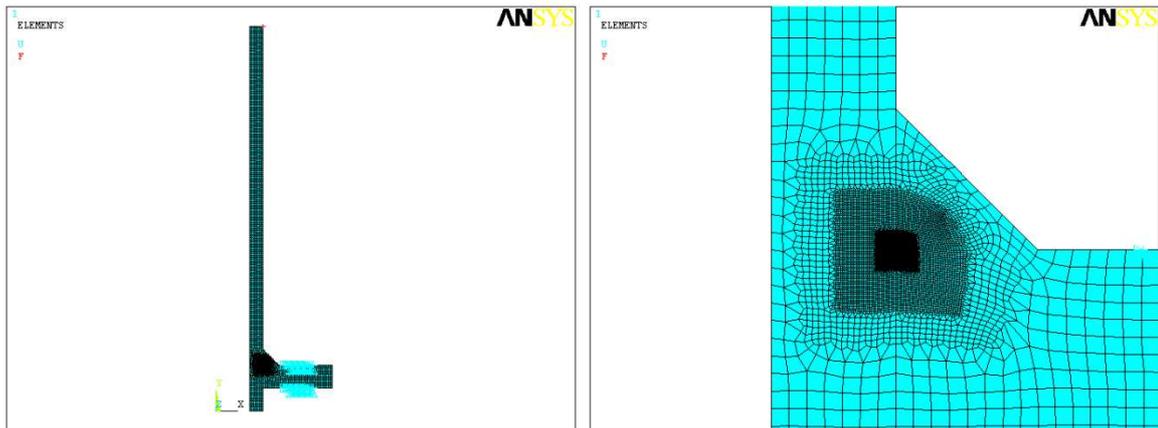


Figura 3.66: Mesh utilizzata per l'analisi NSIF e relativo ingrandimento.

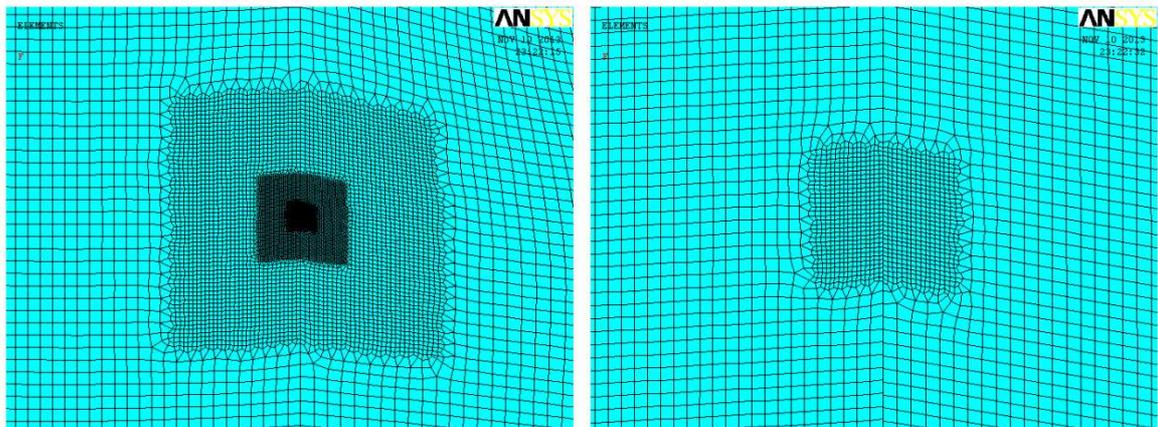


Figura 3.67: Ingrandimento della mesh utilizzata per l'analisi NSIF; gli elementi più piccoli visibili nell'immagine a destra hanno dimensione pari a circa $5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Per il PSM valgono tutte le considerazioni già fatte e si ha quindi:

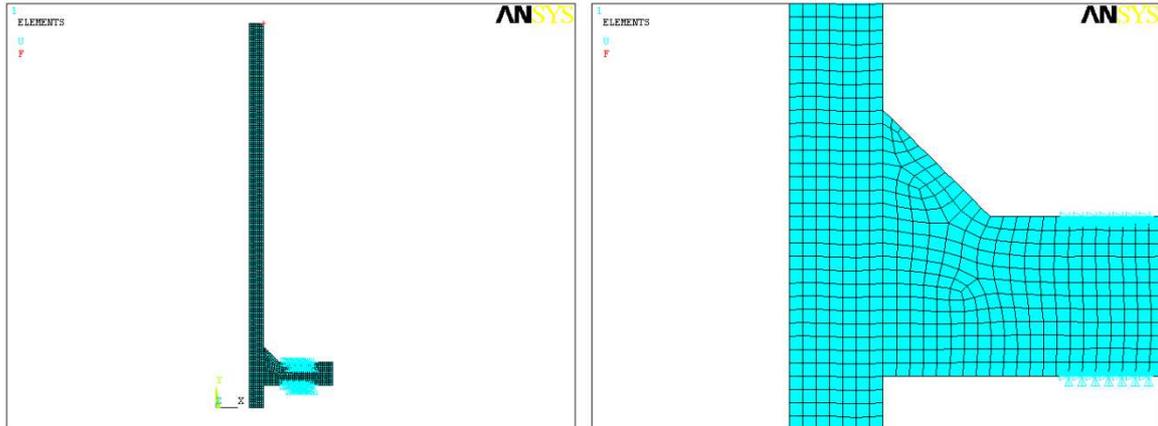


Figura 3.68: Mesh utilizzata per l'analisi PSM.

Attraverso l'analisi NSIF si ottiene:

$\frac{K_3}{\tau_{nom}} [mm^{0.2}]$	1.186
$x^* [mm]$	0.372

Tabella 3.21: Calcolo dei valori di NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione, entrambi ricavati numericamente seguendo le linee guida già discusse in precedenza.

Si riportano i risultati ottenuti dal PSM:

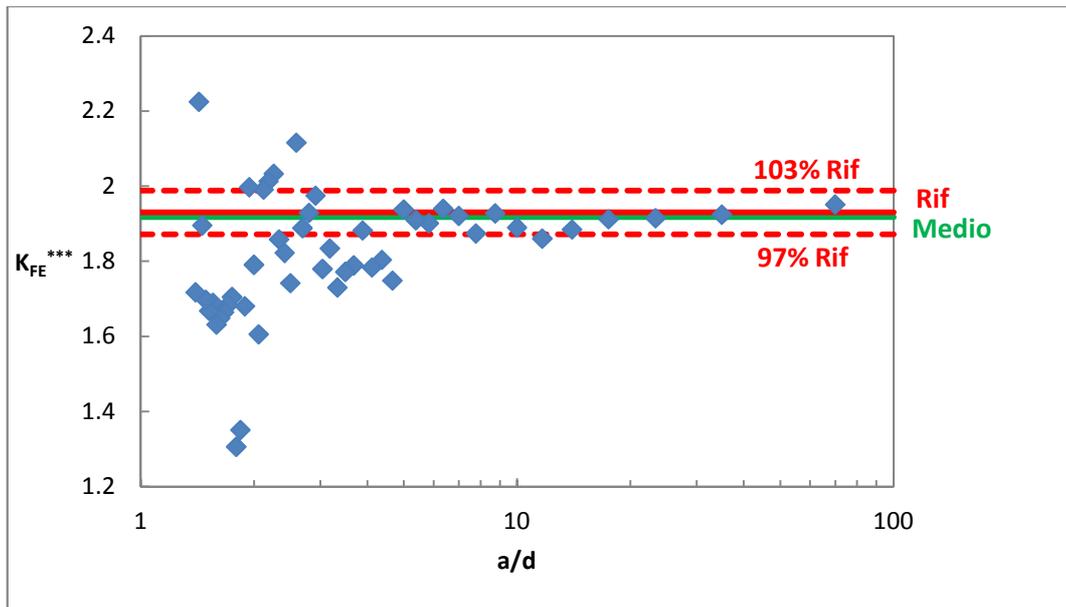


Figura 3.69: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di a/d . Il valore medio è stato ottenuto mediando tutti i valori per il quale si aveva $a/d \geq 12$, valore utilizzato in letteratura [4] per delimitare la convergenza del metodo. Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

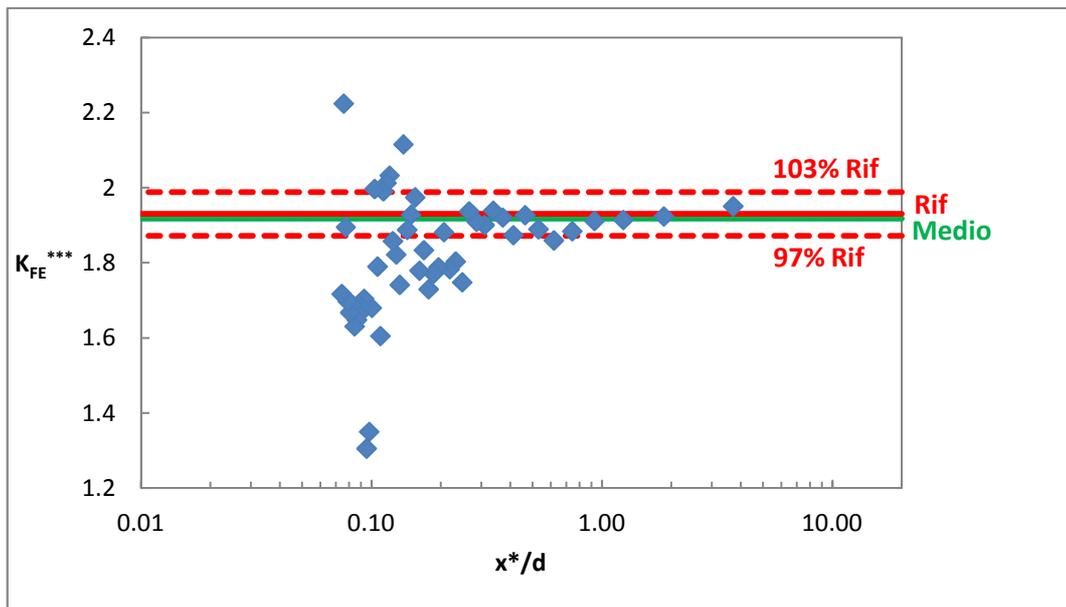


Figura 3.70: Risultati ottenuti in termini di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d . Il valore medio assunto è uguale a quello utilizzato nel caso di analisi in funzione di a/d (vedere figura precedente). Il valore di riferimento è 1.93 e la banda riportata è del 3%.

Il K_{FE}^{***} numerico medio calcolato è pari a 1.917 ed è contenuto all'interno della banda del 3% rispetto al valore suggerito in letteratura, che è pari a 1.93 [4].

Anche in questo caso entrambi i criteri di convergenza risultano validi e si osserva che, per assicurare quest'ultima, è necessario un a/d circa pari a 12 e un x^*/d di poco inferiore all'unità.

3.10 - Riassunto dei risultati in letteratura in termini di K_{FE}^{*}**

In questo paragrafo s'intende quindi riportare un diagramma di riassunto di tutti i risultati ricavati per le singole geometrie proposte in letteratura.

In termini di a/d si ottiene il grafico riportato nella pagina successiva dove si è diagrammato con una linea rossa continua il valore medio ricavato dalla letteratura [4] e con delle linee rosse tratteggiate la banda di dispersione dei risultati del 3% attorno al valore medio suddetto; si è deciso di dedicare un'intera pagina per la rappresentazione del grafico per una migliore lettura dei risultati.

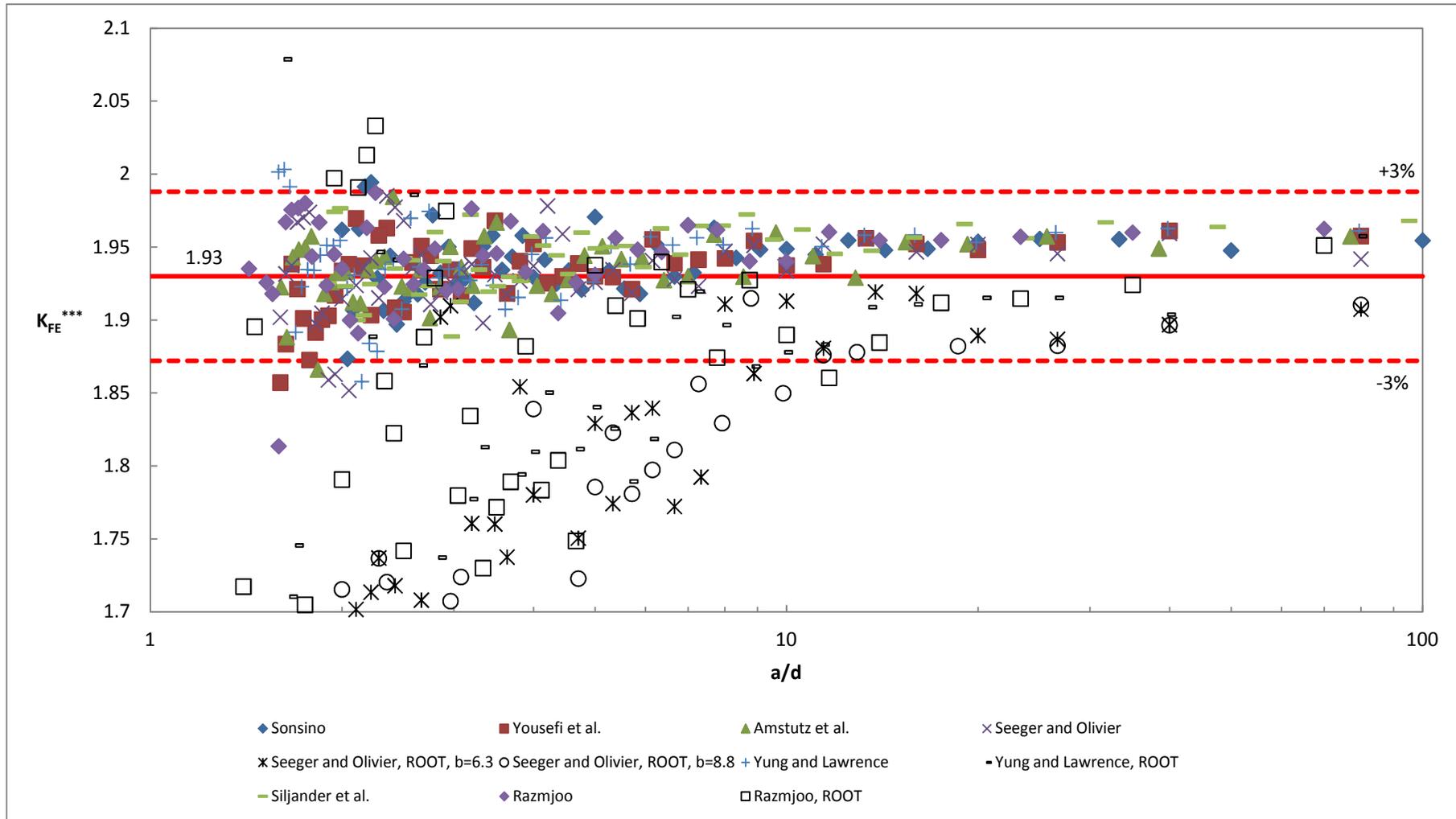


Figura 3.71: Riassunto dei risultati ottenuti dall'analisi dei provini in letteratura espressi come K_{FE}^{***} in funzione di a/d .

Si osserva quindi che, coerentemente con quanto ricavato in [4], il metodo del PSM per le analisi delle geometrie proposte in letteratura funziona correttamente poiché il K_{FE}^{***} , espresso in funzione di a/d , converge ad un valore costante che, mediando opportunamente, risulta pari a 1.93 (indicato con la retta rossa continua in figura 3.71). Adottando una banda di dispersione del 3% (indicata con le linee rosse tratteggiate in figura 3.71) si osserva che per la convergenza del metodo nel caso d'analisi al piede è necessario assicurare un $a/d \geq 3$, come si osserva dalla figura 3.71 nella quale tutti i simboli colorati sono riferiti al piede del cordone. Nel caso d'analisi alla radice invece bisogna garantire un $a/d \geq 12$ per la corretta convergenza del metodo; i punti relativi alla radice del cordone sono riportati in nero nel diagramma precedente.

In termini di x^*/d si ottiene il grafico riportato nella pagina successiva.

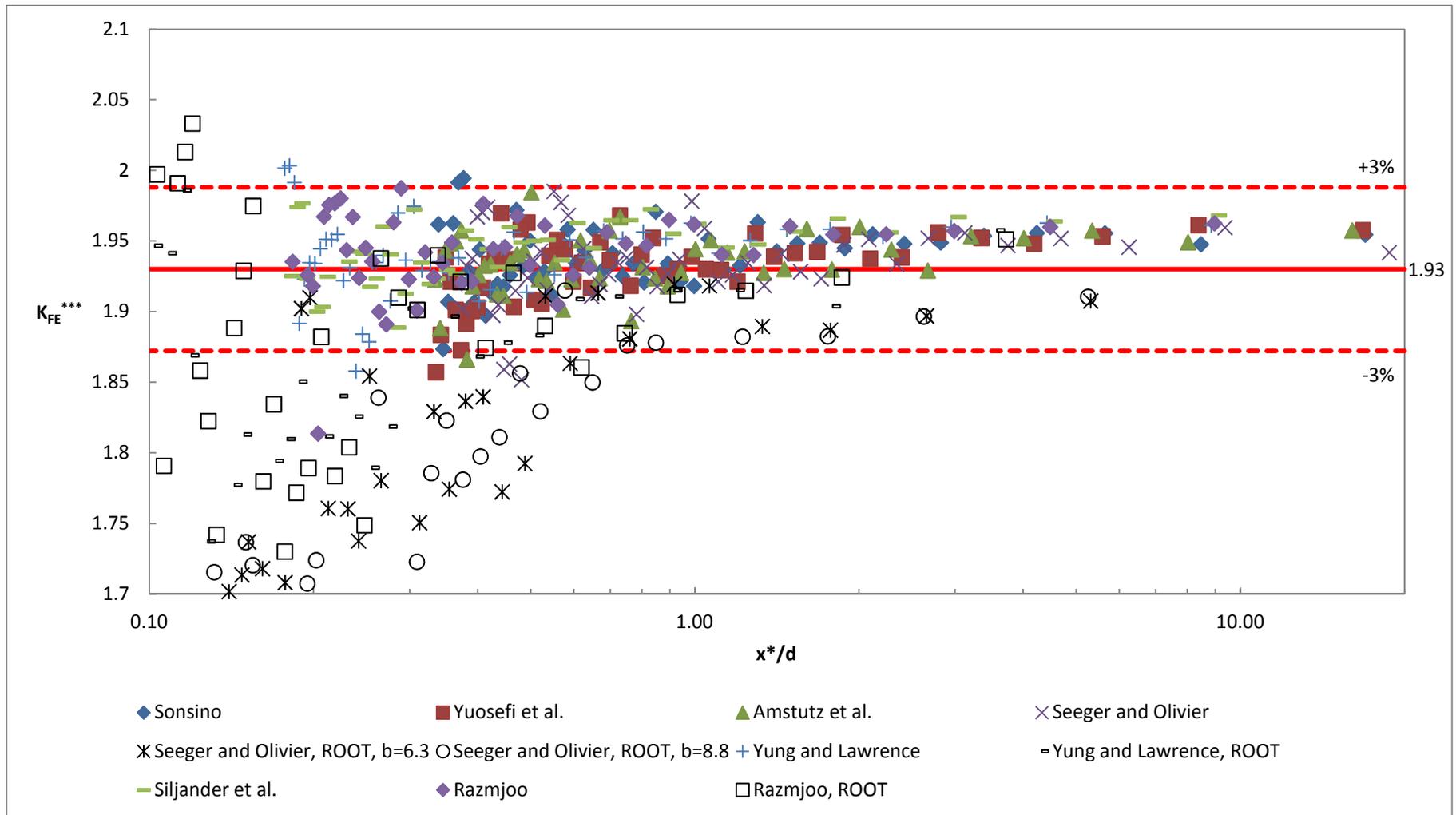


Figura 3.72: Riassunto dei risultati ottenuti dall'analisi dei provini in letteratura espressi come K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d .

Il valore medio di K_{FE}^{***} assunto in questo caso coincide con quello ricavato nel caso precedente d'analisi in funzione di a/d ; si osserva il corretto funzionamento anche di questo criterio poiché i valori a convergenza rientrano tutti nella banda del 3% rispetto a quello nominale.

In questo caso però variano i limiti di convergenza, poiché nel caso d'analisi al piede del cordone i valori entrano in banda per un $x^*/d \geq 0.6$, mentre per la radice è necessario un $x^*/d \geq 0.8$. Questo ribadisce ancora una volta che un'analisi PSM alla radice è più esigente in termini di fittezza della mesh rispetto ad una al piede; inoltre afferma che, in entrambi i casi, è sufficiente un solo elemento contenuto all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione per ottenere dei risultati coerenti dal metodo PSM.

3.11 - Risultati in termini di curve di resistenza a fatica

In questo paragrafo si vogliono riassumere i risultati ottenuti in termini di resistenza a fatica per le geometrie trattate in letteratura; si riportano quindi due diagrammi riassuntivi, uno dedicato al piede del cordone e uno alla radice, della resistenza a fatica delle geometrie suddette espressa in termini di range di tensione tangenziale nominale. Entrambi i diagrammi sono stati ricavati da [4].

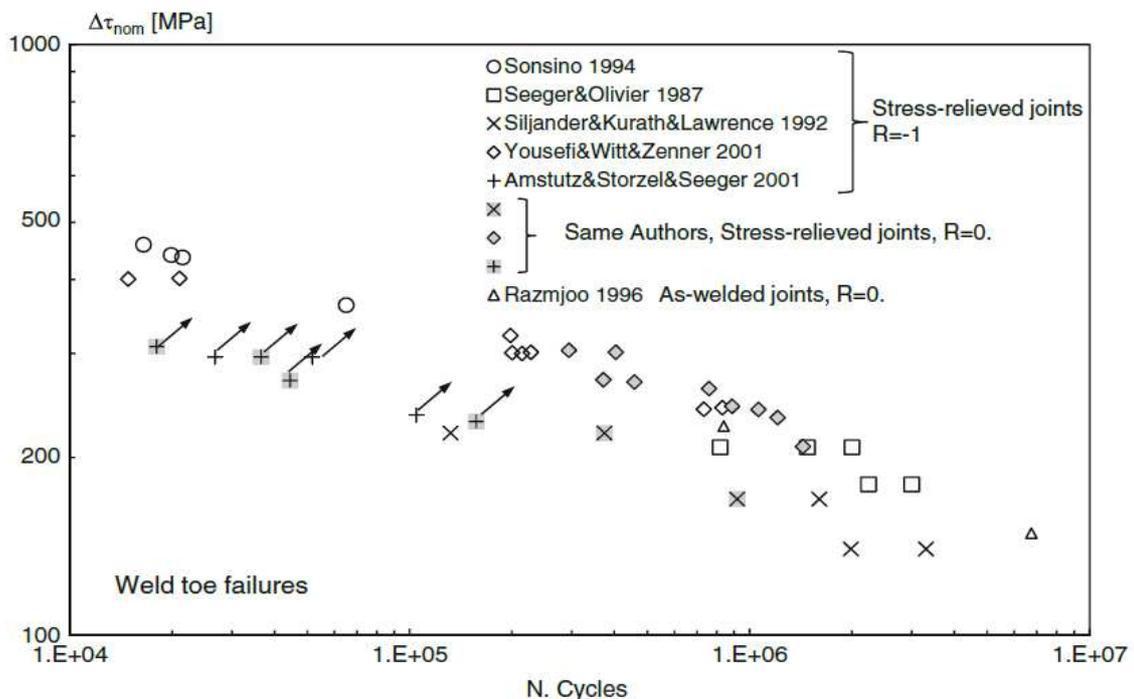


Figura 3.73: Risultati delle prove a torsione pura della letteratura; i risultati in termini di numero di cicli sono riferiti o all'instaurarsi di una cricca passante o alla perdita di rigidità. Alcuni dati sono indicati con una freccia poiché si riferiscono alla vita di propagazione della cricca e non a quella totale, che si assume essere più elevata. Tutti i dati in questo diagramma sono riferiti a rotture al piede. Fonte: [4].

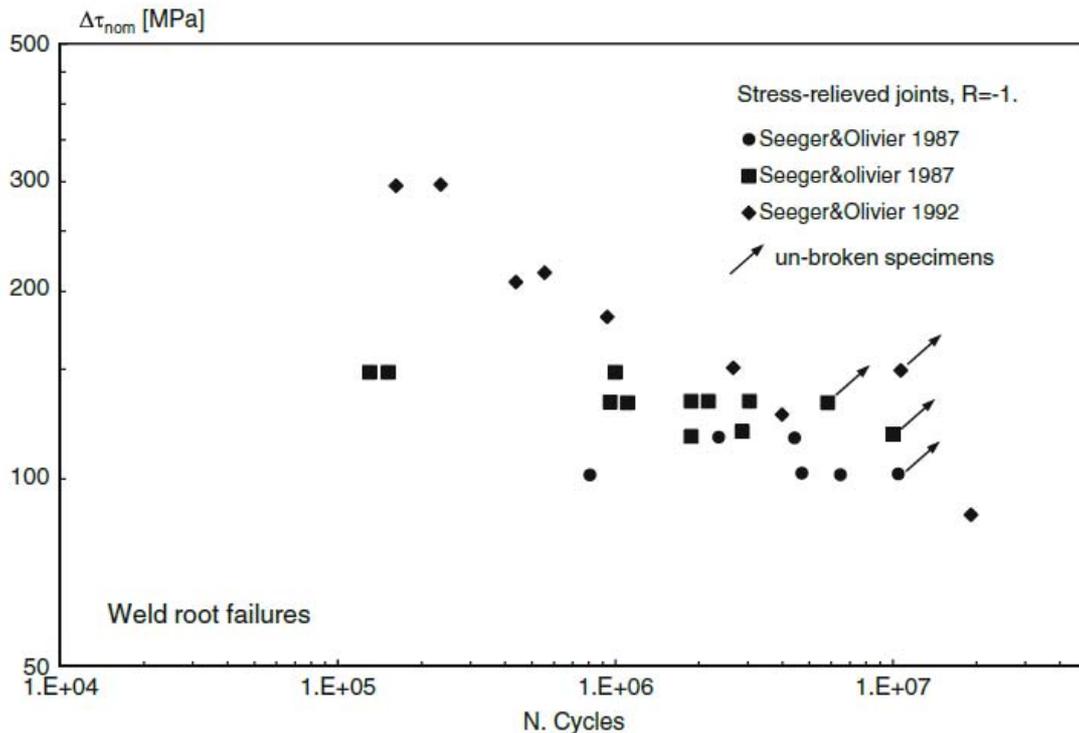


Figura 3.74: Risultati delle prove a torsione pura della letteratura; i risultati in termini di numero di cicli sono riferiti o all'instaurarsi di una cricca passante o alla perdita di rigidità. Alcuni dati sono indicati con una freccia poiché si riferiscono alla vita di propagazione della cricca e non a quella totale, che si assume essere più elevata. Tutti i dati in questo diagramma sono riferiti a rotture alla radice. Fonte: [4].

3.12 - Confronto tra flange forate e non

Per completezza si ritiene utile confrontare le differenze in termini di tensione di picco e di K_{FE}^{***} calcolati al variare della configurazione della flangia di fissaggio; essa infatti può presentare diversi layout:

- Con configurazione complessa di fori al centro, come ad esempio nella geometria di Sonsino (figura 3.3);
- Con un unico foro passante al centro non necessariamente della stessa dimensione del diametro interno del tubo (figura 3.24);
- Senza alcun foro al centro (figura 3.10).

Per le analisi si sono prese in considerazione le dimensioni caratteristiche relative alla geometria di Sonsino e si sono analizzati i tre casi sopraelencati; di seguito si riportano 3 immagini che chiariscono le geometrie adottate.

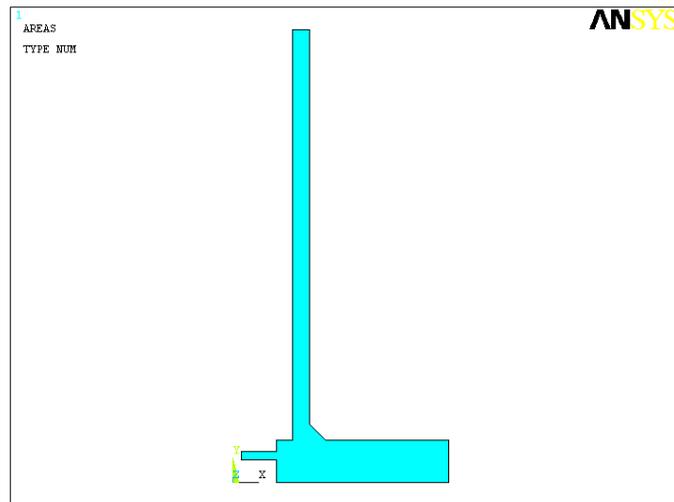


Figura 3.75: Geometria originale analizzata da Sonsino.

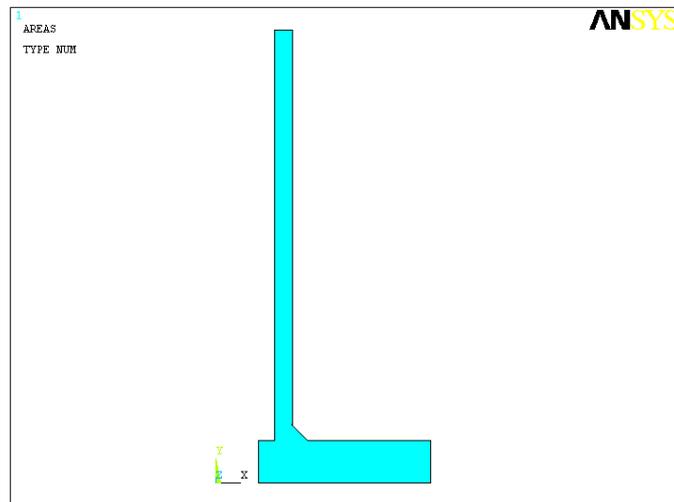


Figura 3.76: Geometria con grandezze principali pari a quelle utilizzate da Sonsino ma modificata in modo tale da avere un unico foro passante di diametro 50 mm.

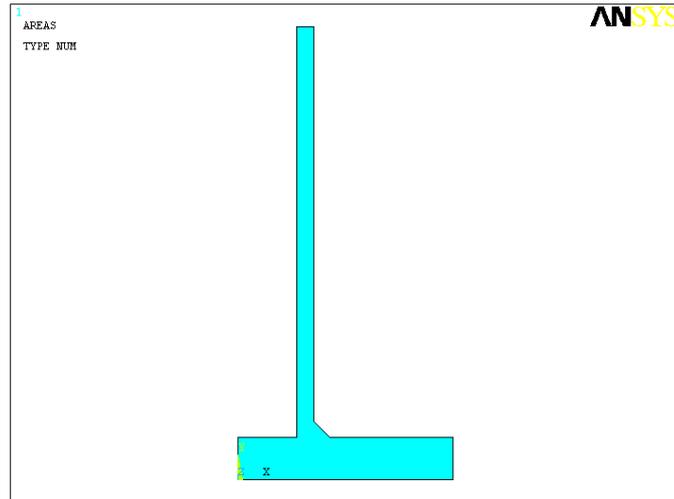


Figura 3.77: Geometria con grandezze principali pari a quelle utilizzate da Sonsino ma modificata in modo tale da non avere alcun foro al centro.

I risultati ottenuti sono riassunti nella successiva tabella:

	K_3	$\tau_{peak} [MPa]$	K_{FE}^{***}
Sonsino originale	2.981	2.1118	1.94762
Sonsino con flangia con unico foro passante di diametro 50 mm	2.979	2.0983	1.95883
Sonsino con flangia non forata	2.982	2.1011	1.95819

Tabella 3.22: Calcolo del valore di NSIF, della tensione di picco e del parametro K_{FE}^{***} in funzione del layout della flangia di fissaggio; la tensione di picco riportata è quella ricavata all'apice dell'intaglio lungo la direzione ortogonale a quella della bisettrice dello stesso.

Si calcolano inoltre gli scostamenti percentuali rispetto alla soluzione originale:

	K_3	Δ [%]	K_{FE}^{***}	Δ [%]
Sonsino originale	2.981	0	1.94762	0
Sonsino con flangia con unico foro passante di diametro 50 mm	2.979	0.0671	1.95883	0.5759
Sonsino con flangia non forata	2.982	0.0335	1.95819	0.5430

Tabella 3.23: Calcolo degli scostamenti percentuali rilevati rispetto alla soluzione originale, ricavata per la geometria di Sonsino, al variare della configurazione della flangia di fissaggio.

Come si osserva da entrambe le tabelle gli scostamenti, sia in termini di NSIF calcolato sia per quanto riguarda il valore di K_{FE}^{***} , sono esigui; si conclude che il layout della flangia di fissaggio in termini di forature al centro della stessa non influisce in modo significativo sui risultati ottenuti.

3.13 - Conclusioni del capitolo

In questo capitolo si sono dapprima confermati tutti i dati presenti in letteratura [4] per quanto riguarda il metodo del PSM nei casi di sollecitazione di modo III; sono stati calcolati numericamente i valori dell'NSIF e dell'estensione del campo locale di tensione per ogni geometria trattata in letteratura.

Si è inoltre esteso il secondo metodo di convergenza in x^*/d , descritto inizialmente nel paragrafo relativo al modo I, anche nel caso degli intagli saldati sollecitati a modo III; si ricorda che con x^* si indica l'estensione numerica del campo locale di tensione.

Come ultimo passo si è verificato che la presenza e il layout di eventuali fori al centro della flangia di fissaggio non influisce sensibilmente sui risultati dei metodi NSIF e PSM; tale informazione sarà utilizzata nel capitolo dedicato al banco prova progettato nel presente elaborato, nel quale si proporrà un metodo per la determinazione dell'innesco della cricca che prevederà la foratura dei provini testati.

Capitolo 4: APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO III - CASO: PLANE25

Si passa ora al contenuto principale del presente elaborato: l'estensione del PSM nel caso di modo III anche per intagli con apertura diversa da 0° e 135° . Tutte le analisi riportate di seguito sono state svolte semplificando la geometria con un modello bidimensionale ed utilizzando l'elemento PLANE25 presente nella libreria di Ansys® 14; le Key Options impostate, che sono quelle utilizzate di default da Ansys®, sono le seguenti:

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0	0	0	0	0	0

Tabella 4.1: Riassunto delle Key Options impostate per le analisi con l'elemento PLANE25; per ulteriori informazioni riguardo quest'ultime riferirsi alla guida in linea di Ansys®.

4.1 - Provino circolare sollecitato a torsione con cricca lungo tutta la circonferenza che origina a partire dal diametro esterno

4.1.1 - Modello fisico e numerico adottato

Il modello fisico di riferimento è quello di un provino circolare, con cricca estesa su tutta la circonferenza dello stesso e che origina a partire dal diametro esterno; il valore del diametro esterno è indicato con OD nella seguente trattazione. Per sollecitare la cricca a modo III è necessario applicare due momenti torcenti opposti alle estremità del provino stesso.

Si riporta di seguito alcune immagini del modello fisico adottato.

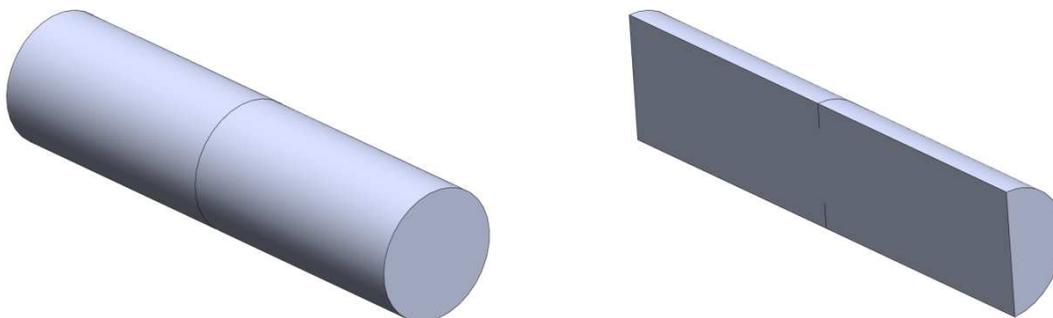


Figura 4.1: Modello di un provino circolare con cricca lungo tutta la circonferenza (a sinistra) e sezione dello stesso (a destra).

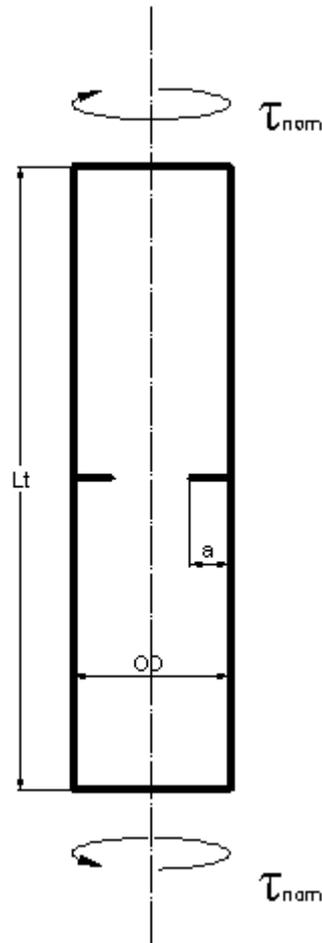


Figura 4.2: Vista in sezione del modello fisico adottato per le analisi di un provino circolare con cricca lungo tutta la circonferenza sollecitato a modo III e principali grandezze dimensionali caratterizzanti. Il tratteggio di sezione non è stato riportato per chiarezza dell'immagine.

A partire dal modello fisico si è ricavato quello numerico che si ricorda essere bidimensionale; data la doppia simmetria del problema è possibile modellare solamente un quarto di provino utilizzando il PLANE25, elemento bidimensionale a 4 nodi utilizzato per modellare strutture assialsimmetriche attorno all'asse y con carichi non assialsimmetrici come la torsione. Ogni nodo possiede 3 gradi di libertà che corrispondono alle traslazioni nelle 3 direzioni. Sono state utilizzate le Key Options per l'elemento definite all'inizio del presente capitolo; il materiale scelto è comune acciaio con modulo di resistenza pari a 206000 MPa e coefficiente di Poisson pari a 0.3. La sollecitazione di torsione sul provino è modellata mediante l'utilizzo di una forza F ortogonale al piano, come indicato in figura 4.3; la lunghezza del provino è tale da garantire un campo di tensione uniformato in prossimità dell'intaglio, cioè tale da non risentire più degli effetti dell'applicazione di una forza concentrata in un punto.

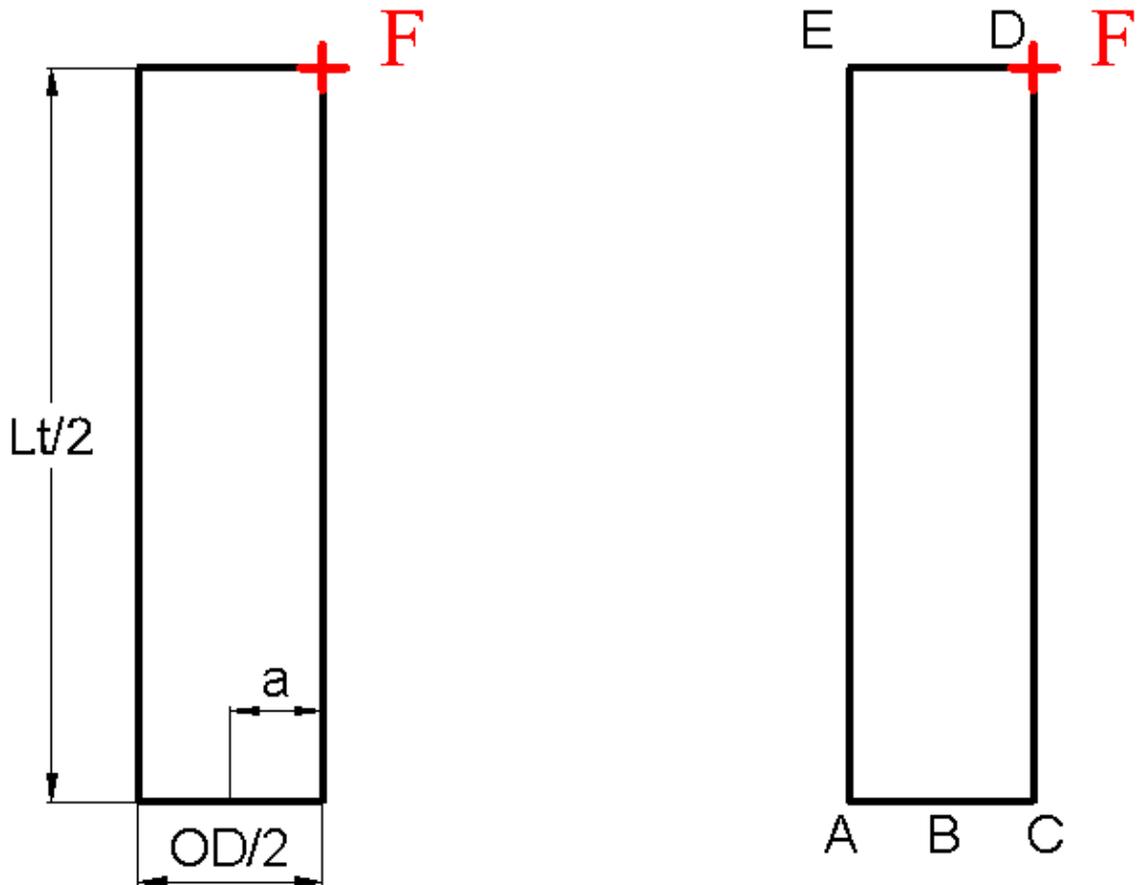


Figura 4.3: Modello semplificato per le analisi numeriche dove si è sfruttata la doppia simmetria del problema originale. La tensione di torsione sul provino è applicata utilizzando una forza F ortogonale al piano.

Per applicare una sollecitazione di modo III al provino e ricostruire la doppia simmetria è necessario imporre alcune condizioni nel modello numerico semplificato; riferendosi alla figura 4.3 si ha:

1. Antisimmetria sulla linea AB. Bisogna porre attenzione al fatto che la linea BC corrisponde alla cricca e quindi non deve essere vincolata;
2. Vincolo in A che blocca le traslazioni in direzione verticale, necessario per rimuovere la labilità che si avrebbe altrimenti;
3. Forza F ortogonale al piano d'analisi per simulare lo sforzo di torsione nelle zone adiacenti alla cricca.

Come illustrato nel paragrafo dedicato al modo I per svolgere l'analisi NSIF è necessario creare un sistema di riferimento locale con l'origine sul punto di singolarità geometrica, con la direzione y ortogonale alla bisettrice dell'angolo e con la direzione x rivolta verso la sezione resistente del provino; poiché in questo paragrafo si analizza solo il caso di cricca

si avrà la direzione y sempre verticale. Di seguito è riportata una figura di dettaglio del sistema di riferimento locale adottato.

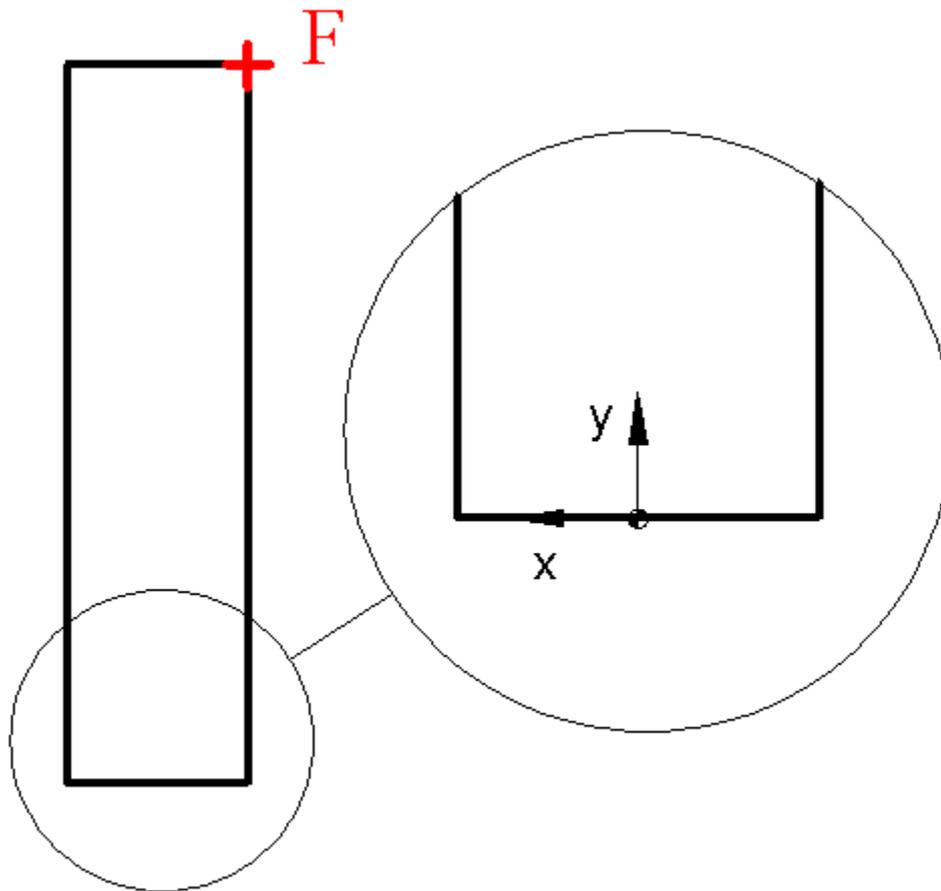


Figura 4.4: Sistema di riferimento locale adottato per una corretta analisi tramite gli NSIFs.

Nel caso in esame le dimensioni scelte per le analisi sono:

- *Diametro esterno* $\rightarrow OD = 40\text{ mm}; 200\text{ mm}$.
- *Lunghezza totale della piastra* $\rightarrow L_t = 4 \cdot \text{diametro esterno [mm]}$.
- *Dimensione caratteristica cricca* $\rightarrow a = 1 \div 14\text{ mm}$.

4.1.2 - Mesh e risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF

In questa parte dell'elaborato si riportano le mesh ottenute utilizzando l'approccio NSIF; anche in questo caso si è sfruttato il programma automatico per ricercare il numero massimo dei refine applicabili per ogni singola geometria prima di ottenere il messaggio

d'errore da parte di Ansys® causato dal raggiungimento della minima dimensione d'elemento. Si riporta di seguito un esempio di mesh ottenuta mediante questo approccio.

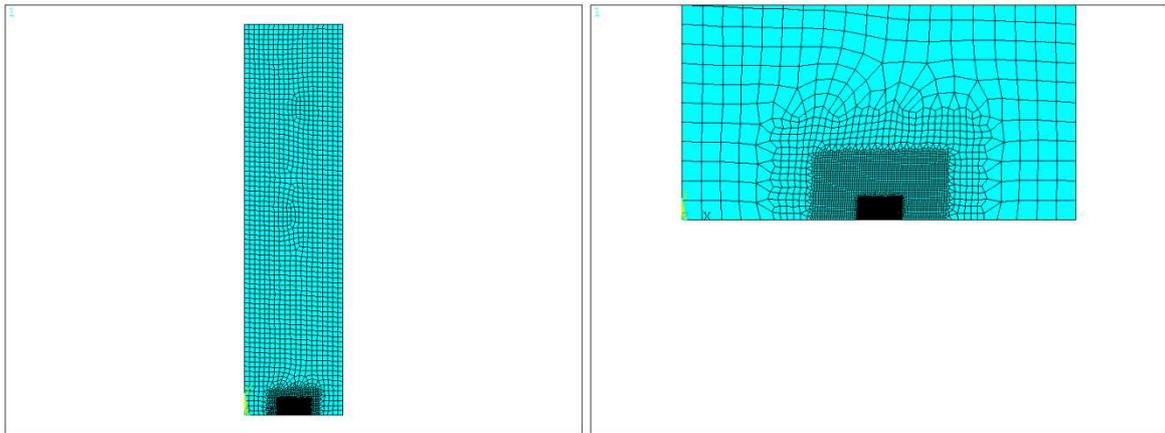


Figura 4.5: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per una cricca di dimensione caratteristica pari a 10 mm e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

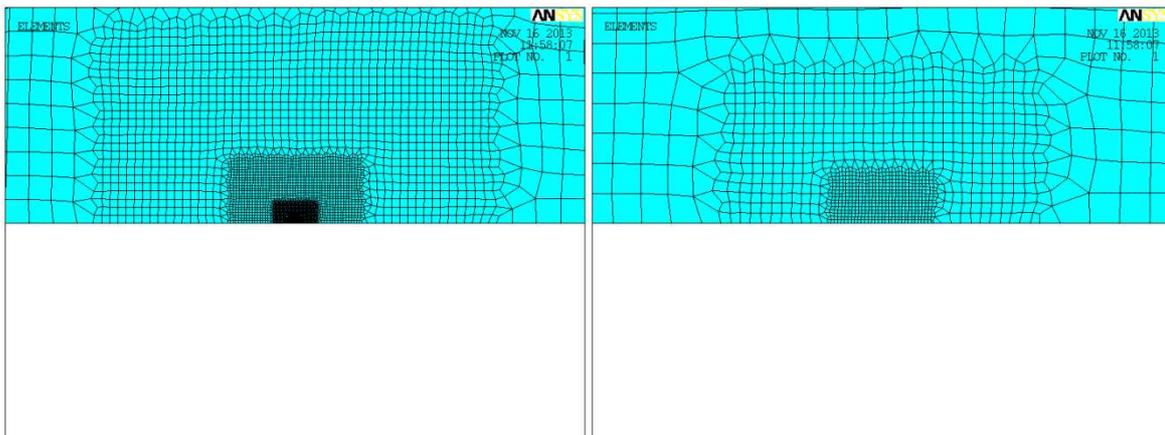


Figura 4.6: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola, pari a circa $4.5 \cdot 10^{-4}$ mm.

In questa sede, per brevità della trattazione, si preferisce non tabellare tutti i risultati numerici ottenuti mediante l'approccio NSIF per non appesantire ulteriormente il testo; si ritiene però utile riportare tali risultati in opportuni diagrammi ricordando che con quest'approccio si ottengono due diverse informazioni, cioè il campo del fattore d'intensificazione delle tensioni, dal quale si ricava il valore medio dello stesso mediando alcuni valori nel plateau, e l'estensione del campo locale di tensione, entrambi calcolati numericamente.

Dapprima si riporta un esempio di un campo di tensione tangenziale di strappo normalizzato rispetto al valore della tensione nominale e successivamente la distribuzione numerica del fattore d'intensificazione delle tensioni, anch'esso normalizzato rispetto alla stessa quantità.

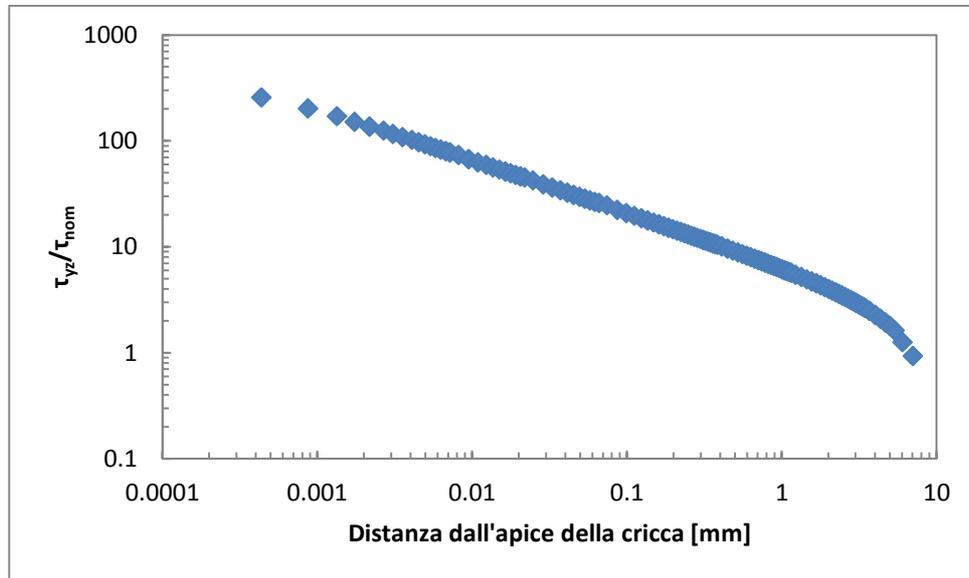


Figura 4.7: Campo di tensione tangenziale locale di strappo, normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale, relativo ad un provino di diametro esterno pari a 40 mm e con cricca estesa lungo tutta la circonferenza, che origina dal diametro esterno e di dimensione pari a 10 mm.

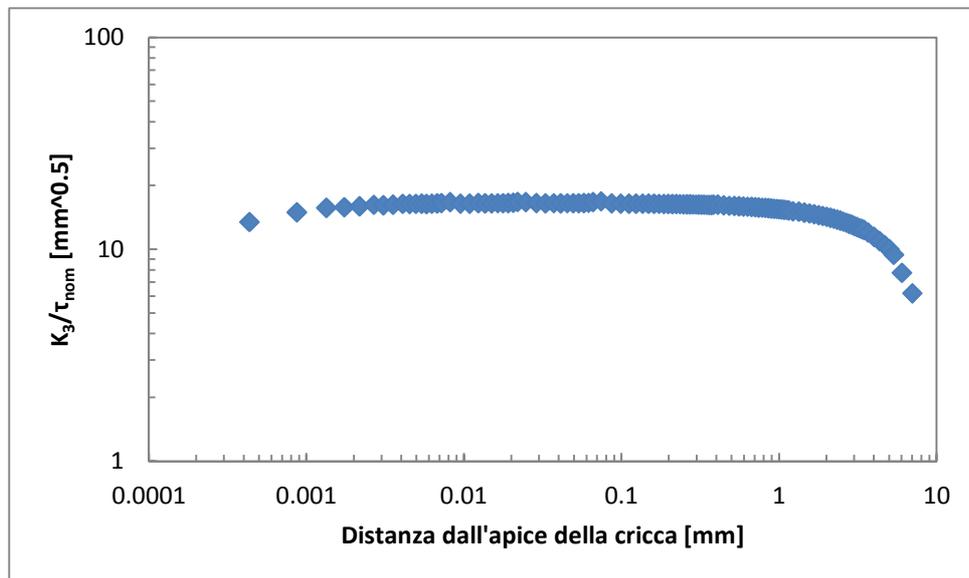


Figura 4.8: Distribuzione del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III, normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale, relativo ad un provino di diametro esterno pari a 40 mm e con cricca estesa lungo tutta la circonferenza esterna e di dimensione 10 mm.

Di seguito si riportano i risultati relativi al provino di diametro pari a 40 mm, nel caso di cricca che propaga a partire dall'esterno; nei seguenti grafici si riassumono i valori medi ricavati numericamente del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III e le lunghezze della zona d'estensione del campo locale di tensione, anch'esse ricavate numericamente. È inoltre possibile confermare l'andamento del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III ricavato numericamente, espresso in funzione della dimensione della cricca, confrontandolo coi valori analitici; per ricavare quest'ultimi ci si riferisce a [17], dal quale si ricava la seguente procedura per il calcolo del fattore d'intensificazione delle tensioni analitico.

Dapprima si definisce la grandezza R_l :

$$R_l = \frac{OD-2\cdot a}{2} \quad (4.1)$$

dove si ricorda che OD è il diametro esterno del provino, mentre a è la dimensione della cricca. Quindi si ricava il parametro F_{III} :

$$F_{III} = \frac{3}{8} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R_l}{R_g} + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{R_l}{R_g} \right)^2 + \frac{5}{16} \cdot \left(\frac{R_l}{R_g} \right)^3 + \frac{35}{128} \cdot \left(\frac{R_l}{R_g} \right)^4 + 0.208 \cdot \left(\frac{R_l}{R_g} \right)^5 \right) \cdot \left(1 - \frac{R_l}{R_g} \right)^{0.5} \quad (4.2)$$

dove R_g è il raggio lordo del provino.

Si ricava quindi che:

$$\frac{K_{III}}{\tau_{net}} = \sqrt{\pi \cdot R_l} \cdot F_{III} \quad (4.3)$$

dove τ_{net} è la tensione tangenziale netta di strappo.

Infine:

$$\frac{K_{III}}{\tau_{nom}} = \left(\frac{K_{III}}{\tau_{net}} \right) / \left(\frac{R_l}{R_g} \right)^3 \quad (4.4)$$

dove τ_{nom} è la tensione tangenziale lorda di strappo.

Diagrammando i due andamenti, numerico e analitico, ricavati si ha:

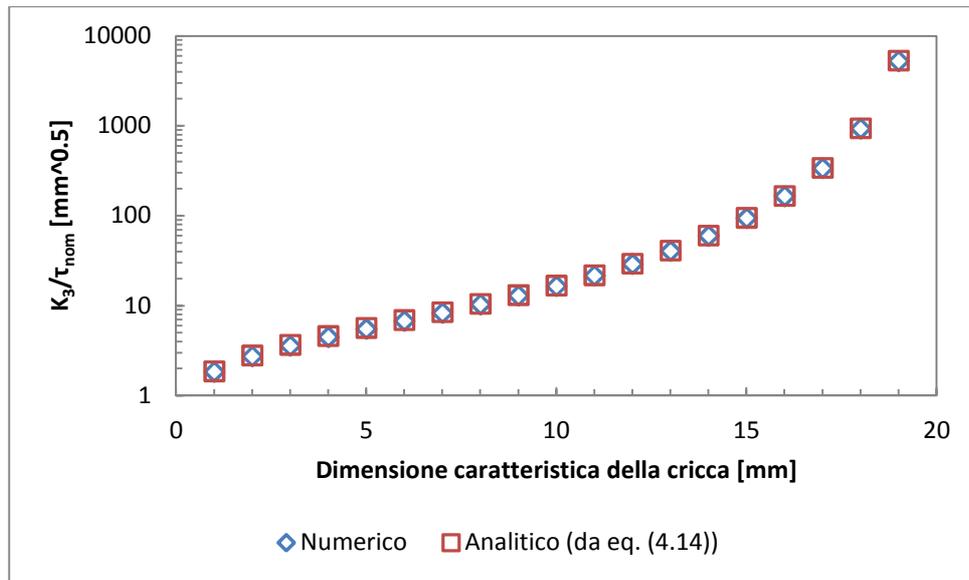


Figura 4.9: Andamento del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III analitico (ricavato dall'eq. (4.4)) e numerico (ricavato secondo le procedure già descritte), normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale, e diagrammato in funzione della dimensione della cricca; questo caso si riferisce al provino di diametro esterno pari a 40 mm.

Dalla figura precedente si osserva che, come atteso, ad una cricca più grande corrisponde un fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III maggiore, causato dall'innalzamento del campo di tensione locale; si nota inoltre che i risultati numerici e quelli analitici presentano un'elevata correlazione per ogni dimensione di cricca.

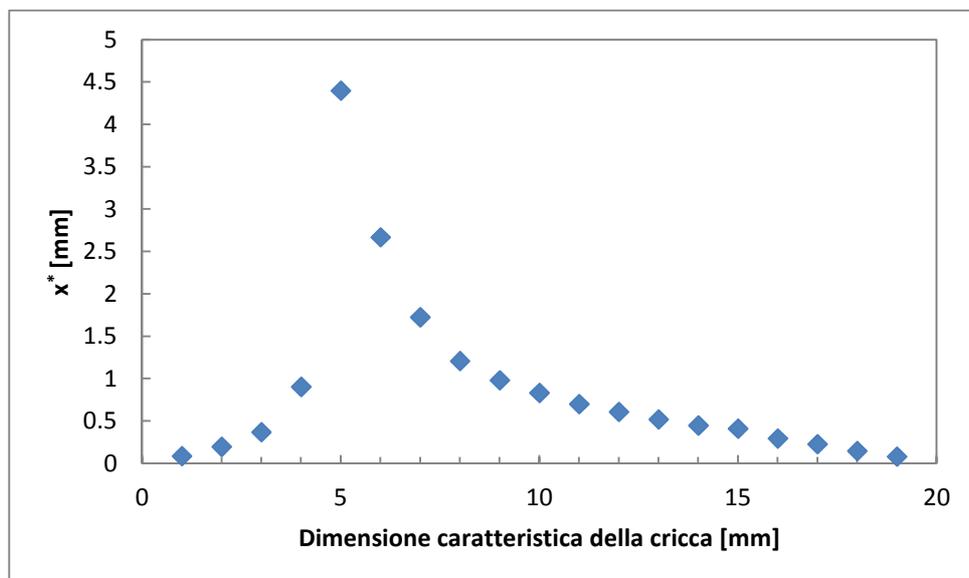


Figura 4.10: Andamento dell'estensione del campo locale di tensione in funzione della dimensione della cricca; questo caso si riferisce al provino di diametro esterno pari a 40 mm.

Come già descritto nel caso di modo I si osserva che l'ampiezza della zona d'estensione del campo locale di tensione, all'aumentare delle dimensioni della cricca, tende dapprima a crescere, coerentemente con quanto descritto dalla teoria, salvo poi diminuire nuovamente a causa dell'interazione tra i campi di tensione locali della cricca causata dagli apici della stessa che si trovano in posizione diametralmente opposta e che iniziano ad avvicinarsi al cuore del provino, risentendo quindi l'uno dell'altro.

Si riportano ora i medesimi diagrammi riassuntivi riferiti al caso di provino di diametro esterno pari a 200 mm con cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno.

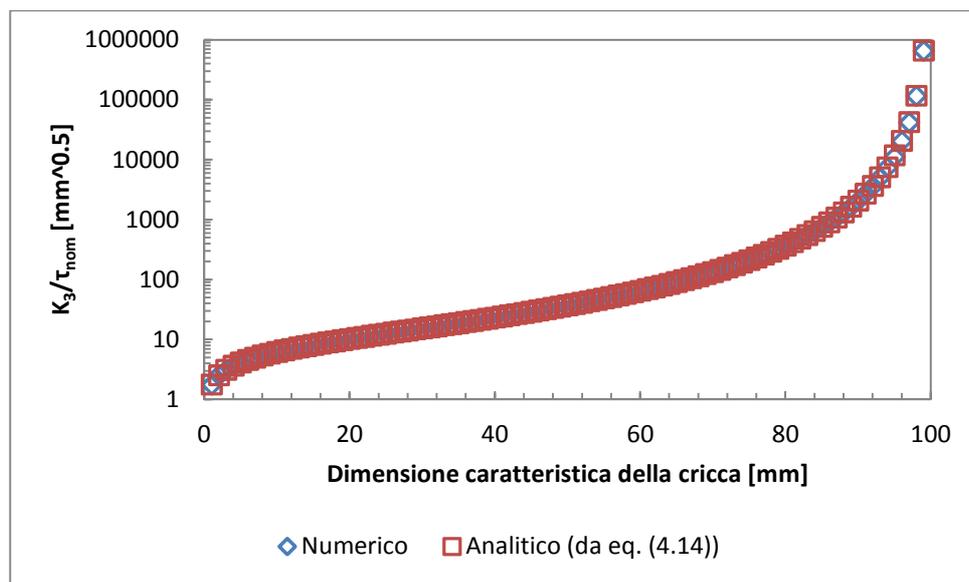


Figura 4.11: Andamento del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III analitico (ricavato dall'eq. (4.4)) e numerico (ricavato secondo le procedure già descritte), normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale, e diagrammato in funzione della dimensione della cricca; questo caso si riferisce al provino di diametro esterno pari a 200 mm.

Si conferma quindi l'andamento osservato nel caso di provino di diametro esterno pari a 40 mm; l'NSIF numerico di modo III aumenta al crescere delle dimensioni della cricca e i risultati numerici e quelli analitici presentano ancora una volta un'elevata correlazione.

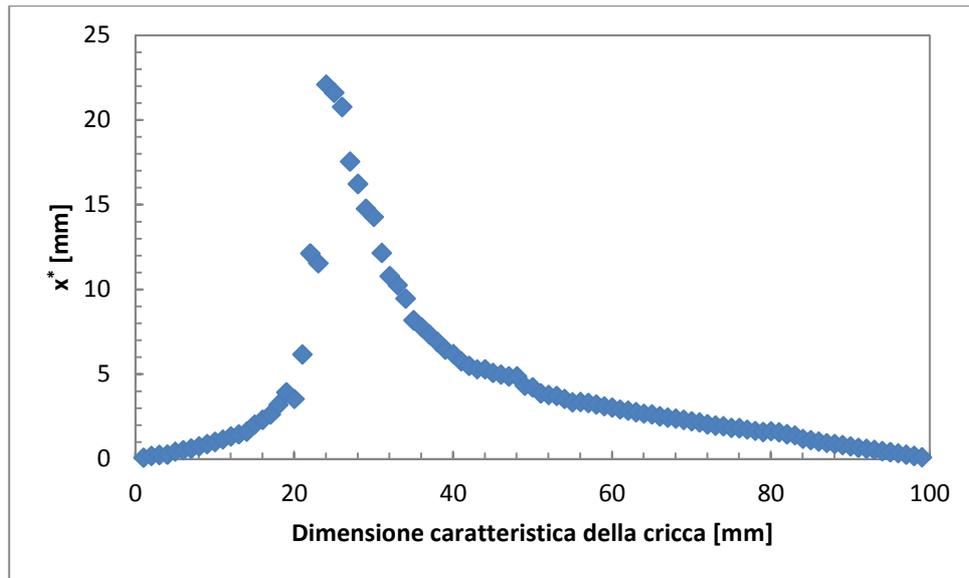


Figura 4.12: Andamento dell'estensione del campo locale di tensione in funzione della dimensione della cricca; questo caso si riferisce al provino di diametro esterno pari a 200 mm.

Anche quest'ultimo diagramma, relativo all'estensione del campo locale di tensione espressa in funzione della dimensione della cricca ricavata nel caso di provino di diametro esterno pari a 200 mm, ricalca quanto già osservato nel caso di diametro di 40 mm.

Si osserva inoltre che i diagrammi relativi al provino di diametro maggiore presentano un numero di punti molto maggiore rispetto al caso precedente; ciò è causato dal fatto che in entrambi i casi si è mantenuto lo stesso passo in termini di dimensione della cricca, pari a 1 mm.

4.1.2.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Il programma automatico utilizzato per svolgere l'intera batteria d'analisi ricalca ogni aspetto descritto nel paragrafo 2.1.2 per quanto riguarda il modo I; senza riportare nuovamente tutti gli aspetti già descritti s'intende in questo paragrafo descrivere solamente le differenze con quest'ultimo e gli input da fornire.

Le differenze citate sono principalmente relative alla tipologia d'elemento scelta e alle condizioni al contorno assegnate, diverse per ovvi motivi e già descritte nel paragrafo 4.1.1, e dalla possibilità del programma di effettuare dei cicli variando anche l'angolo d'apertura dell'intaglio, cosa che non si era resa necessaria nel caso d'analisi di cricche sollecitate a modo I; nel paragrafo in esame questa opzione del programma non è

utilizzata, ma risulta necessaria quando si studiano gli intagli con angolo d'apertura diverso da 0° sollecitati a modo III.

Si elencano di seguito i vari input da fornire al programma per il suo corretto funzionamento.

1. Riga 16 - Variabile "start". Se posta = 0 il programma crea solamente il file apdl e termina la propria esecuzione, mentre se posta = 1 il programma crea il file apdl, lancia un'esecuzione batch di Ansys® ed esegue il postprocess dei risultati;
2. Riga 22 - Variabile "NSIF". Se posta = 1 il programma esegue l'analisi dell'intaglio attraverso il metodo NSIF, mentre se posta = 0 il programma esegue un'analisi sfruttando il PSM;
3. Riga 8 - Variabile "de". Specifica il diametro esterno del provino in mm;
4. Riga 9 - Variabile "lt". Specifica la lunghezza totale del provino in mm;
5. Riga 10 - Variabile "TAU". Specifica la tensione tangenziale lorda applicata al provino in MPa;
6. Riga 32 - Variabile "Tabalfa". In questa variabile a più dimensioni s'inseriscono in successione le aperture dell'intaglio 2α (vedere figura 4.43) da testare durante la batteria d'analisi. Nel caso di cricca il valore in questione è posto pari a zero;
7. Riga 36 - Variabile "Tabsize". In questa variabile a più dimensioni s'inseriscono in successione le dimensioni caratteristiche della cricca a (vedere figura 4.43) da testare durante la batteria d'analisi;
8. Riga 40 - Variabile "Tabelem". Questa variabile ha due significati in funzione del valore di "NSIF". Se "NSIF" = 1, e quindi si sta svolgendo un'analisi col metodo NSIF, "Tabelem" è una costante che corrisponde alla global element size della mesh che si userà per ogni analisi svolta nella batteria; se, invece, "NSIF" = 0 e quindi si sta svolgendo un'analisi sfruttando il PSM, "Tabelem" è un vettore che contiene nelle sue celle le varie dimensioni globali di elemento da utilizzare per analisi successive;

9. Riga 28 - Variabile "plane". Questa variabile permette di scegliere il tipo d'elemento utilizzato. Se è pari a 25 si utilizzano i PLANE25, se è uguale a 83 i PLANE83.

4.1.3 - Layout delle mesh utilizzate nell'applicazione del PSM

La mesh ottenuta in questi casi è realizzata solamente imponendo una global element size e lanciando l'algoritmo di meshatura free; poiché si tratta di casi di cricca, la mesh locale, nell'intorno del punto di singolarità, presenta generalmente un layout che si ripete anche al variare delle dimensioni della cricca e della geometria. Si ricorda che nel caso in esame si sta modellando solamente un quarto del provino, per cui considerando il modello numerico all'apice sarà necessario avere due elementi che condividono il punto di singolarità (che corrispondono a quattro elementi se si considera il provino intero).

Di seguito si riporta un esempio di mesh ottenuta mediante questo approccio.

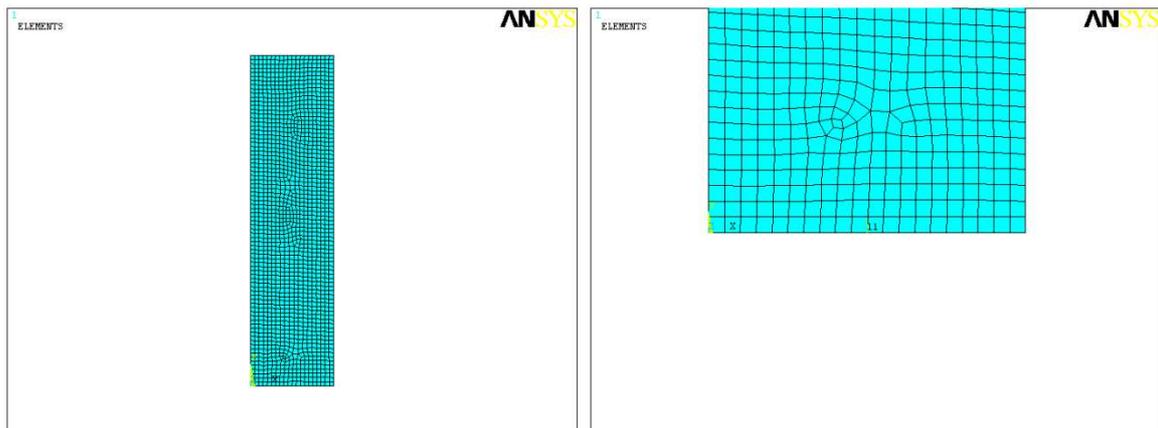


Figura 4.13: Mesh ottenuta applicando il PSM; il caso in esame è riferito ad un provino di diametro esterno pari a 40 mm, con cricca di dimensione 10 mm e global element size pari a 1 mm; a destra l'apice della cricca è segnalato dal sistema di riferimento locale n°11.

4.1.4 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

Per la geometria in esame l'angolo d'apertura dell'intaglio è sempre nullo perciò si sono svolte diverse prove al variare della dimensione della cricca e della global element size; le dimensioni di cricca trattate in tutti i casi partono da 1 mm fino ad arrivare alla dimensione che lascia una sezione netta del provino di raggio 1 mm, sempre con passo 1 mm. Le global element size utilizzate sono dichiarate di volta in volta nel riassunto dei risultati e variano al variare della geometria analizzata.

Si riporta di seguito un elenco che descrive le varie analisi svolte per questo caso:

- Per provino di diametro esterno pari a 40 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno si sono trattate cricche da 1 mm a 19 mm e dimensioni d'elemento contenute nel seguente insieme: [2.5 2 1 0.5 0.1];
- Per provino di diametro pari a 40 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'interno del provino stesso si sono trattate cricche da 1 mm a 19 mm e dimensioni d'elemento contenute nel seguente insieme: [2.5 2 1 0.5];
- Per provino di diametro esterno pari a 200 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno si sono trattate cricche da 1 mm a 99 mm e dimensioni d'elemento contenute nel seguente insieme: [5 2.5 2 1 0.5].

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal PSM; si ritiene troppo dispersivo nei casi di cricca riportare tutti i risultati ottenuti sottoforma di tabelle, che risulterebbero lunghe e di difficile consultazione. Si ritiene perciò opportuno riassumere tutti i risultati ricavati al variare delle dimensioni della cricca in alcuni grafici.

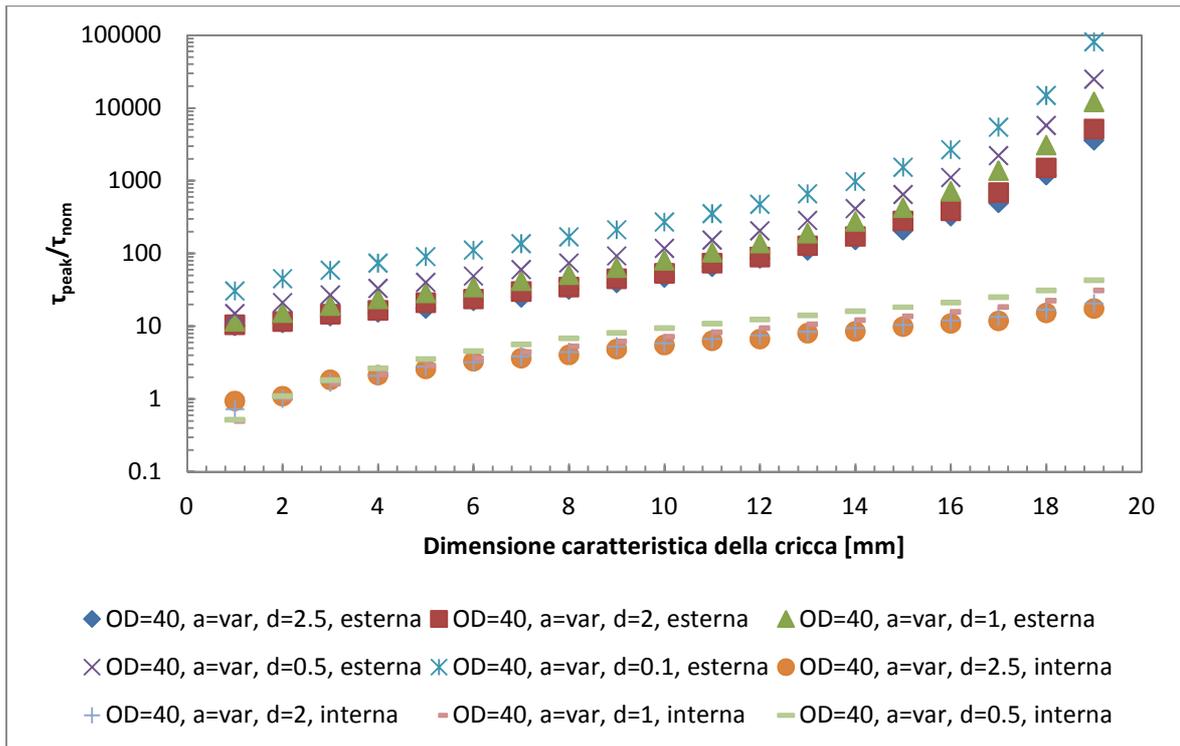


Figura 4.14: Andamento della tensione di picco, normalizzata rispetto alla tensione nominale applicata, in funzione della dimensione della cricca; il diagramma si riferisce al caso di provino di diametro esterno pari a 40 mm e con cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno o dall'interno.

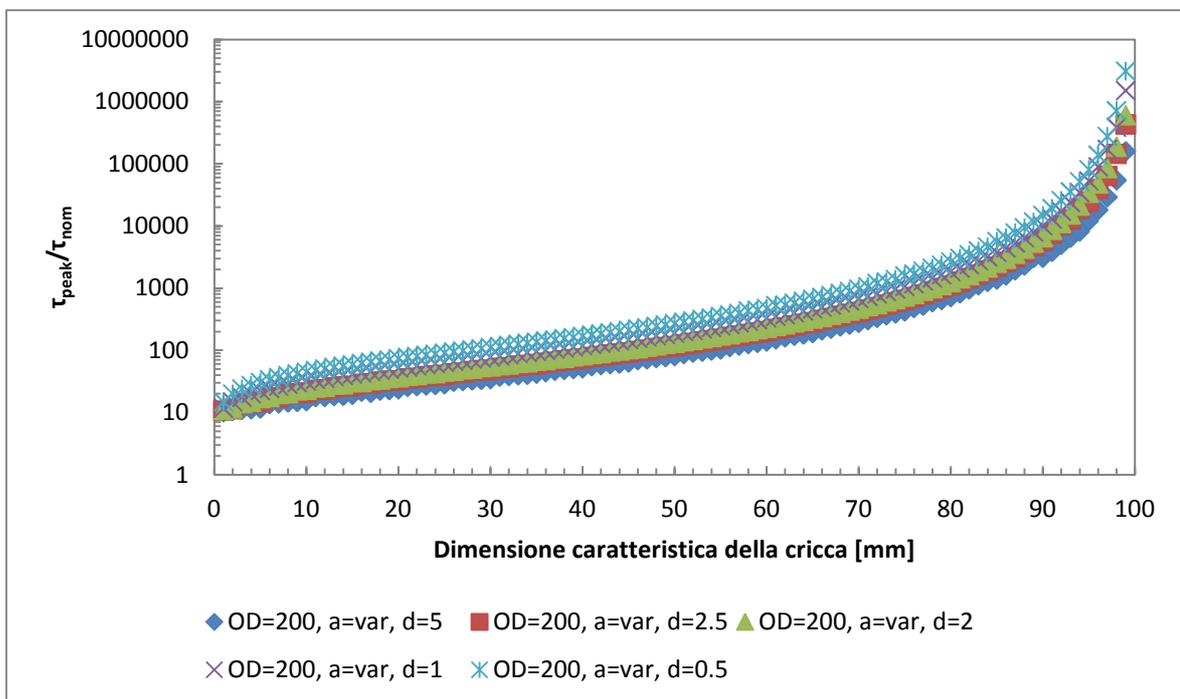


Figura 4.15: Andamento della tensione di picco, normalizzata rispetto alla tensione nominale applicata, in funzione della dimensione della cricca; il diagramma si riferisce al caso di provino di diametro esterno pari a 200 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza.

Ciò che si osserva dai precedenti diagrammi è:

- Un aumento della global element size della mesh comporta, a parità di geometria, un aumento delle tensioni di picco rilevate, coerentemente col fatto che si tratta sempre di mesh abbastanza grossolane e quindi non a convergenza;
- Dalla figura 4.14, riferita al caso di provino di diametro esterno pari a 40 mm, si osserva che il confronto tra gli andamenti della tensione tangenziale di picco normalizzata rispetto alla tensione tangenziale nominale applicata riferiti a un provino con cricca che origina dall'esterno sono sempre più elevati rispetto a quelli relativi al caso di cricca che origina dal cuore del provino.

In termini di K_{FE}^{***} invece si ottengono i diagrammi riportati di seguito.

Caso: provino di diametro esterno 40 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno.

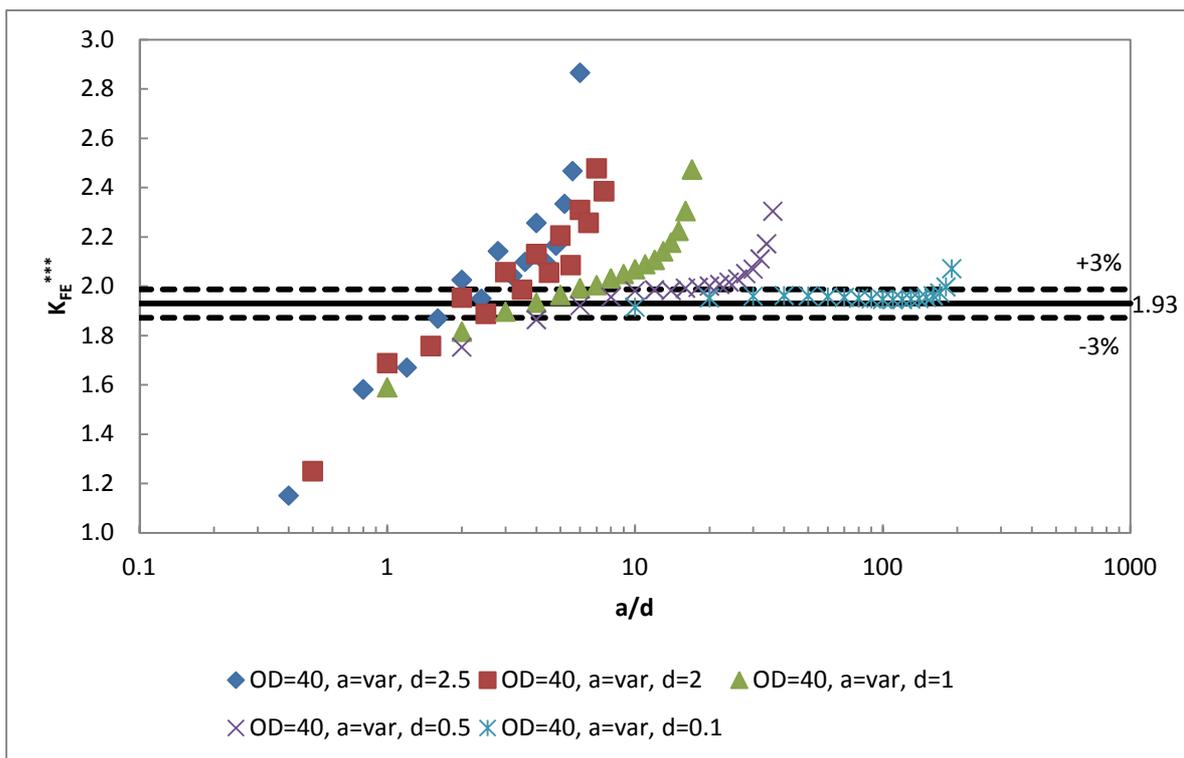


Figura 4.16: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

Come già premesso nel paragrafo dedicato al modo I si osserva che diagrammando i risultati in termini di a/d ed eseguendo le analisi fissando una dimensione globale d'elemento e facendo variare la dimensione della cricca, i risultati che si trovano ai più alti valori del parametro adimensionale sopracitato escono dalla banda di convergenza.

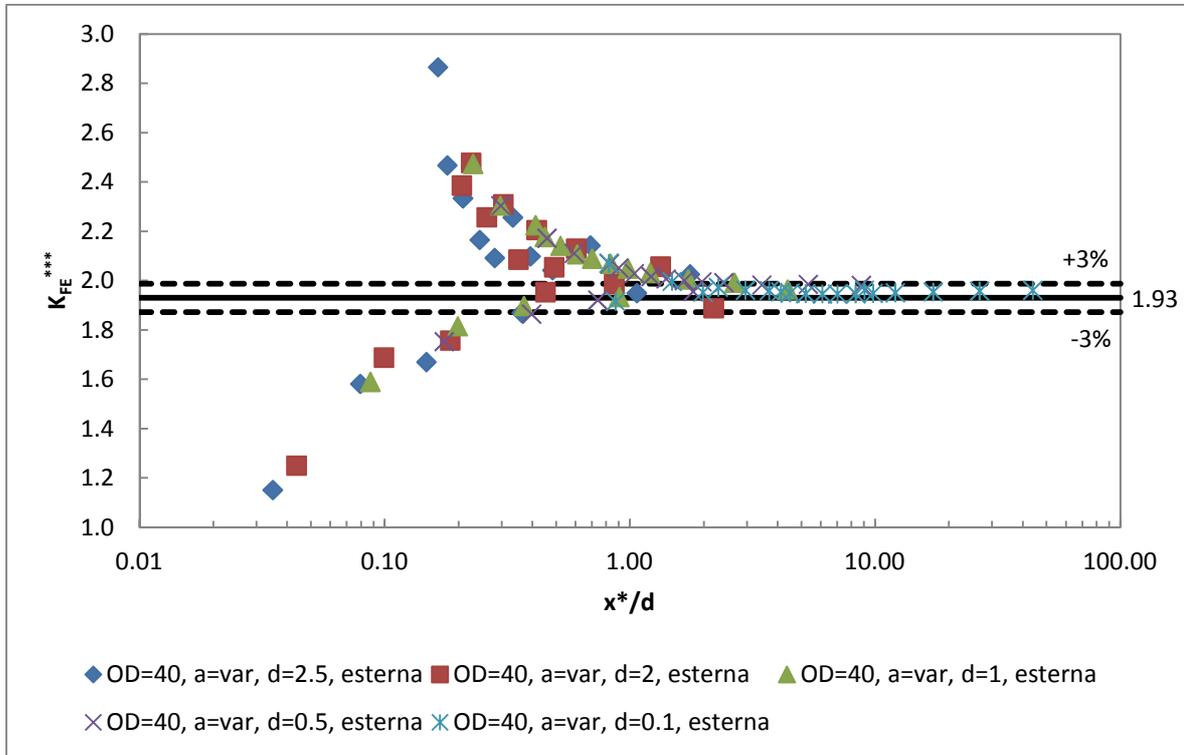


Figura 4.17: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

Diagrammando invece gli stessi risultati in termini di x^*/d si osserva che i punti che stavano sulla parte destra del diagramma di figura 4.16 e che uscivano dalla banda di convergenza vanno a finire sulla parte sinistra nella figura 4.17, poiché in quei casi la cricca ha lunghezza elevata e i campi locali di tensione riferiti agli apici diametralmente opposti della stessa interagiscono tra loro diminuendo l'estensione del campo locale di tensione.

Con questa nuova definizione del parametro adimensionale di convergenza si è quindi riportato il metodo a funzionare correttamente.

Caso: provino di diametro esterno 40 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'interno.

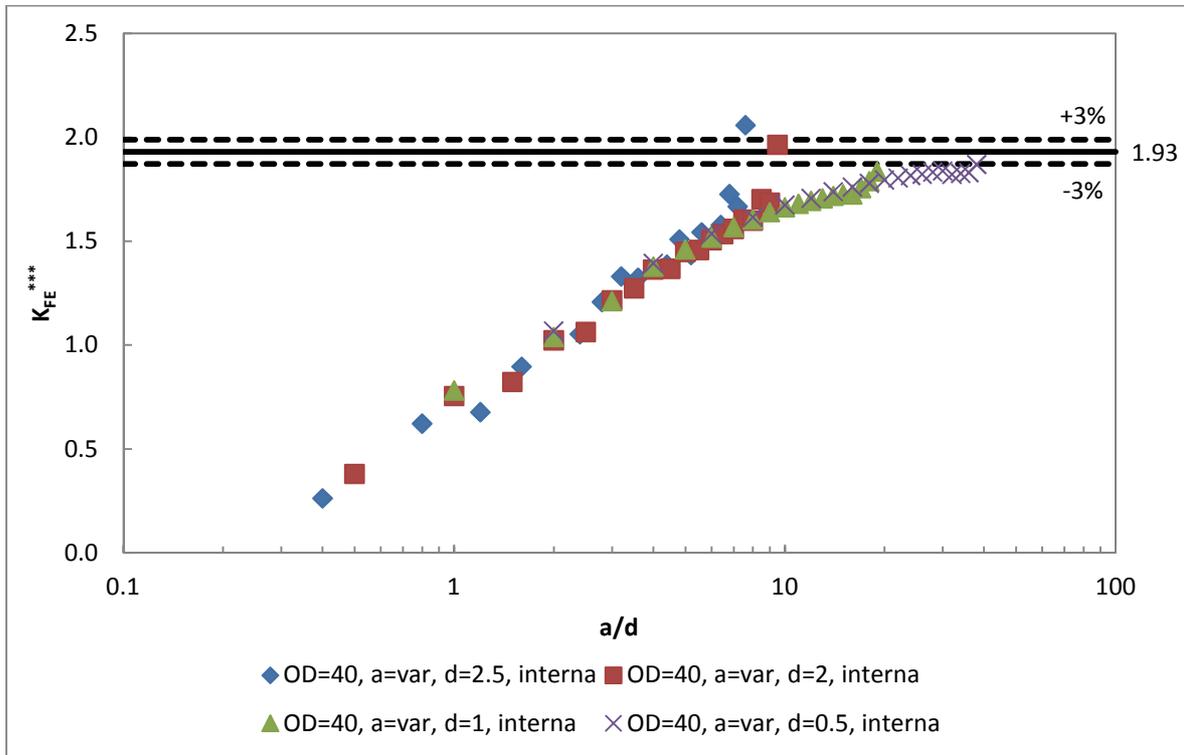


Figura 4.18: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

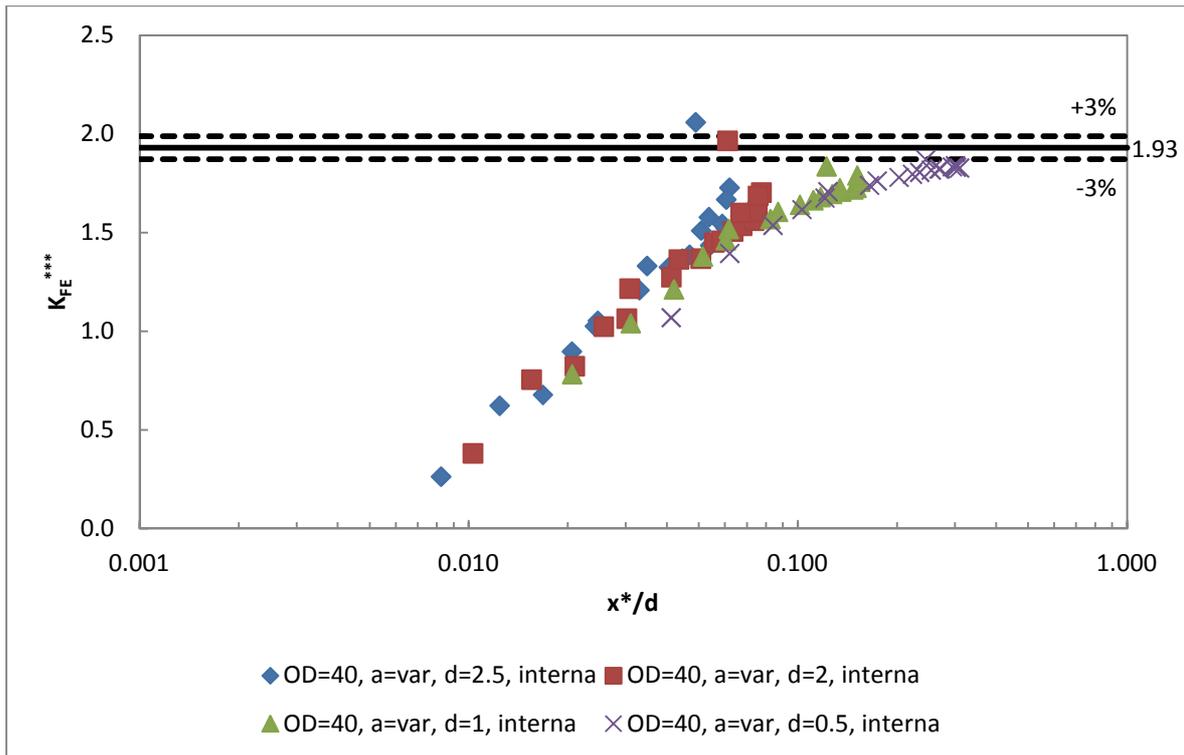


Figura 4.19: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

Nel caso di cricca che origina dall'interno del provino le considerazioni cambiano; è sempre vero che diagrammando i risultati in termini di a/d le curve ad elevati valori di questo parametro tenderebbero ad uscire dalla banda d'accettabilità mentre diagrammandoli in funzione di x^*/d la problematica non si presenterebbe, ma si osserva in entrambi i casi che le analisi PSM svolte con le stesse dimensioni globali d'elemento adottate per una cricca che origina dall'esterno non portano a soluzioni contenute nella banda. Sarebbe perciò necessario procedere oltre in termini di fittezza della mesh, eventualità non consentita per la geometria in esame poiché Ansys® fornisce un messaggio d'errore per il raggiungimento della minima dimensione d'elemento gestibile; si conclude che il caso di cricca che origina dall'interno è più esigente in termini di fittezza della mesh rispetto al caso in cui quest'ultima si forma a partire dall'esterno.

Caso: provino di diametro esterno 200 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno.

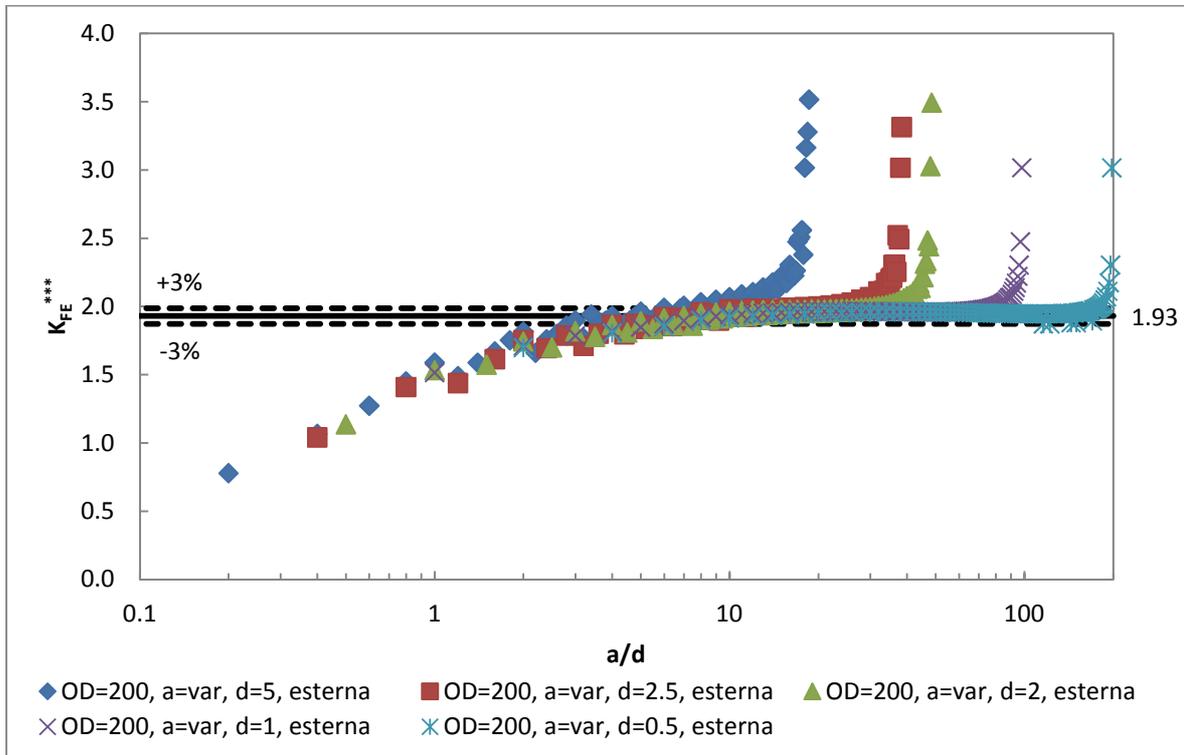


Figura 4.20: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

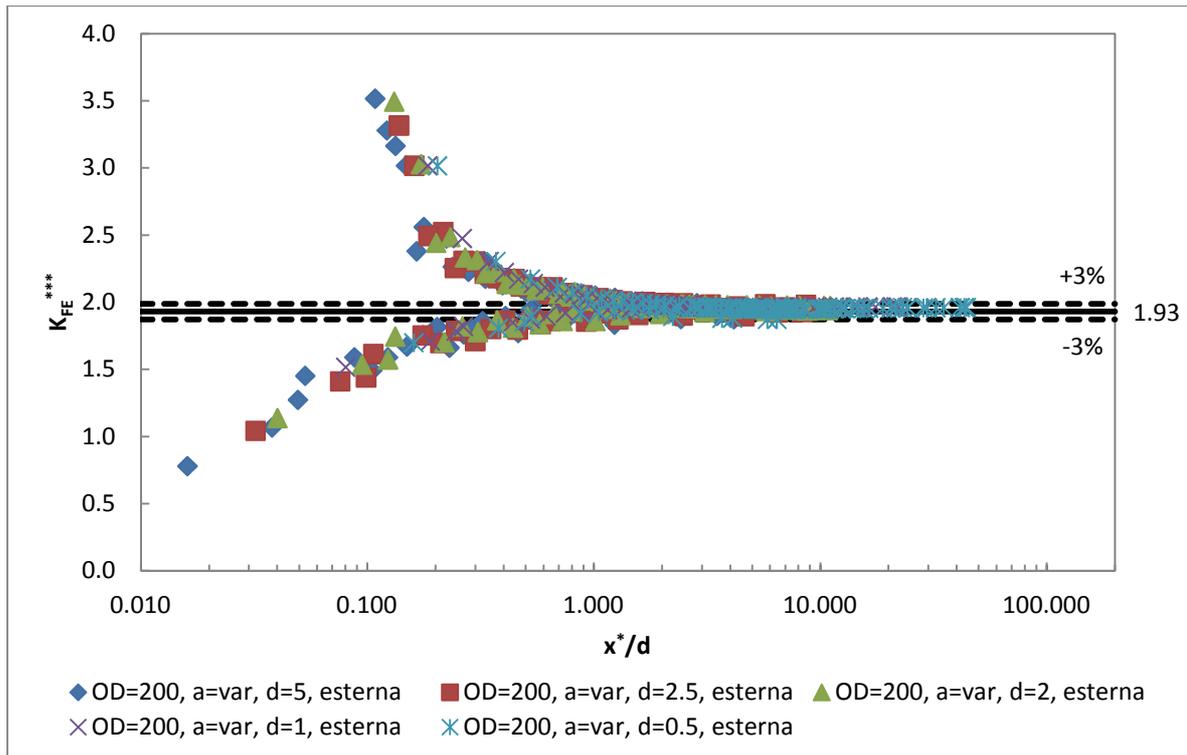


Figura 4.21: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

Per quanto riguarda il provino di diametro esterno pari a 200 mm con cricca che inizia la propagazione dall'esterno valgono le stesse considerazioni svolte nel caso di provino da 40 mm con cricca che origina dall'esterno.

4.1.5 - Riassunto dei risultati

Si riporta di seguito un diagramma riassuntivo di tutti i risultati ottenuti per le tre tipologie di geometria trattate che, si ricorda, sono:

- Provino di diametro esterno pari a 40 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno;
- Provino di diametro esterno pari a 40 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'interno;
- Provino di diametro esterno pari a 200 mm e cricca estesa a tutta la circonferenza che origina dall'esterno.

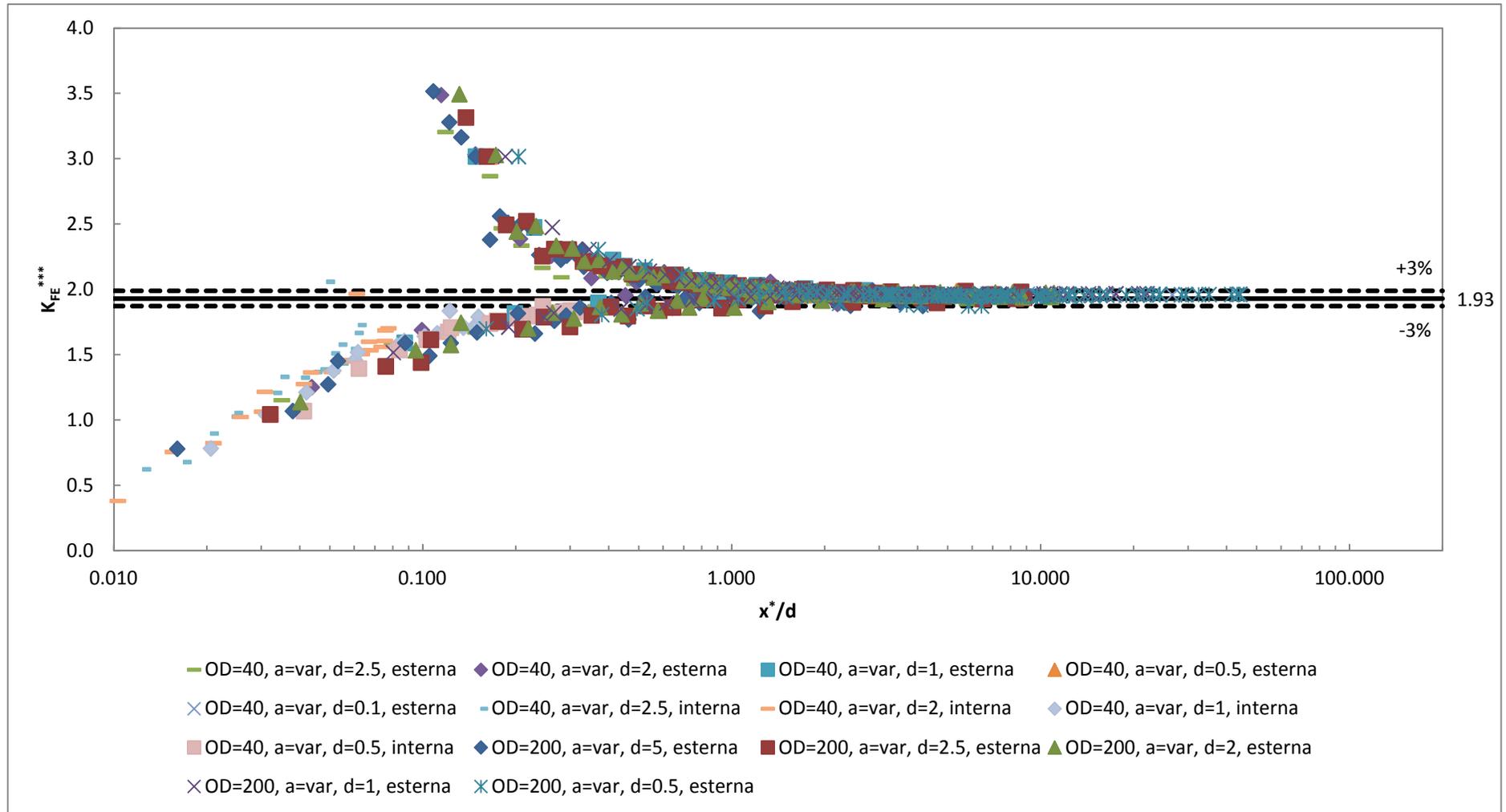


Figura 4.22: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d dove si sono tenute in considerazione tutte le analisi svolte per le geometrie trattate in questo paragrafo; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

4.1.6 - Conclusioni del paragrafo

Si conferma quindi la convergenza del metodo nel caso d'analisi di un provino circolare con cricca estesa a tutta la circonferenza previo l'utilizzo del parametro adimensionale x^*/d per esprimere il K_{FE}^{***} ; il valore di convergenza è pari a 1.93 come dichiarato in [4].

Il limite di convergenza ricavato nel digramma riassuntivo in termini di x^*/d è pari a 2.86 circa; si conclude quindi che per le geometrie in esame per ottenere delle informazioni corrette dal metodo PSM è sufficiente imporre un $x^*/d \geq 3$.

Si è inoltre osservato che nel caso d'analisi di una cricca che origina dall'interno il valore al quale si converge è presumibilmente lo stesso, ma è necessario diminuire ulteriormente la dimensione media d'elemento rispetto al caso di cricca esterna per ottenere valori interni alla banda di dispersione del 3% attorno al valore medio.

4.2 - Giunto a sovrapposizione

4.2.1 - Modello fisico e numerico adottato

Il modello fisico al quale ci si è riferiti in questo paragrafo esula dalla categoria dei giunti saldati e dei comuni componenti criccati; s'intende infatti analizzare un giunto, chiamato a sovrapposizione nel proseguo del lavoro, tra due tubi che sono inseriti uno all'interno dell'altro. Si ribadisce che l'ipotesi fondamentale è quella di non avere saldature tra i due con materiale d'apporto ma un'adesione in una zona ben precisa degli stessi. Si riportano di seguito delle immagini del giunto.

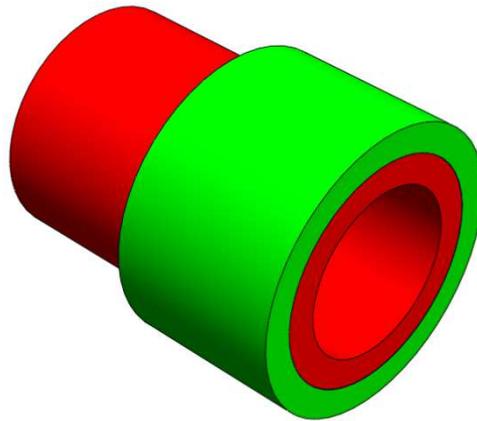


Figura 4.23: Modello adottato per i giunti a sovrapposizione.

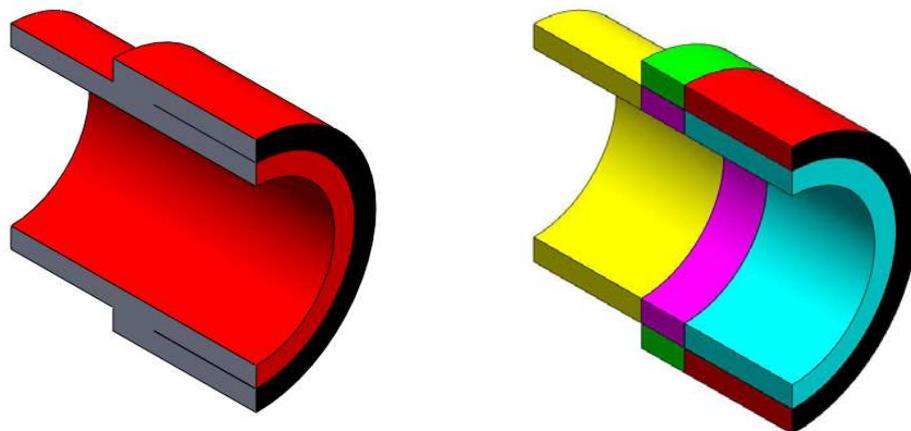


Figura 4.24: Modello adottato utilizzato di seguito per la descrizione del modello fisico.

Come si osserva dalla figura 4.24, dove a sinistra è diagrammato un giunto 3D che ricalca quanto imposto nella geometria in esame, si hanno due tubi sovrapposti saldati l'uno all'altro solo nella parte terminale. Con una geometria di questa tipologia il giunto, immaginando una sollecitazione di torsione, risente della zona dei due tubi non saldata come se quest'ultima fosse una cricca.

Nel modello fisico, riferendosi alla figura 4.24, si ha perciò:

- La parte viola del tubo interno è saldata alla parte verde del tubo esterno;
- La faccia nera del tubo esterno è fissata a terra;
- La zona azzurra del tubo interno e quella rossa di quello esterno non sono collegate tra loro e formano perciò una sorta di cricca sul giunto.

Il modello numerico adottato corrisponde quindi a due tubi dove quello più piccolo per ipotesi possiede un diametro esterno perfettamente uguale a quello interno del tubo maggiore. Data l'assialsimmetria del problema si è semplificato il procedimento eseguendo un'analisi 2D e modellando solo una sezione longitudinale del tubo stesso. I due tubi sono sollecitati a torsione, che è causata da una forza applicata all'estremità del tubo più piccolo, mentre il tubo più grande è vincolato rigidamente a terra mediante la faccia segnata in nero in figura 4.24.

Gli elementi scelti sono i PLANE25, elemento bidimensionale a 4 nodi utilizzato per modellare strutture assialsimmetriche con carichi non assialsimmetrici come la torsione e sono state imposte le Key Options utilizzate di default da Ansys®14, elencate all'inizio del presente capitolo.

Il materiale scelto è comune acciaio, con modulo di resistenza pari a 206000 MPa e coefficiente di Poisson pari a 0.3

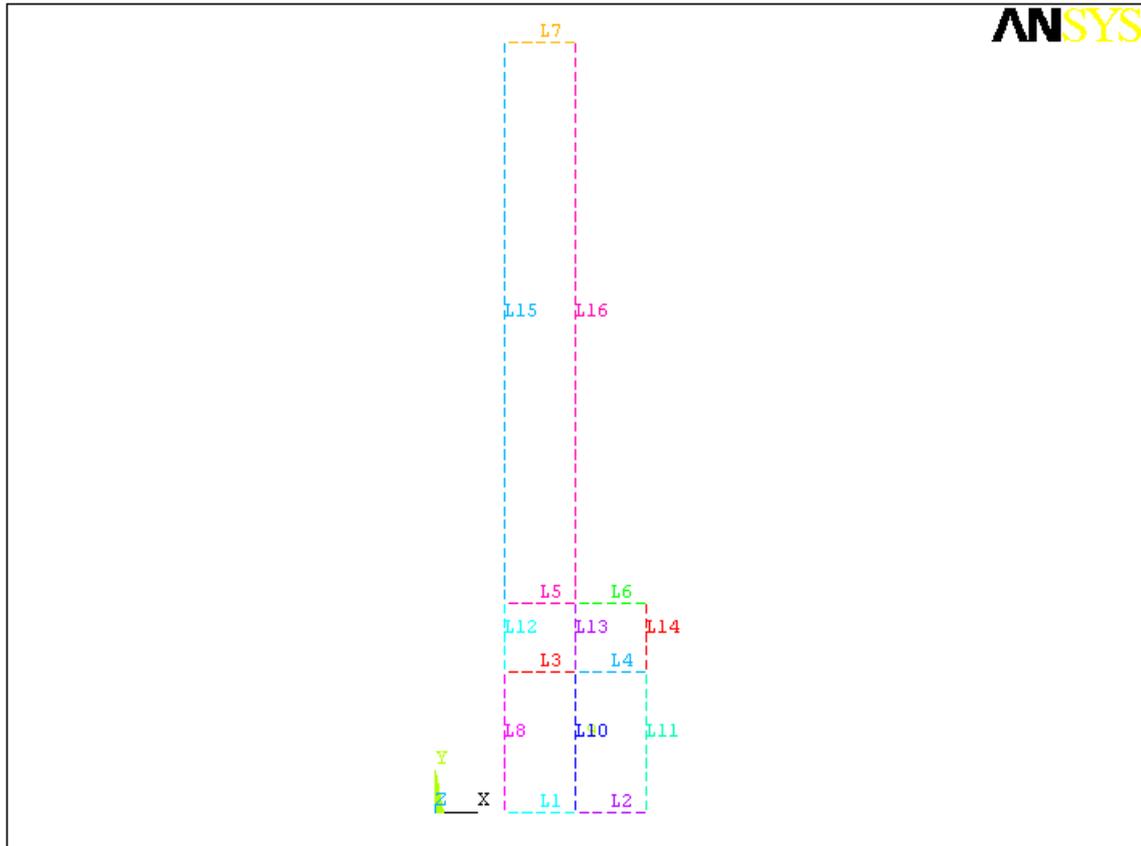


Figura 4.25: Modello numerico 2D adottato.

Le condizioni al contorno applicate sono:

- Vincolo di tutti i gradi di libertà su L2;
- L10 e L9 risultano sovrapposte; le due aree relative non hanno quindi alcun grado di vincolo tra loro come già descritto;
- L13 è la linea che tiene collegati i due tubi perciò è necessario che sia condivisa dalle due aree confinanti;
- Sull'intersezione tra L16 e L7 è stata applicata una forza ortogonale al piano di lavoro.

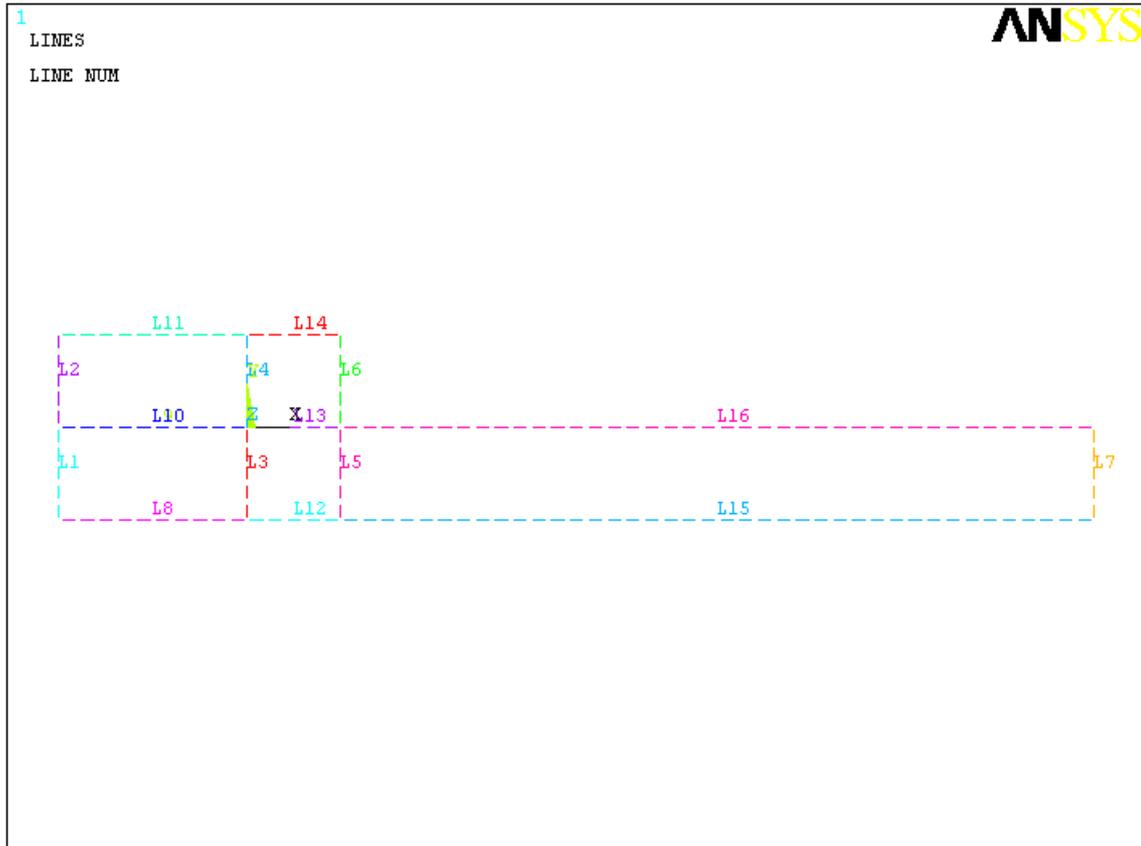


Figura 4.26: Sistema di riferimento adottato.

Come già illustrato per svolgere le analisi NSIF è necessario creare un sistema di riferimento ad hoc, riportato in figura 4.26; poiché in questo caso la L10 e la L9, che sono due linee riferite alle due aree adiacenti, non sono vincolate l'una all'altra allora entrambe agiscono come una cricca e provocano la nascita di un punto di concentrazione delle tensioni.

Nel caso in esame si sono svolte alcune analisi variando le dimensioni principali che caratterizzano il giunto in questione; le variabili utilizzate per la creazione dello stesso sono il diametro maggiore del tubo interno, la lunghezza di sovrapposizione e lo spessore dei tubi.

Di seguito si riporta un'immagine che descrive le grandezze utilizzate:

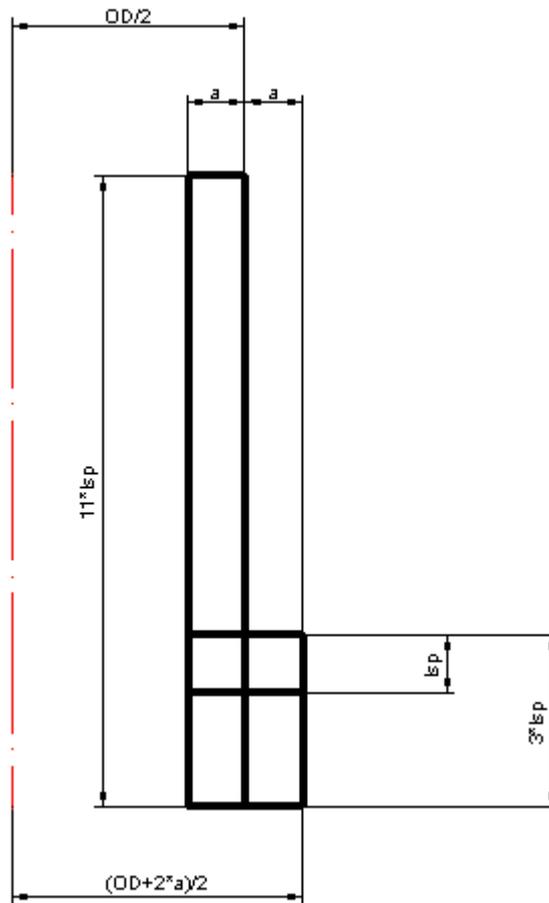


Figura 4.27: Dimensioni che caratterizzano la geometria del giunto.

4.2.2 - Mesh e risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF

In questa parte dell'elaborato si riportano le mesh ottenute utilizzando l'approccio NSIF; nel caso in esame, poiché il numero d'analisi svolte su questa tipologia di giunto non è elevato, si è ricercato manualmente il numero massimo di refine applicabili alla geometria.

Di seguito si riporta un esempio della mesh ottenuta con quest'approccio.

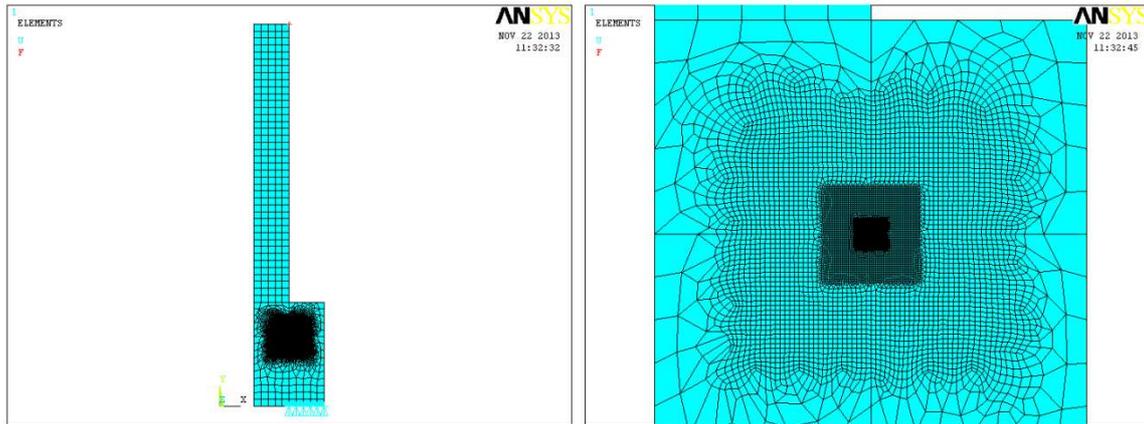


Figura 4.28: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un diametro maggiore del tubo interno pari a 20 mm, uno spessore dei tubi di 5 mm, una lunghezza di sovrapposizione pari a 5 mm e una global element size di 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

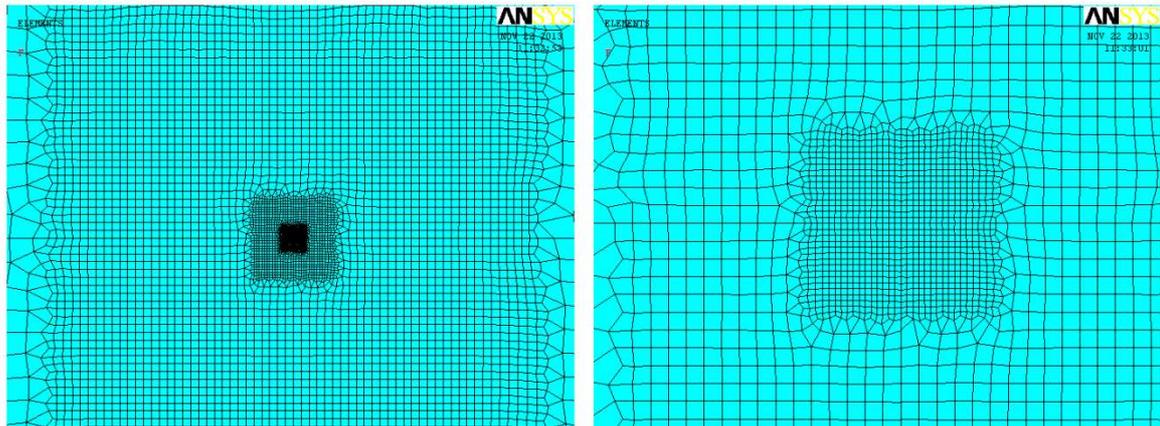


Figura 4.29: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola, pari a circa $4.5 \cdot 10^{-4}$ mm.

In questa sede, per brevità della trattazione, si preferisce non riportare tutti i risultati numerici ottenuti mediante l'approccio NSIF per non appesantire ulteriormente il testo; si ritiene però utile diagrammare tali risultati ricordando che con quest'approccio si ottengono due diverse informazioni cioè il valore del fattore d'intensificazione delle tensioni e l'estensione del campo locale di tensione, entrambi calcolati numericamente.

Dapprima si riporta un esempio di un campo di tensione normalizzato rispetto al valore della tensione nominale; successivamente è diagrammata la distribuzione numerica del fattore d'intensificazione delle tensioni, anch'esso normalizzato rispetto alla stessa quantità.

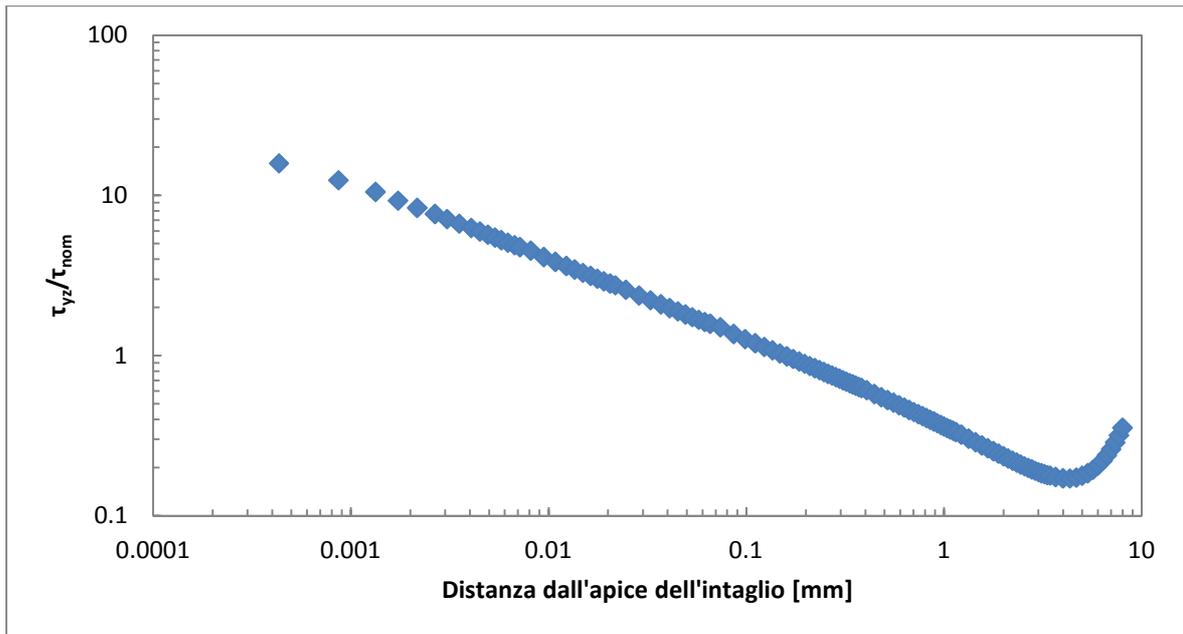


Figura 4.30: Campo di tensione tangenziale locale di strappo, normalizzato rispetto a quella nominale, relativo ad un provino di diametro maggiore del tubo interno pari a 20 mm, uno spessore dei tubi di 5 mm, una lunghezza di sovrapposizione dei due tubi di 5 mm e una global element size pari a 1 mm.

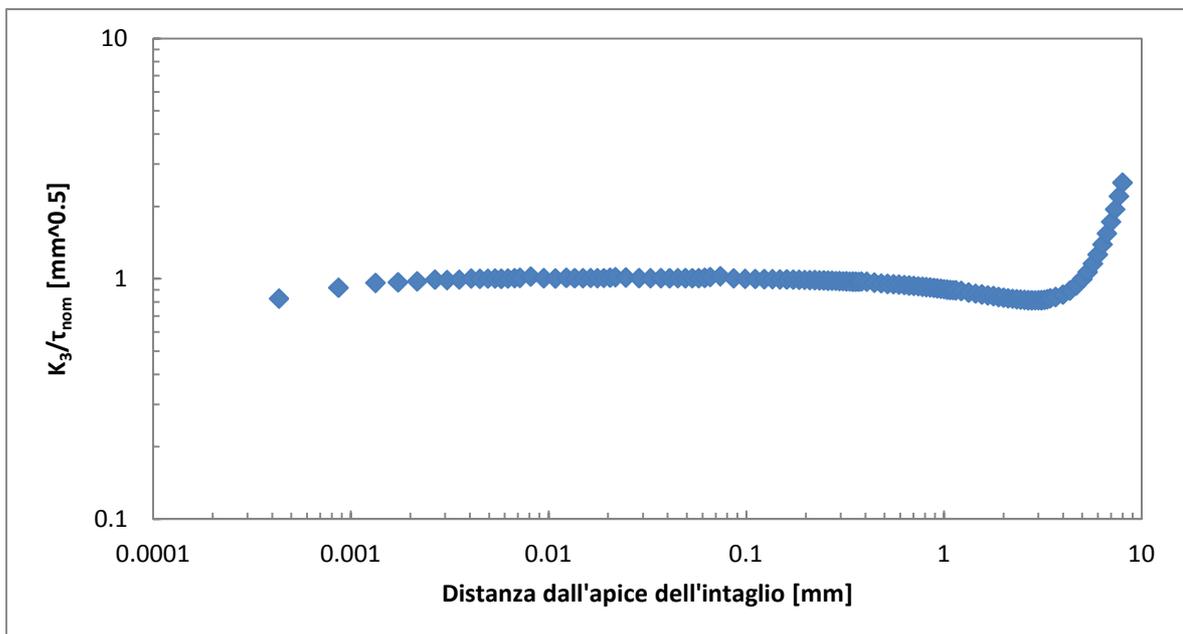


Figura 4.31: Distribuzione del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III, normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale, relativo ad un provino di diametro maggiore del tubo interno pari a 20 mm, uno spessore dei tubi di 5 mm, una lunghezza di sovrapposizione dei due tubi di 5 mm e una global element size pari a 1 mm.

Sono state svolte due tipologie di analisi per questa geometria; le prime fissando le entità geometriche a valori costanti ed effettuando molteplici analisi variando la dimensione

globale d'elemento mentre le seconde utilizzando una global element size fissata e variando solamente lo spessore dei tubi.

Per le prime si è fissato quindi:

- *Diametro maggiore del tubo interno* $\rightarrow OD = 60 \text{ mm}$.
- *Lunghezza di sovrapposizione* $lsp = 5 \div 30 \text{ mm}$ con passo 5 mm.
- *Spessore dei tubi* $\rightarrow a = 10 \text{ mm}$.

Per le seconde si è fissato quindi:

- *Diametro maggiore del tubo interno* $\rightarrow OD = 60 \text{ mm}$.
- *Lunghezza di sovrapposizione* $lsp = 10 \text{ mm}$.
- *Spessore dei tubi* $\rightarrow a = 1 \div 29 \text{ mm}$.

Per le analisi NSIF della prima tipologia si sono analizzate 6 differenti configurazioni geometriche per le quali si è variata la dimensione globale d'elemento; si è ottenuto:

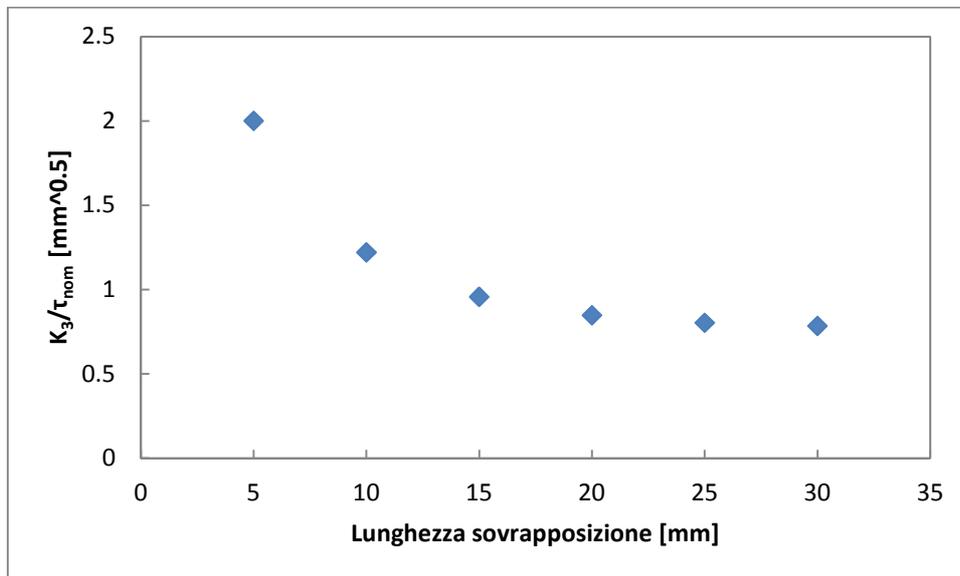


Figura 4.32: Andamento del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III numerico, normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale, in funzione della lunghezza di sovrapposizione; questo caso si riferisce a una geometria con diametro maggiore del tubo interno pari a 60 mm e ad uno spessore dei tubi uguale a 10 mm.

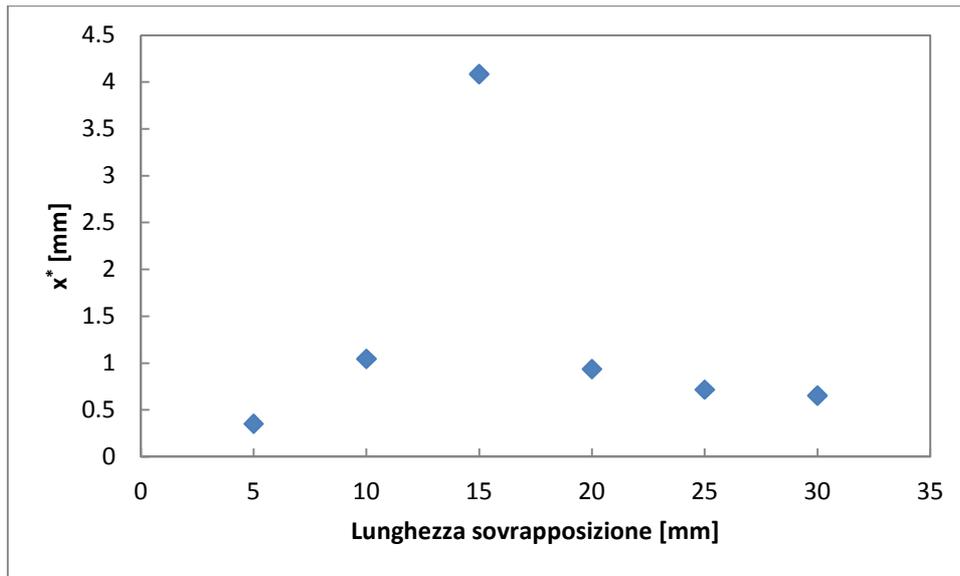


Figura 4.33: Andamento dell'estensione del campo locale di tensione in funzione della lunghezza di sovrapposizione; questo caso si riferisce a una geometria con diametro maggiore del tubo interno pari a 60 mm e ad uno spessore dei tubi uguale a 10 mm.

Si osserva inoltre che all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione dei due tubi si ha una diminuzione del fattore di intensificazione delle tensioni di modo III normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale applicata; questo è dovuto all'abbassamento del campo locale di tensione che si osserva avvenire all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione (vedere figura successiva dove si sono diagrammati i campi di tensione dei casi analizzati al variare della lunghezza di sovrapposizione).

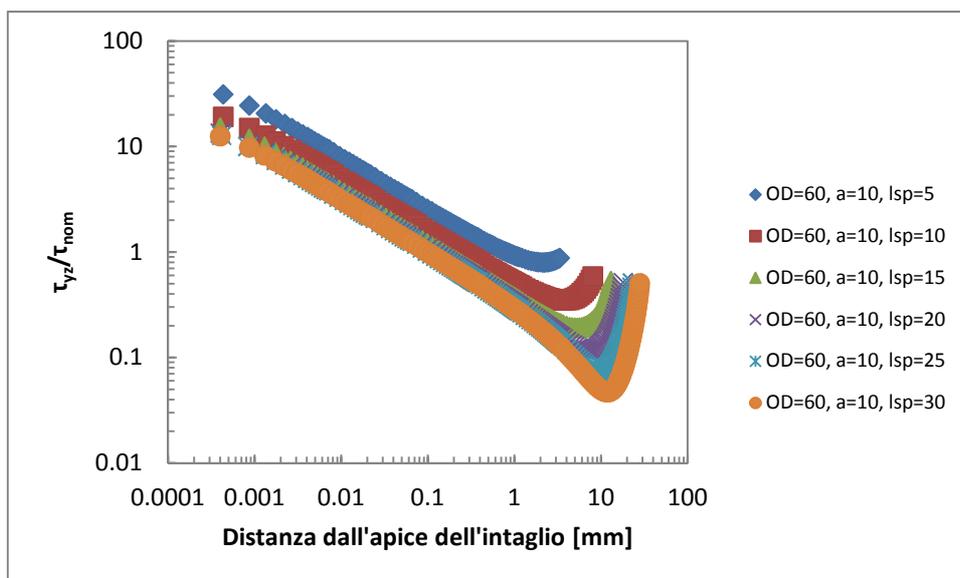


Figura 4.34: Andamento dei campi di tensione locali. Ogni curva è ottenuta fissando le dimensioni geometriche e variando la dimensione globale d'elemento; il diametro maggiore del tubo interno è fissato a 60 mm e lo spessore dei tubi a 10 mm.

Altra peculiarità osservata al variare della lunghezza di sovrapposizione è che benché al variare delle analisi il parametro a , che in questo caso si è assunto essere lo spessore del tubo, rimanga costante si ha una variazione dell'estensione del campo locale di tensione x^* ; questo comporta grosse differenze in fase d'analisi dei risultati poiché esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di a/d si otterrebbe una serie di punti posizionati lungo una retta verticale, mentre esprimendolo in funzione di x^*/d i punti si trovano a diverse posizioni rispetto all'asse delle ascisse. Sarebbe inoltre possibile cambiare la definizione di a per evitare questa problematica, ma non si vuole approfondire questo aspetto in questa sede.

Per le analisi NSIF della seconda tipologia, nella quale si ricorda si fa variare lo spessore del tubo mantenendo inalterata lo global element size, si è ottenuto:

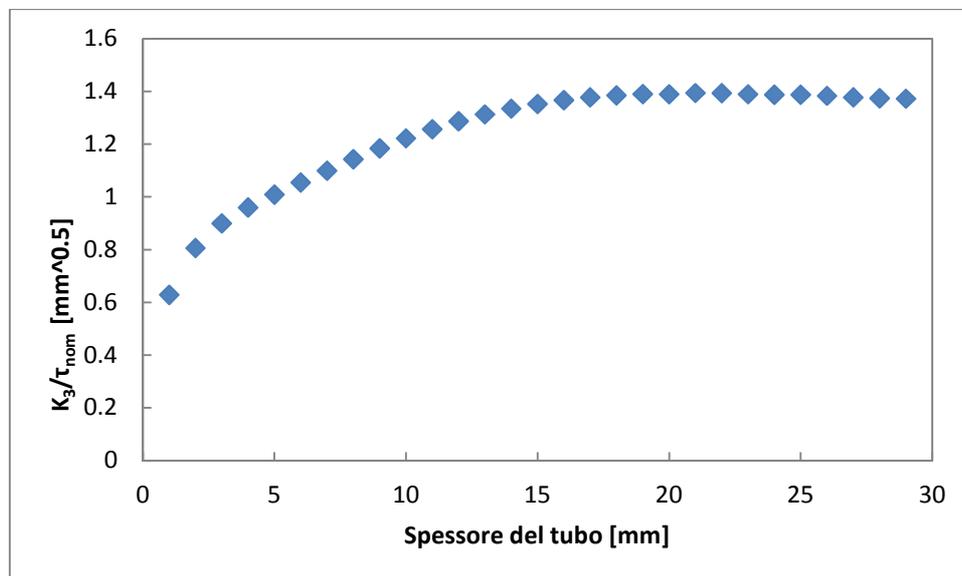


Figura 4.35: Andamento del fattore d'intensificazione delle tensioni di modo III numerico, normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale, in funzione dello spessore del tubo; questo caso si riferisce a una geometria con diametro maggiore del tubo interno pari a 60 mm e ad lunghezza di sovrapposizione pari a 10 mm.

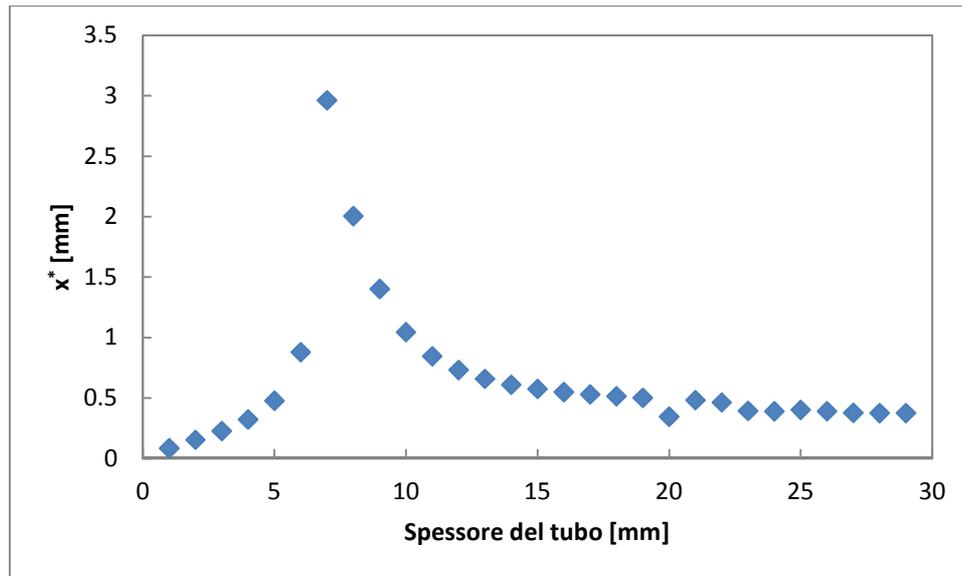


Figura 4.36: Andamento dell'estensione del campo locale di tensione in funzione dello spessore del tubo; questo caso si riferisce a una geometria con diametro maggiore del tubo interno pari a 60 mm e ad lunghezza di sovrapposizione pari a 10 mm.

In questo caso nel quale si va variare solo lo spessore del tubo si osserva che all'aumentare di quest'ultimo si ha dapprima un aumento del valore del fattore d'intensificazione delle tensioni normalizzato rispetto alla tensione nominale e successivamente una stabilizzazione dello stesso intorno ad un valore pressoché costante; in termini d'estensione del campo locale di tensione si osserva ancora una volta un primo aumento seguito da una successiva diminuzione della stessa.

4.2.3 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Per svolgere le suddette analisi si è sviluppato un programma Matlab® ad hoc; esso ripercorre ugualmente lo schema che si è già descritto per le geometrie trattate in precedenza.

Si elencano di seguito i vari input da fornire al programma per il suo corretto funzionamento.

1. Riga 14 - Variabile "start". Se posta = 0 il programma crea solamente il file apdl e termina la propria esecuzione, mentre se posta = 1 il programma crea il file apdl, lancia un'esecuzione batch di Ansys® ed esegue il postprocess dei risultati;

2. Riga 20 - Variabile "NSIF". Se $post = 1$ il programma esegue l'analisi dell'intaglio attraverso il metodo NSIF, mentre se $post = 0$ il programma esegue un'analisi sfruttando il PSM;
3. Riga 92 - Variabile "de". Specifica il diametro maggiore del tubo interno in mm;
4. Riga 93 - Variabile "lsp". Specifica la lunghezza di sovrapposizione dei due tubi in mm;
5. Riga 94 - Variabile "TAU". Specifica la tensione tangenziale lorda applicata al tubo interno in MPa;
6. Riga 99 - Variabile "Tabsize". In questa variabile a più dimensioni s'inseriscono in successione gli spessori dei tubi a (vedere figura 4.27) da testare durante la batteria d'analisi;
7. Riga 40 - Variabile "Tabelem". Questa variabile ha due significati in funzione del valore di "NSIF". Se "NSIF" = 1, e quindi si sta svolgendo un'analisi col metodo NSIF, "Tabelem" è una costante che corrisponde alla global element size della mesh che si userà per ogni analisi svolta nella batteria; se, invece, "NSIF" = 0 e quindi si sta svolgendo un'analisi sfruttando il PSM, "Tabelem" è un vettore che contiene nelle sue celle le varie dimensioni globali di elemento da utilizzare per analisi successive.

4.2.4 - Layout delle mesh utilizzate mediante applicazione del PSM

La mesh ottenuta in questi casi è realizzata solamente imponendo una global element size e lanciando l'algoritmo di meshatura free; poiché la geometria in esame è composta unicamente da rettangoli, lanciando l'algoritmo free si ottiene sempre una mesh molto regolare anche al variare delle dimensioni geometriche.

Di seguito si riporta un esempio di mesh ottenuta mediante questo approccio.

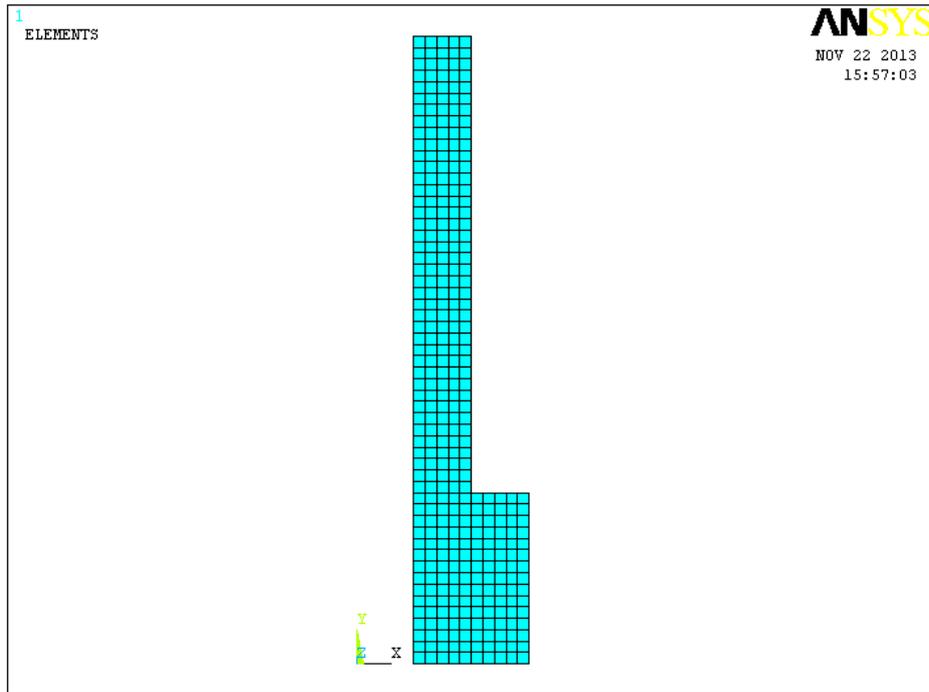


Figura 4.37: Mesh ottenuta applicando il PSM; questo caso si riferisce a una geometria con diametro maggiore del tubo interno pari a 20 mm, ad lunghezza di sovrapposizione pari a 5 mm e ad uno spessore del tubo pari a 5 mm.

4.2.5 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

4.2.5.1 - Risultati ottenuti fissando la geometria e variando la dimensione globale d'elemento

Come premesso la prima tipologia d'analisi svolte consiste nel fissare la geometria e svolgere la batteria d'analisi variando la dimensione globale d'elemento; si riportano di seguito i risultati in termini di K_{FE}^{***} calcolato.

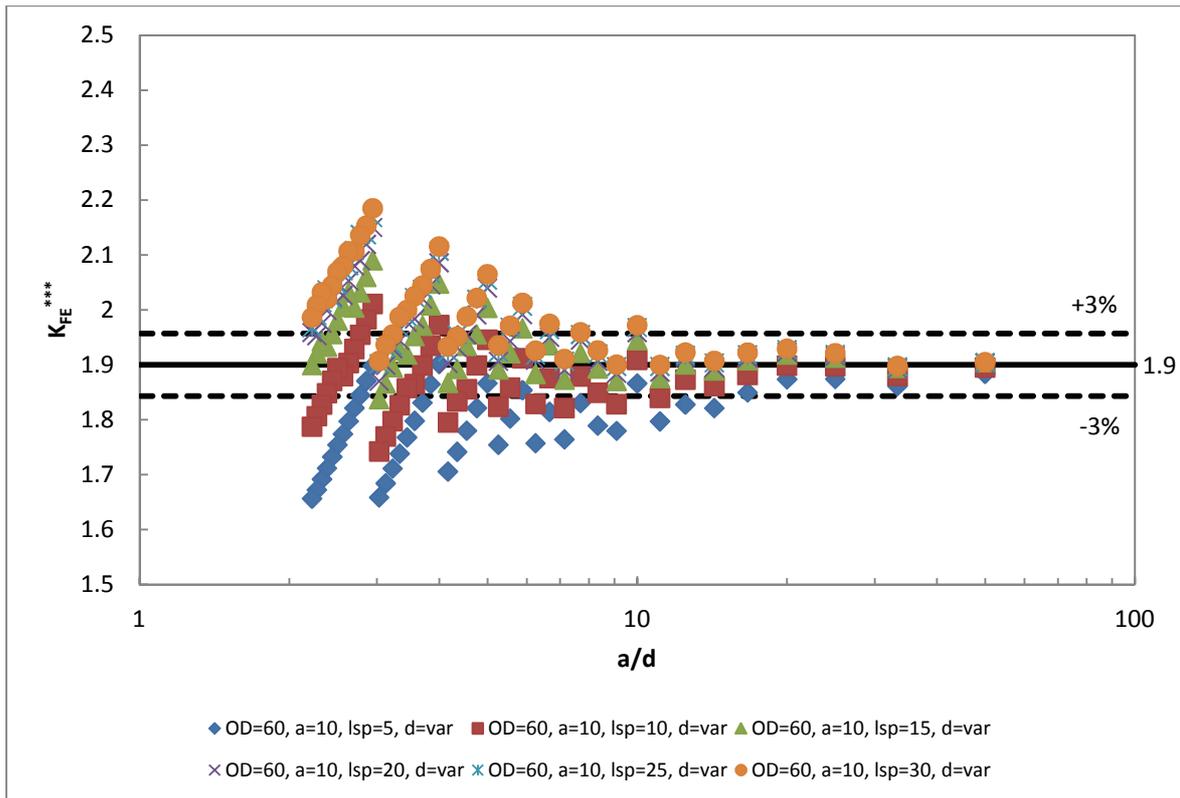


Figura 4.38: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando le dimensioni geometriche e variando la dimensione globale d'elemento. Il valore medio calcolato è pari a 1.9; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

Dapprima s'intende far notare come diagrammando il grafico in funzione di a/d , a causa del valore di a (spessore del tubo) costante al variare delle curve, si ottengono dei punti posizionati lungo rette verticali; in generale si può affermare che un aumento della lunghezza di sovrapposizione determina un aumento del valore del K_{FE}^{***} a parità di tutte le altre condizioni.

Ciò che si osserva in termini di a/d è che tutti i casi rientrano nella banda d'accettabilità del 3% rispetto al valore medio; quest'ultimo, calcolato per questa geometria, è pari a 1.9 e differisce del 1.6% rispetto a quello suggerito in letteratura nel caso di modo III [4] (pari a 1.93), nel quale però non si teneva conto di geometrie di questa tipologia. Si osserva inoltre che per assicurare la convergenza del metodo con delle bande del 3% è necessario imporre un $a/d \geq 17$; si noti che in letteratura [4], nel caso d'analisi alla radice dei cordoni di saldatura, si suggerisce un valore limite pari a 12, sempre assumendo a pari allo spessore del tubo. Si osserva quindi che la geometria in esame si rivela più esigente in termini di raffinatezza della mesh rispetto ai casi d'analisi alla radice dei cordoni di saldatura.

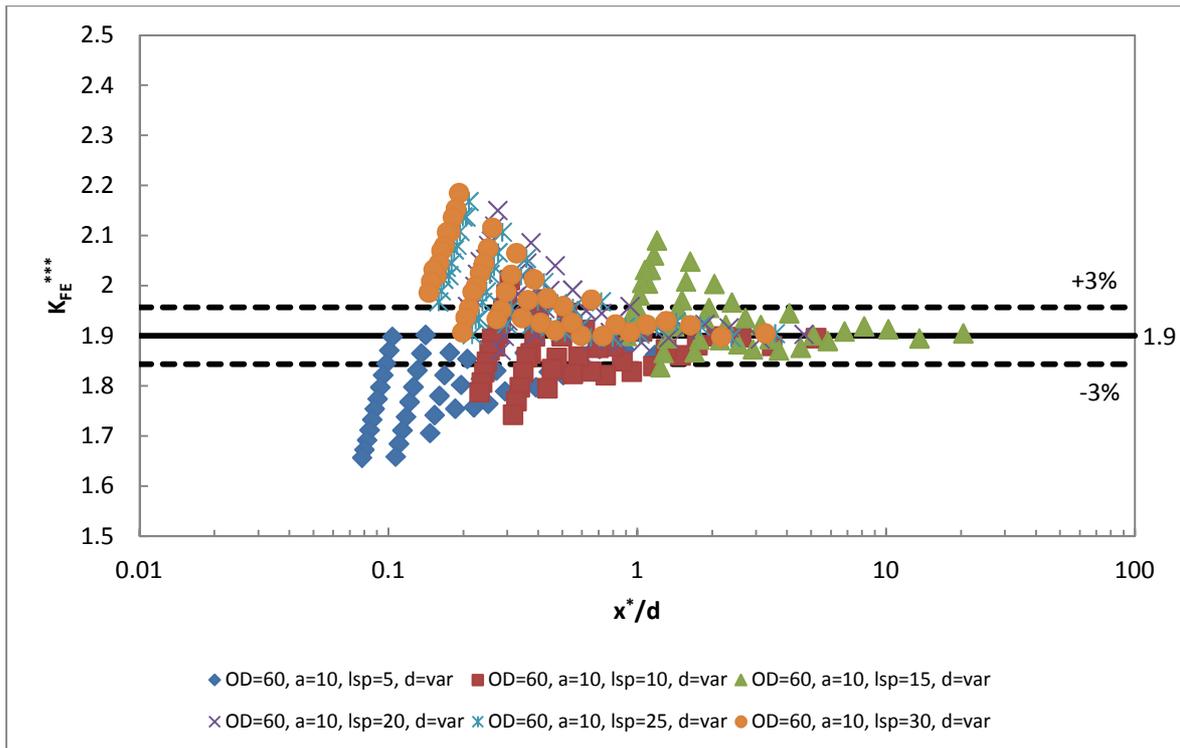


Figura 4.39: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando le dimensioni geometriche e variando la dimensione globale d'elemento. Il valore medio calcolato è pari a 1.9; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

Anche in termini di x^*/d si osserva la convergenza del metodo; in questo caso i punti non sono più disposti lungo rette verticali, ma assumono valori differenti dell'ascissa. Si nota inoltre che per una lunghezza di sovrapposizione di 15 mm i valori convergono per un x^*/d elevato, mentre per valori minori e maggiori della stessa il metodo converge prima; il limite di convergenza assunto in questo caso è pari a 3.

4.2.5.2 - Risultati ottenuti fissando la dimensione globale d'elemento e variando lo spessore dei tubi

La seconda tipologia d'analisi effettuata, come premesso, consiste nello fissare la dimensione globale d'elemento e variare solamente lo spessore dei tubi.

Si riportano di seguito i risultati in termini di K_{FE}^{***} calcolato.

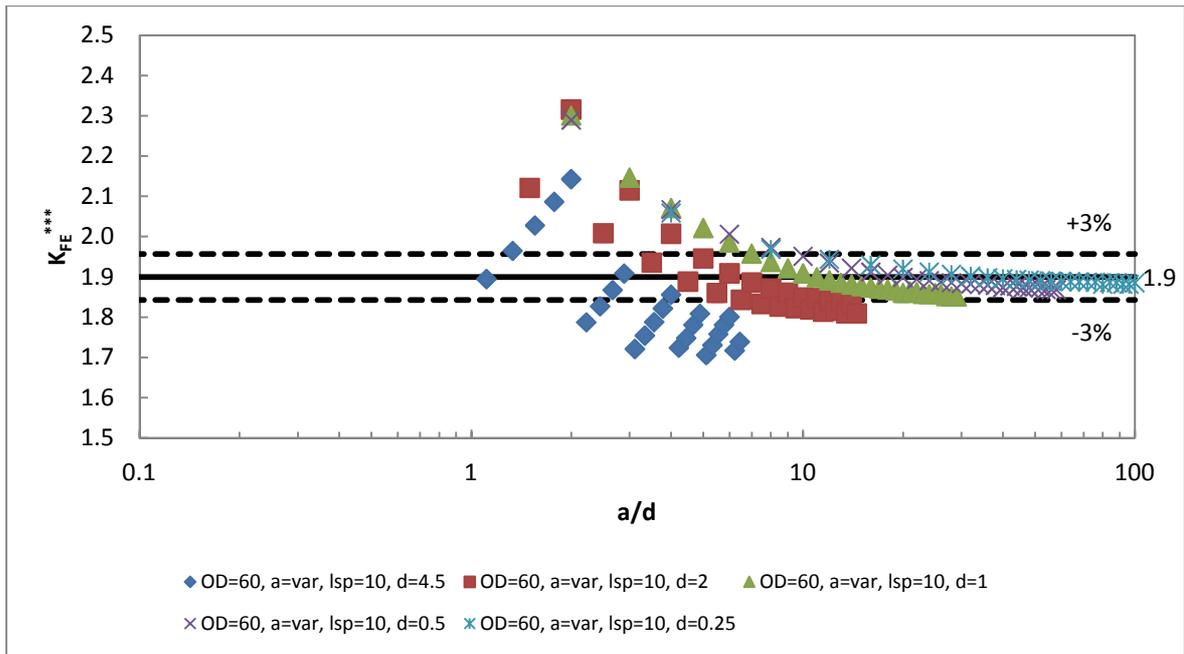


Figura 4.40: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della lunghezza di sovrapposizione, della dimensione globale d'elemento e del diametro esterno del tubo interno e variando lo spessore dei tubi. Il valore medio calcolato è pari a 1.9; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

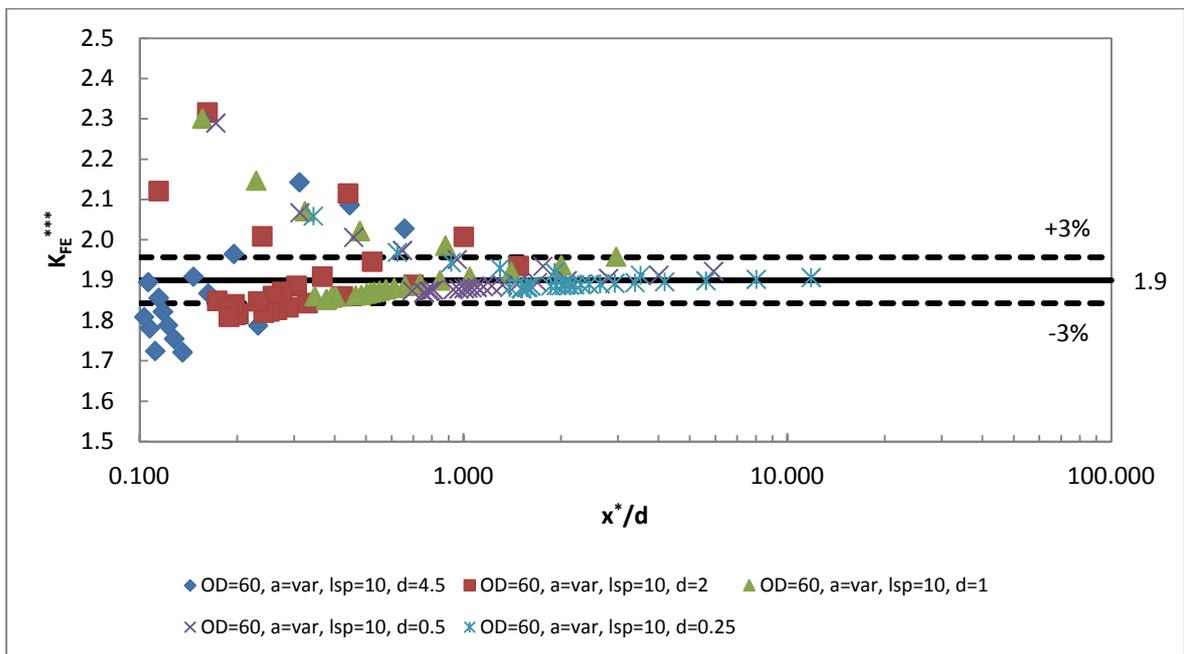


Figura 4.41: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della lunghezza di sovrapposizione, della dimensione globale d'elemento e del diametro esterno del tubo interno e variando lo spessore dei tubi. Il valore medio calcolato è pari a 1.9; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore medio.

Si osserva quindi che, diagrammando i risultati in termini di a/d a valori elevati di questo parametro i punti tendono effettivamente a convergere all'interno della banda d'accettabilità del 3% dal valore medio, ma solamente nei casi di dimensione globale d'elemento inferiore ad 1 mm; in tutti gli altri casi i risultati non convergono all'interno della banda. Inoltre anche per global element size inferiori ad 1 mm si nota che il valore di convergenza finale è inferiore al valore medio precedentemente calcolato pari a 1.9.

Ciò che si osserva nel secondo diagramma, quello nel quale si sono espressi i risultati in termini di x^*/d , è ancora il buon funzionamento del metodo ma con alcune differenze rispetto al caso precedente: la prima è che anche i risultati con global element size maggiore o uguale ad 1 mm tendono a convergere all'interno della banda d'accettabilità del 3% e la seconda è che tutti i risultati convergono nuovamente al valore medio di 1.9 coerente con quanto ricavato nel sottoparagrafo 4.2.5.1.

4.2.6 - Conclusioni del paragrafo

Si conferma quindi la convergenza del metodo nel caso d'analisi di un giunto a sovrapposizione; entrambe le definizioni del parametro di convergenza forniscono buoni risultati, ma si è osservato un comportamento migliore quando il valore di K_{FE}^{***} è diagrammato in funzione di x^*/d ; il valore di convergenza è pari a 1.9, ed è coerente con quanto indicato in [4].

Il limite di convergenza ricavato nel digramma riassuntivo in termini di x^*/d è pari a 3 nei casi peggiori che si sono analizzati, mentre in termini di a/d è uguale a 17.

4.3 - Provino circolare sollecitato a torsione con intaglio esteso a tutta la circonferenza

4.3.1 - Modello fisico e numerico

Il modello fisico al quale si è fatto riferimento durante l'analisi è quello di un provino circolare, di diametro OD, con un intaglio esteso lungo tutta la circonferenza e posizionato alla mezzzeria; quest'ultimi hanno profondità a e angolo d'apertura 2α variabile. La sollecitazione di modo III all'intaglio è stata ottenuta imponendo due momenti torcenti uguali e opposti alle estremità del provino; di seguito si riportano alcune immagini che descrivono il modello adottato.

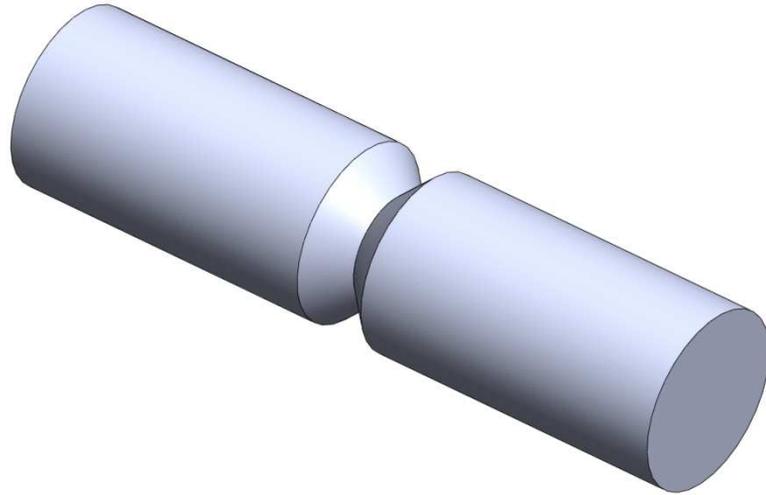


Figura 4.42: Modello di un provino circolare con intaglio lungo tutta la circonferenza e posizionato in mezzeria.

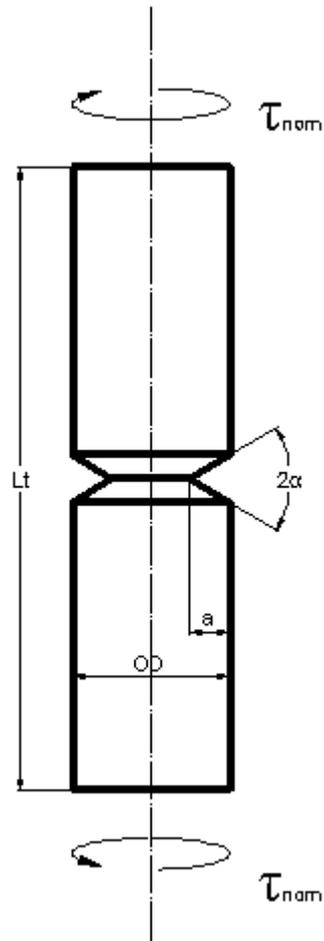


Figura 4.43: Modello fisico adottato per le analisi di un provino circolare con intaglio lungo tutta la circonferenza sollecitato a modo III.

A partire dal modello fisico si è ricavato quello numerico; si è deciso di utilizzare un modello 2D e data l'assialsimmetria e la simmetria della geometria è possibile semplificare quest'ultimo modellando solamente un quarto di provino, ottenendo una configurazione come in figura 4.44. La tipologia d'elemento scelta in questo caso è il PLANE25, elemento bidimensionale a 4 nodi utilizzato per modellare strutture assialsimmetriche con carichi non assialsimmetrici come la torsione. Ogni nodo possiede 3 gradi di libertà che corrispondono alle traslazioni nelle 3 direzioni.

Il materiale scelto per le analisi è acciaio con modulo d'elasticità pari a 206000 MPa e coefficiente di Poisson uguale a 0.3.

La sollecitazione di torsione sul provino è invece modellata mediante l'utilizzo di una forza F ortogonale al piano, come indicato in figura 4.44; la lunghezza del provino è tale da garantire un campo di tensione uniformato, cioè che non risente più degli effetti dell'applicazione di una forza concentrata, presso l'intaglio.

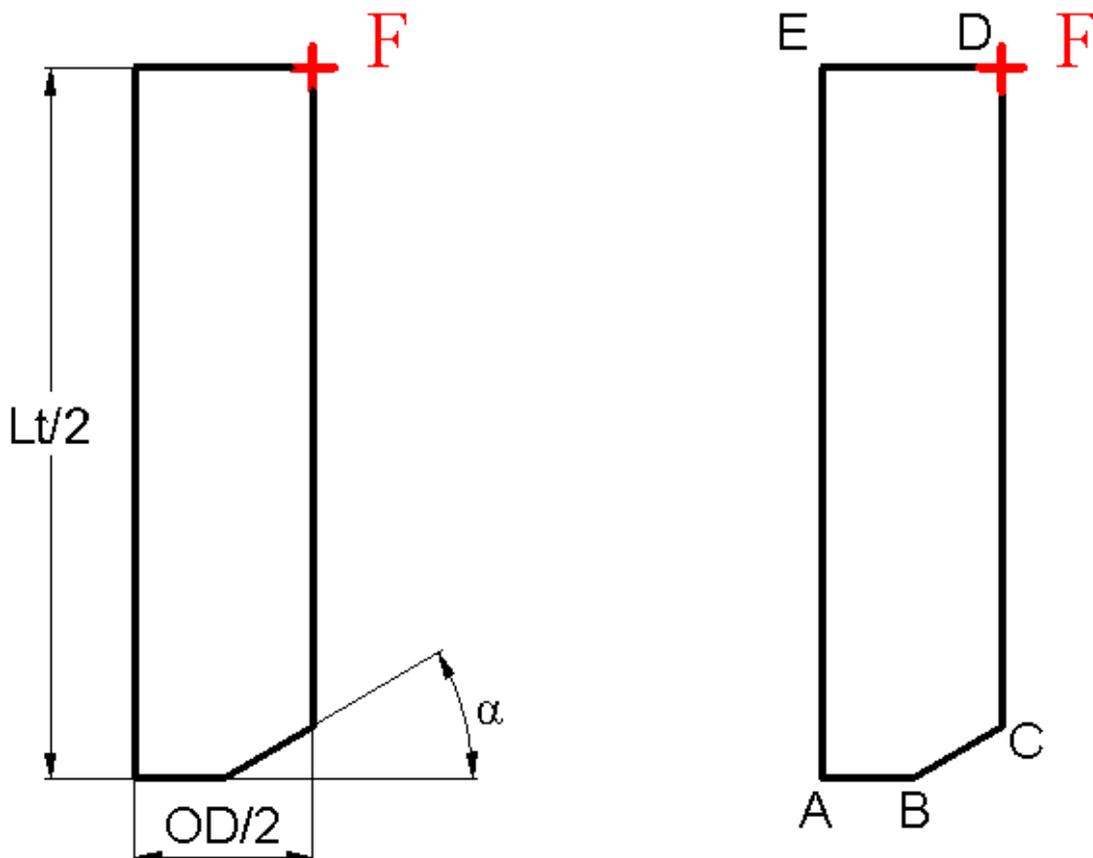


Figura 4.44: Modello semplificato utilizzato per le analisi numeriche dove si è sfruttata l'assialsimmetria e la simmetria del problema originale. La tensione di torsione sul provino è modellata sfruttando una forza F ortogonale al piano.

Per ottenere una sollecitazione di modo III e ricostruire il modello completo è necessario imporre alcune condizioni in quello semplificato; riferendosi alla figura 4.44 si ha:

- Antisimmetria sulla linea AB;
- Vincolo in A che blocca le traslazioni in direzione verticale, necessario per rimuovere la labilità che si avrebbe altrimenti;
- Forza F ortogonale al piano d'analisi per simulare lo sforzo di torsione applicata al punto D.

Come già illustrato nei casi precedenti per svolgere l'analisi NSIF è necessario creare un sistema di riferimento locale con l'origine sul punto di singolarità geometrica, con la direzione y ortogonale alla bisettrice dell'angolo e con la direzione x rivolta verso la sezione resistente del provino. Di seguito è riportata una figura di dettaglio del sistema di riferimento locale adottato.

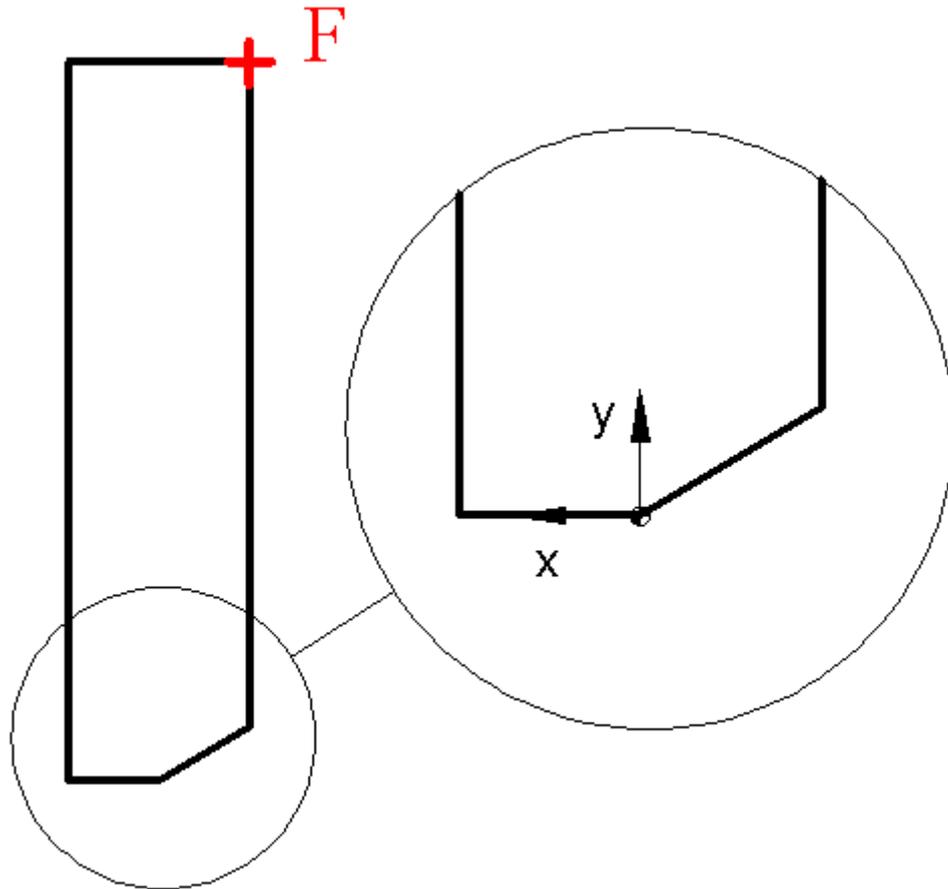


Figura 4.45: Sistema di riferimento locale adottato per una corretta analisi tramite gli NSIFs.

Nel caso in esame le dimensioni scelte per l'analisi sono:

- *Diametro esterno* $\rightarrow OD = 30 \text{ mm}$;
- *Lunghezza totale della piastra* $\rightarrow L_t = 120 \text{ mm}$;
- *Dimensione caratteristica dell'intaglio* $\rightarrow a = 1 \div 14 \text{ mm}$;
- *Angolo di apertura* $\rightarrow 2\alpha = [0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ; 120^\circ; 135^\circ; 150^\circ]$

4.3.2 - Mesh ottenute tramite l'approccio NSIF

In questa parte dell'elaborato si riportano le mesh ottenute utilizzando l'approccio NSIF; anche in questo caso si è sfruttato il programma automatico per ricercare il numero massimo dei refine applicabili per ogni singola geometria prima di ottenere il messaggio

d'errore da parte di Ansys® dovuto al raggiungimento della più piccola dimensione d'elemento gestibile. Si riportano di seguito alcuni esempi di mesh, ottenute con questo approccio, al variare dell'angolo d'apertura dell'intaglio.

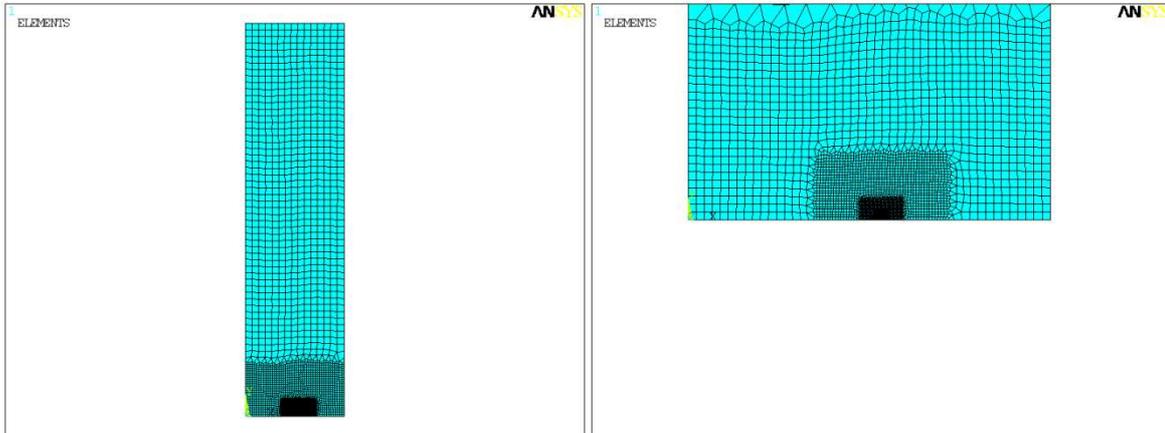


Figura 4.46: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 0° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

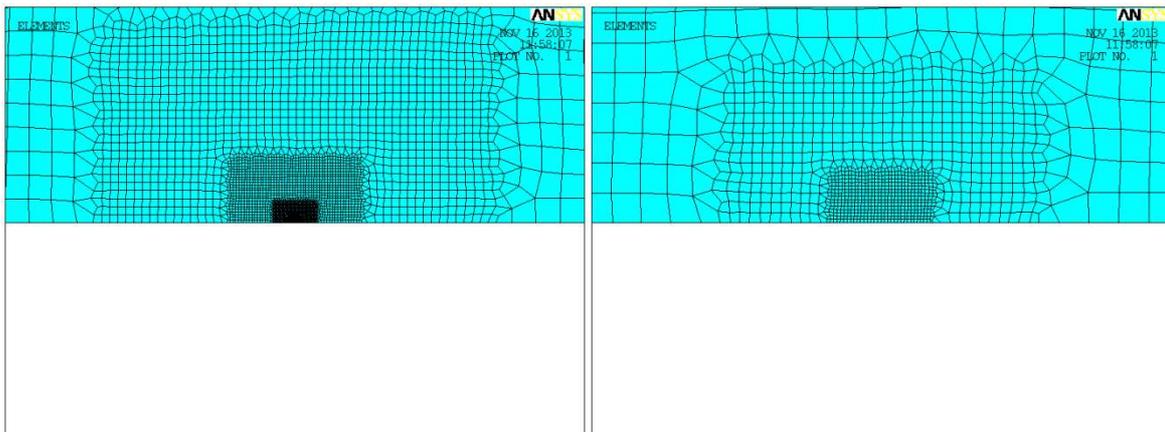


Figura 4.47: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

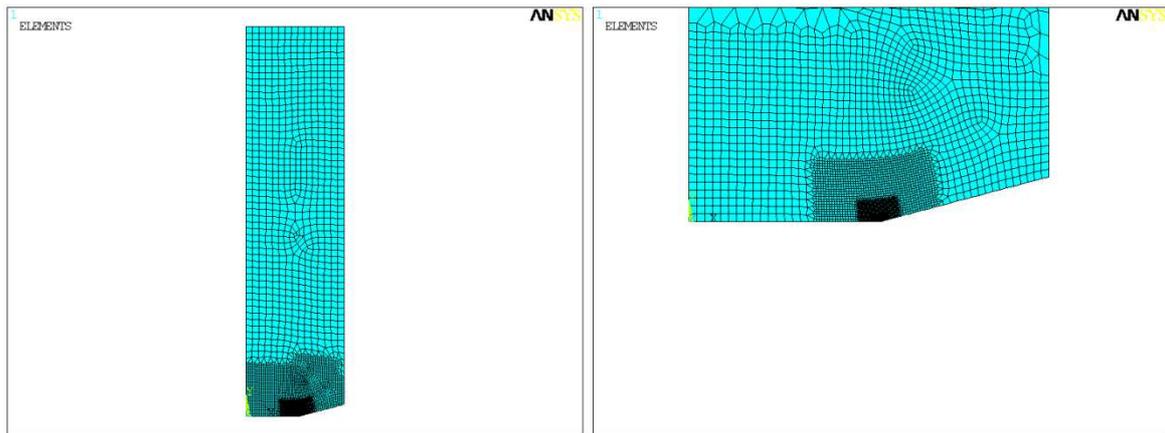


Figura 4.48: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 30° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

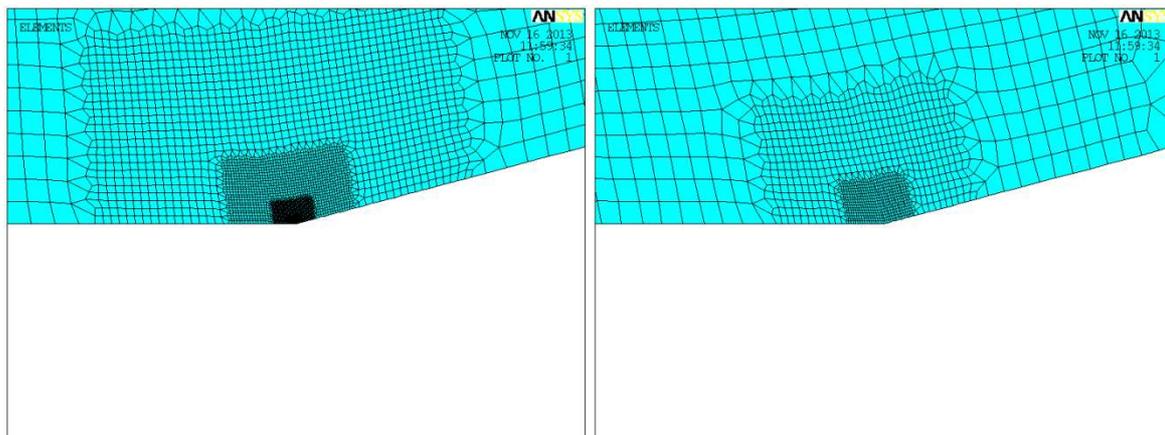


Figura 4.49: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

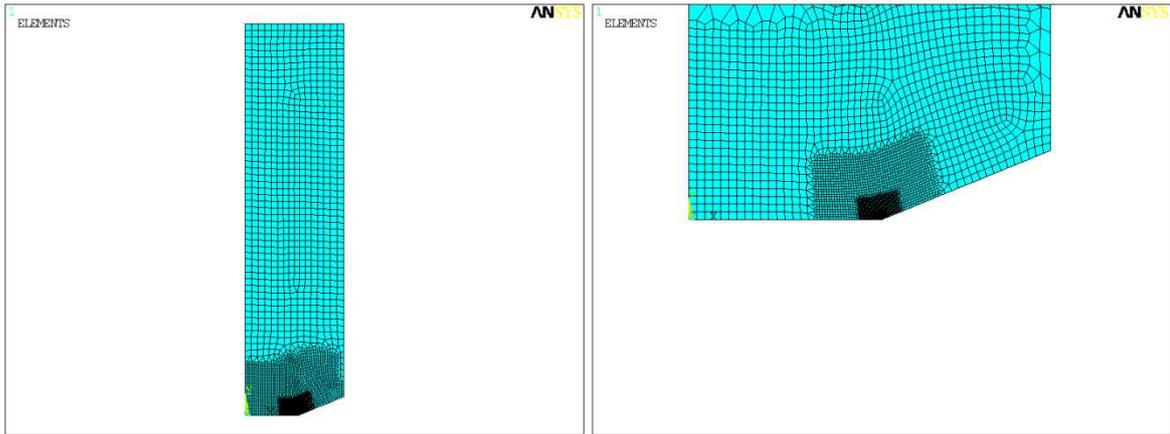


Figura 4.50: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 45° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

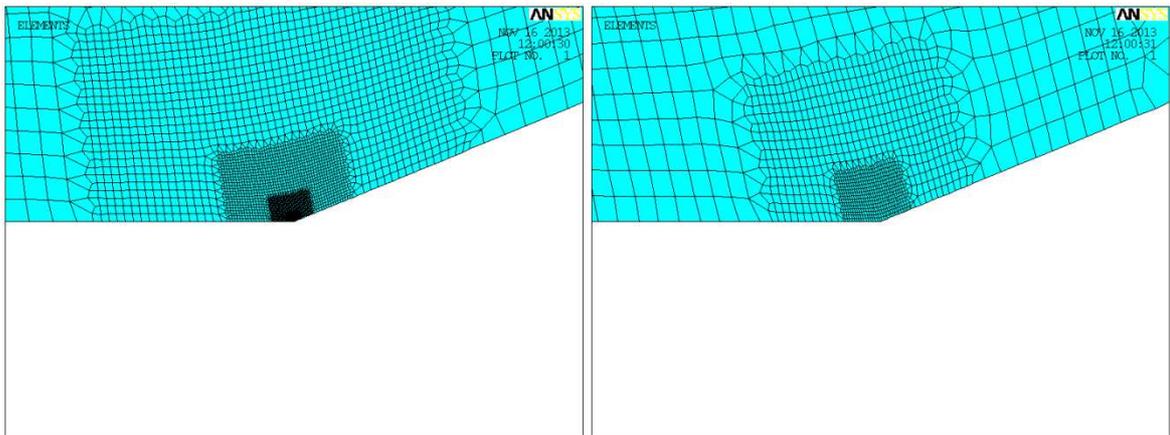


Figura 4.51: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

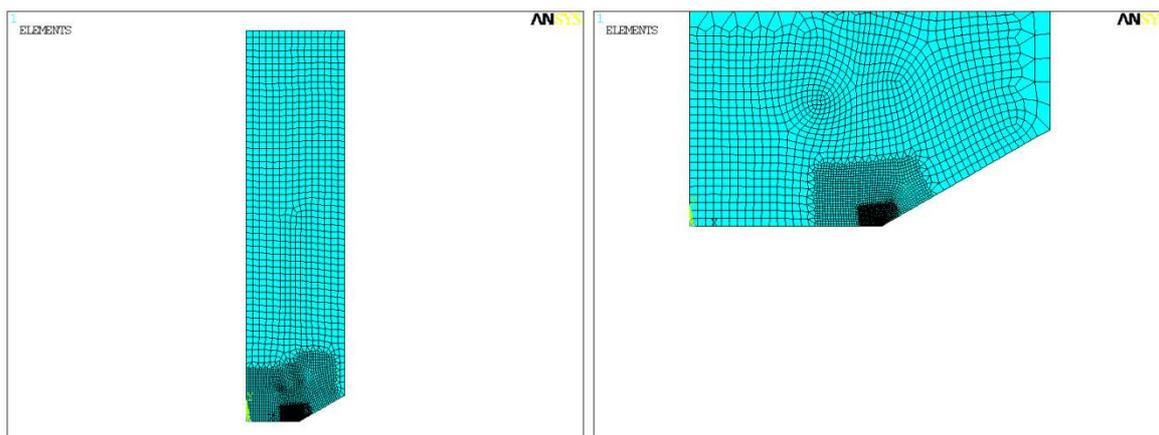


Figura 4.52: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 60° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

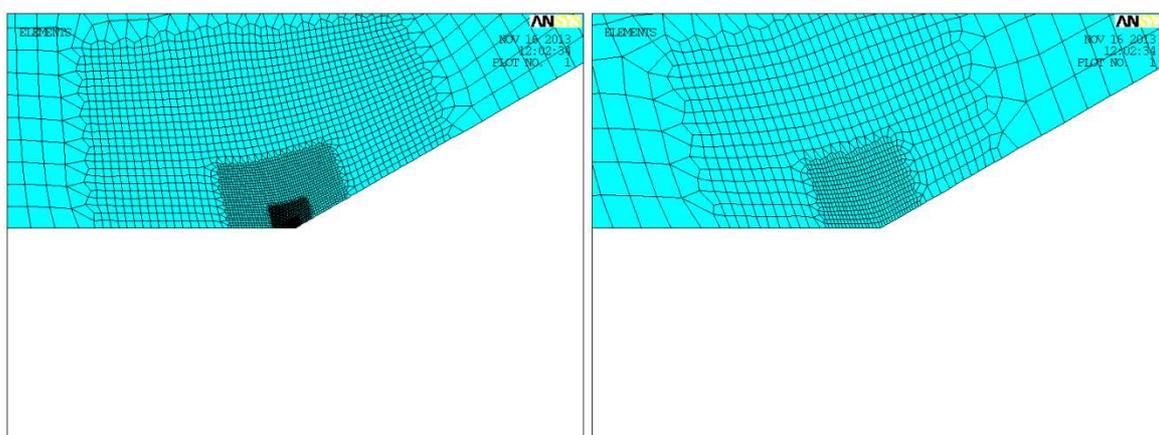


Figura 4.53: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

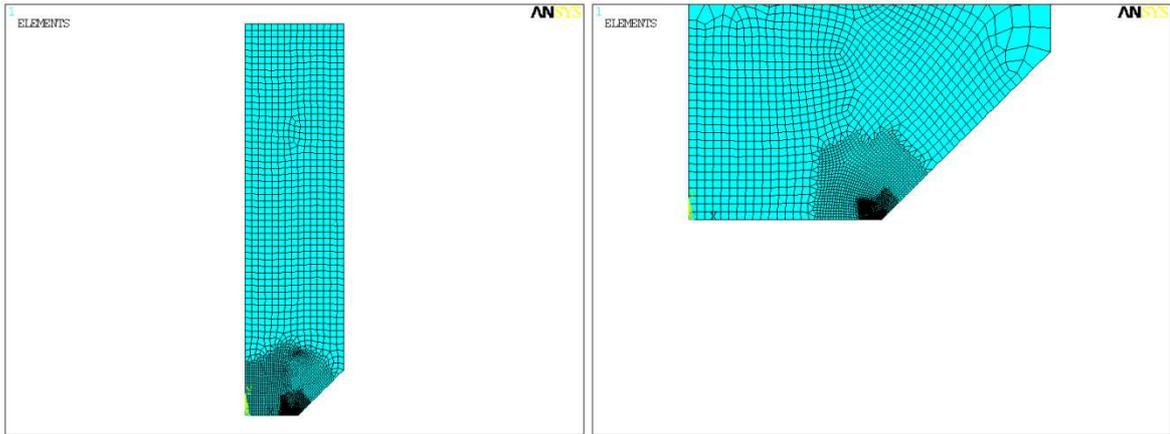


Figura 4.54: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 90° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

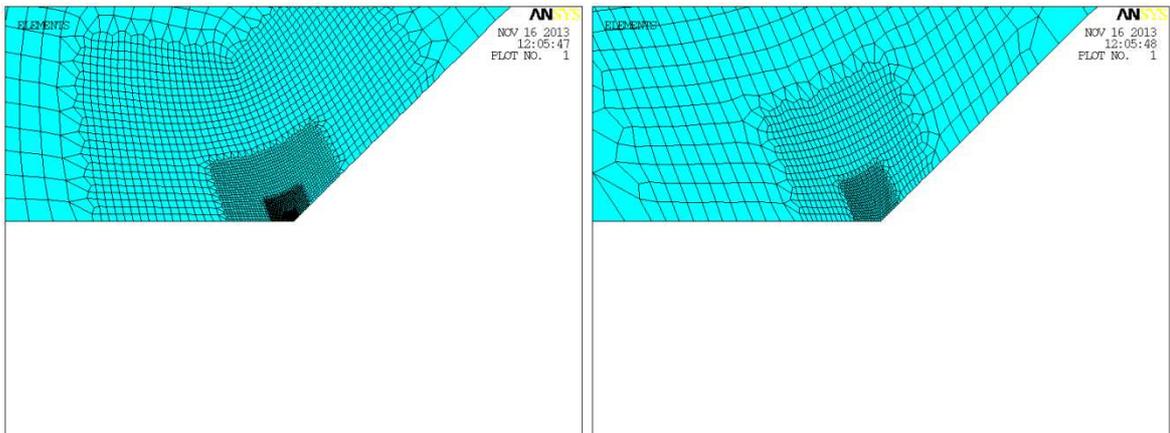


Figura 4.55: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

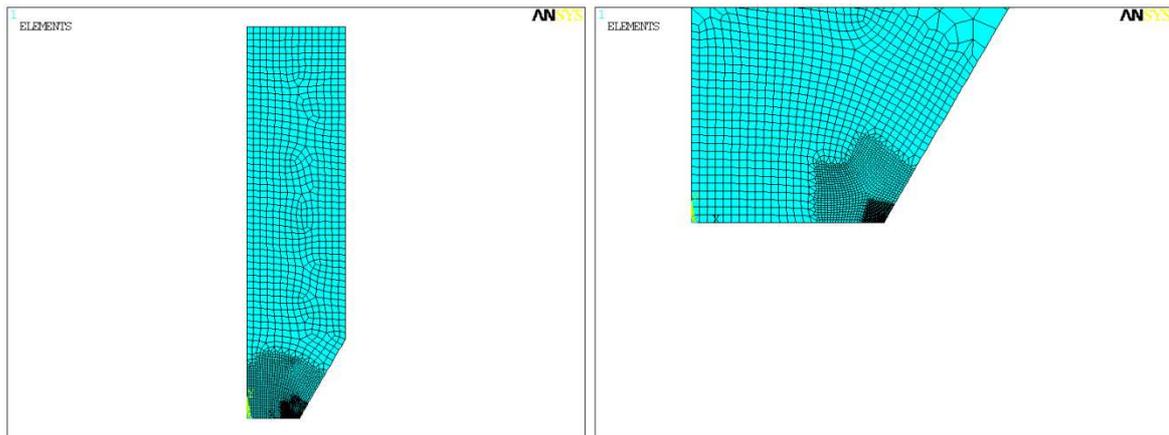


Figura 4.56: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 120° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

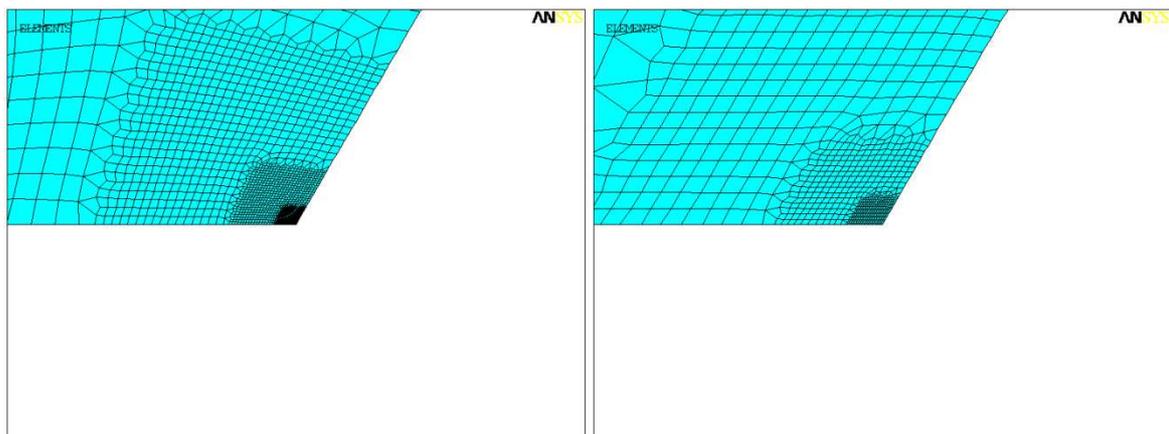


Figura 4.57: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

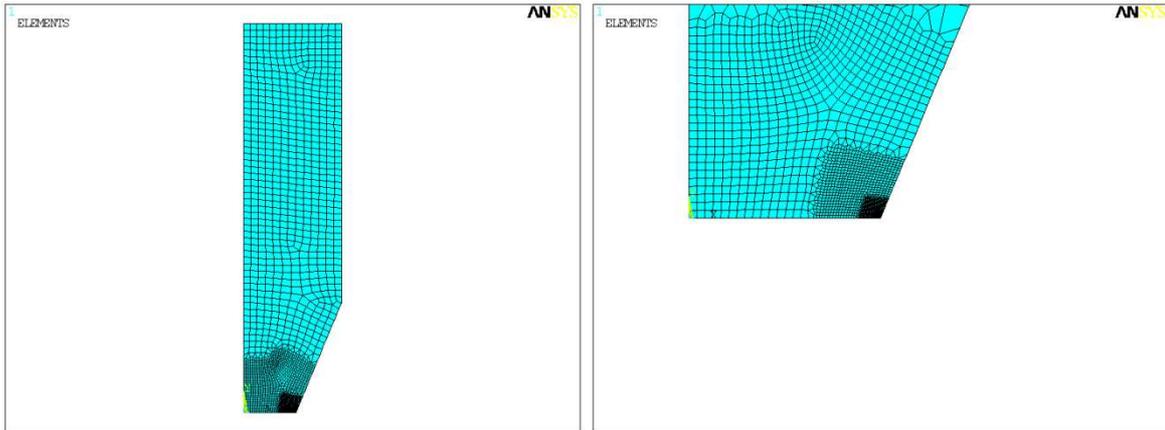


Figura 4.58: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 135° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

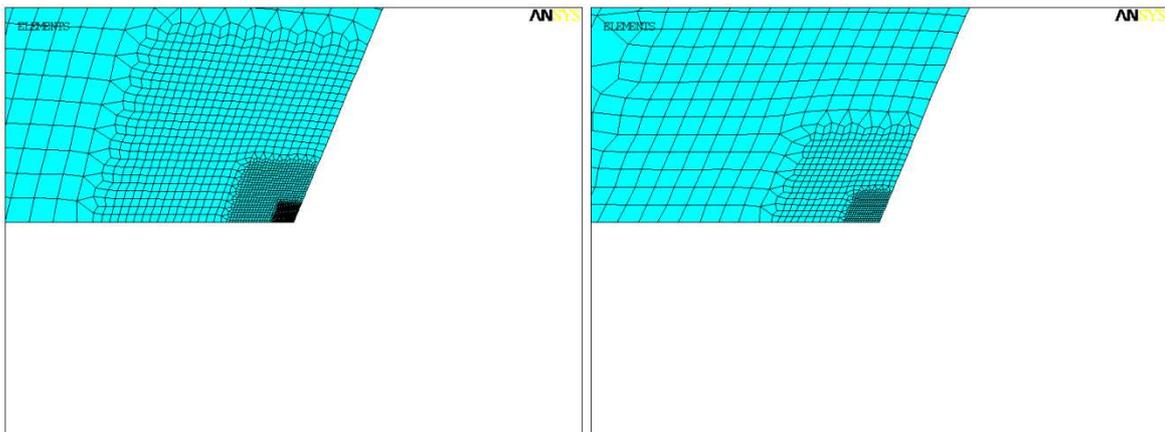


Figura 4.59: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

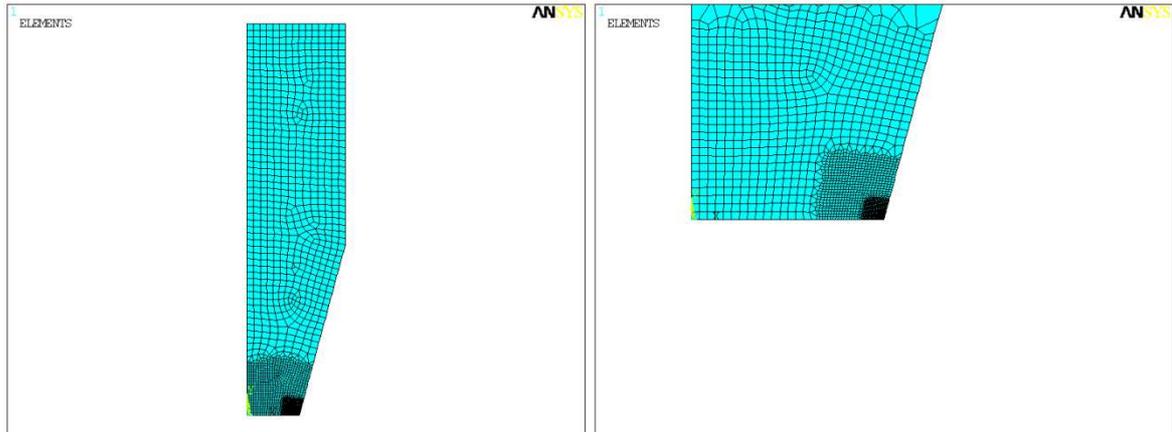


Figura 4.60: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 150° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

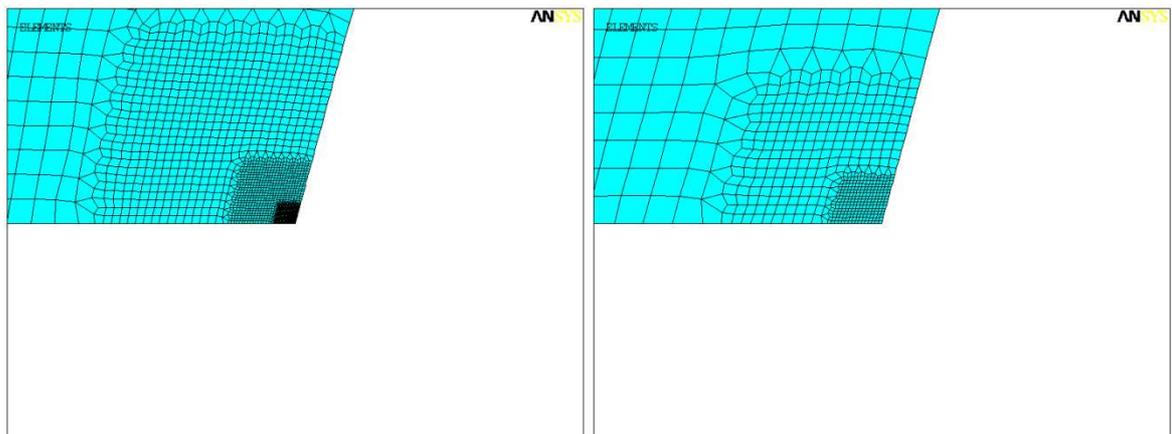


Figura 4.61: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

4.3.3 - Risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF

In questa sezione s'intendono riassumere tutti i risultati più significativi ottenuti utilizzando il metodo NSIF; ogni tabella e ogni diagramma sono riferiti a un singolo grado d'apertura.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.5}]	x^* [mm]
0	1	1.8605	0.082147
0	2	2.857149	0.240587
0	3	3.895225	0.994366
0	4	5.165	2.781489
0	5	6.765	1.35655
0	6	8.980855	0.638112
0	7	12.2	0.65322
0	8	17.14037	0.52807
0	9	25.28	0.425268
0	10	39.93	0.327554
0	11	69.78	0.27891
0	12	143.2	0.214888
0	13	393.5	0.14664
0	14	2223	0.075745

Tabella 4.2: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 0°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.455}]	x^* [mm]
30	1	2.121	0.171536
30	2	3.155	0.634318
30	3	4.2395	2.968261
30	4	5.562434	1.089285
30	5	7.25	0.76716
30	6	9.621585	0.56813
30	7	13.09377	0.465134
30	8	18.45	0.333101
30	9	27.44	0.3266
30	10	43.62079	0.283
30	11	77.09402	0.219586
30	12	160.0045	0.170079
30	13	448.75	0.1156
30	14	2607	0.061797

Tabella 4.3: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 30°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [$mm^{0.429}$]	x^* [mm]
45	1	2.243853	0.208697
45	2	3.295	1.241613
45	3	4.414	1.911172
45	4	5.75498	0.475032
45	5	7.5077	0.608179
45	6	9.980555	0.475882
45	7	13.61	0.354603
45	8	19.23753	0.317923
45	9	28.58973	0.270492
45	10	45.75376	0.253418
45	11	81.17	0.203033
45	12	169.7295	0.150835
45	13	479.5	0.107
45	14	2856	0.053068

Tabella 4.4: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 45°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [$mm^{0.4}$]	x^* [mm]
60	1	2.397955	0.303673
60	2	3.465	4.208142
60	3	4.591	1.095
60	4	5.951521	0.665896
60	5	7.772	0.509968
60	6	10.32473	0.413755
60	7	14.06875	0.3834
60	8	19.95202	0.333
60	9	29.76819	0.2907
60	10	47.85	0.243453
60	11	85.45	0.1935
60	12	180.5433	0.139262
60	13	517.35	0.09992
60	14	3129	0.050169

Tabella 4.5: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 60°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.333}]	x^* [mm]
90	1	2.715331	1.210032
90	2	3.775406	1.031822
90	3	4.906788	0.64997
90	4	6.32352	0.512243
90	5	8.223	0.441528
90	6	10.95957	0.373
90	7	15.01	0.331926
90	8	21.46333	0.311675
90	9	32.35985	0.270709
90	10	52.56791	0.224419
90	11	95.12	0.183672
90	12	205.1316	0.1285
90	13	603.5	0.093653
90	14	3822	0.04581

Tabella 4.6: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 90°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.25}]	x^* [mm]
120	1	3.085183	1.044206
120	2	4.085512	0.547126
120	3	5.127812	0.55278
120	4	6.570603	0.489646
120	5	8.563239	0.436446
120	6	11.425	0.406413
120	7	16.09606	0.31162
120	8	23.24255	0.262503
120	9	35.55	0.222891
120	10	58.66	0.190675
120	11	108.35	0.155539
120	12	238.5298	0.110718
120	13	709	0.104552
120	14	4725	0.058118

Tabella 4.7: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 120°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [$mm^{0.2}$]	x^* [mm]
135	1	3.200341	0.683468
135	2	4.135932	0.535908
135	3	5.242007	0.486905
135	4	6.710938	0.448564
135	5	8.772032	0.399285
135	6	11.78919	0.37088
135	7	16.38589	0.316942
135	8	23.82002	0.278379
135	9	36.65312	0.242296
135	10	61.08	0.202627
135	11	114.0421	0.165613
135	12	255.4	0.119993
135	13	794.1	0.081492
135	14	5513.5	0.044659

Tabella 4.8: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 135°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [$mm^{0.143}$]	x^* [mm]
150	1	3.263496	0.624536
150	2	4.122873	0.557839
150	3	5.20156	0.513535
150	4	6.673686	0.472338
150	5	8.763276	0.430529
150	6	11.84344	0.388953
150	7	16.57479	0.327025
150	8	24.24	0.310388
150	9	37.67	0.261161
150	10	63.41	0.219069
150	11	120.013	0.174945
150	12	272.3	0.138393
150	13	868.4575	0.088677
150	14	6276	0.047279

Tabella 4.9: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 150°.

Si vuole ora riassumere i risultati riportati nelle tabelle 4.2-4.9 in opportuni grafici; il primo di questi riporta l'andamento del $\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ in funzione della dimensione dell'intaglio per ogni caso analizzato.

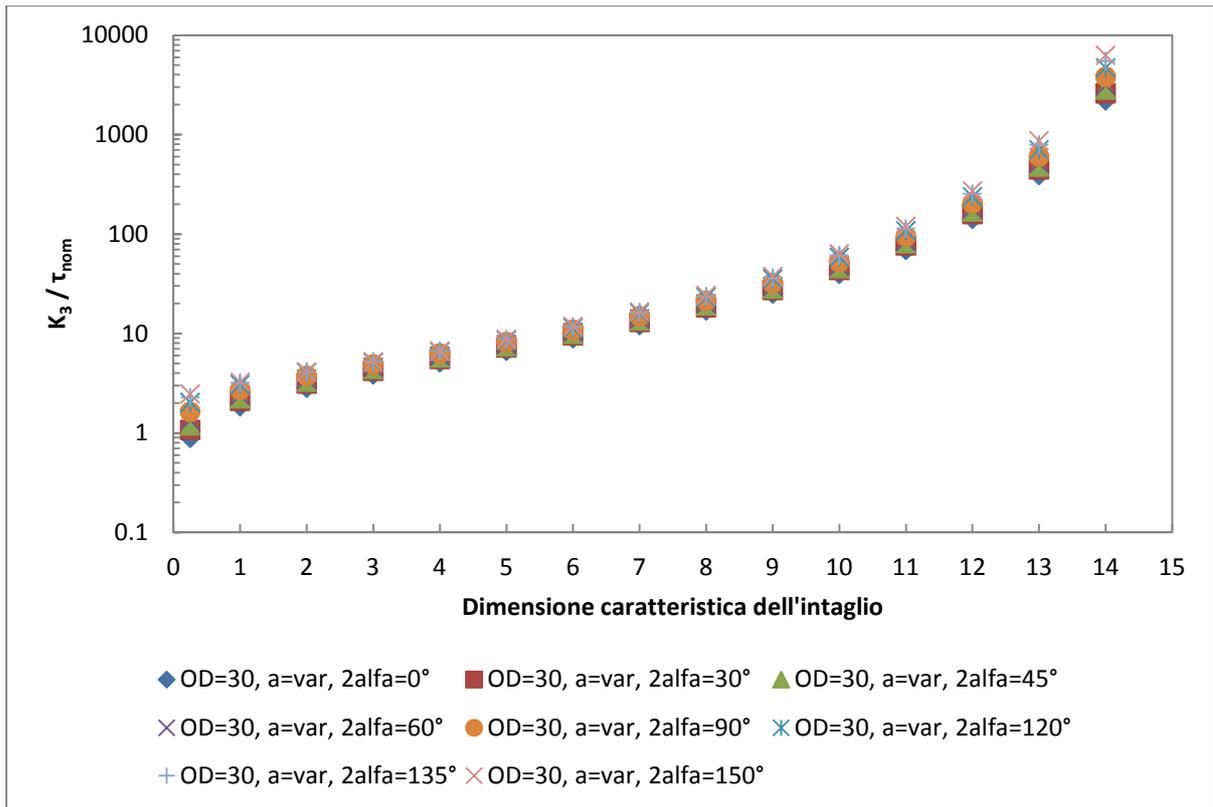


Figura 4.62: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} in funzione della dimensione caratteristica dell'intaglio. Ogni curva si riferisce ad un diverso grado d'apertura dell'intaglio; si noti che al variare dell'angolo d'apertura l'unità di misura del rapporto varia.

Come si osserva dall'immagine soprastante all'aumentare dell'angolo d'apertura dell'intaglio le curve del K_3 numerico, normalizzato rispetto alla tensione tangenziale nominale applicata, tendono ad assumere valori più elevati; durante tutta l'estensione non si hanno mai intersezioni tra le curve, quindi quelle relative ad un angolo d'apertura più elevato presentano valori più alti rispetto a quelle con angoli più piccoli per ogni dimensione caratteristica dell'intaglio. Si osservi però che il confronto è svolto solo sul modulo del rapporto citato poiché al variare dell'angolo d'apertura le unità di misura non si mantengono costanti dato che cambia l'esponente di singolarità. Inoltre si osserva che le curve sono sempre monotone crescenti; in questo modo è possibile supporre che i campi di tensione risultino sempre più elevati all'aumentare della dimensione caratteristica dell'intaglio. Ciò può essere dimostrato diagrammando gli andamenti della tensione e del fattore d'intensificazione delle tensioni al variare della dimensione caratteristica dell'intaglio; ogni diagramma si riferisce ad un specifico valore dell'angolo d'apertura.

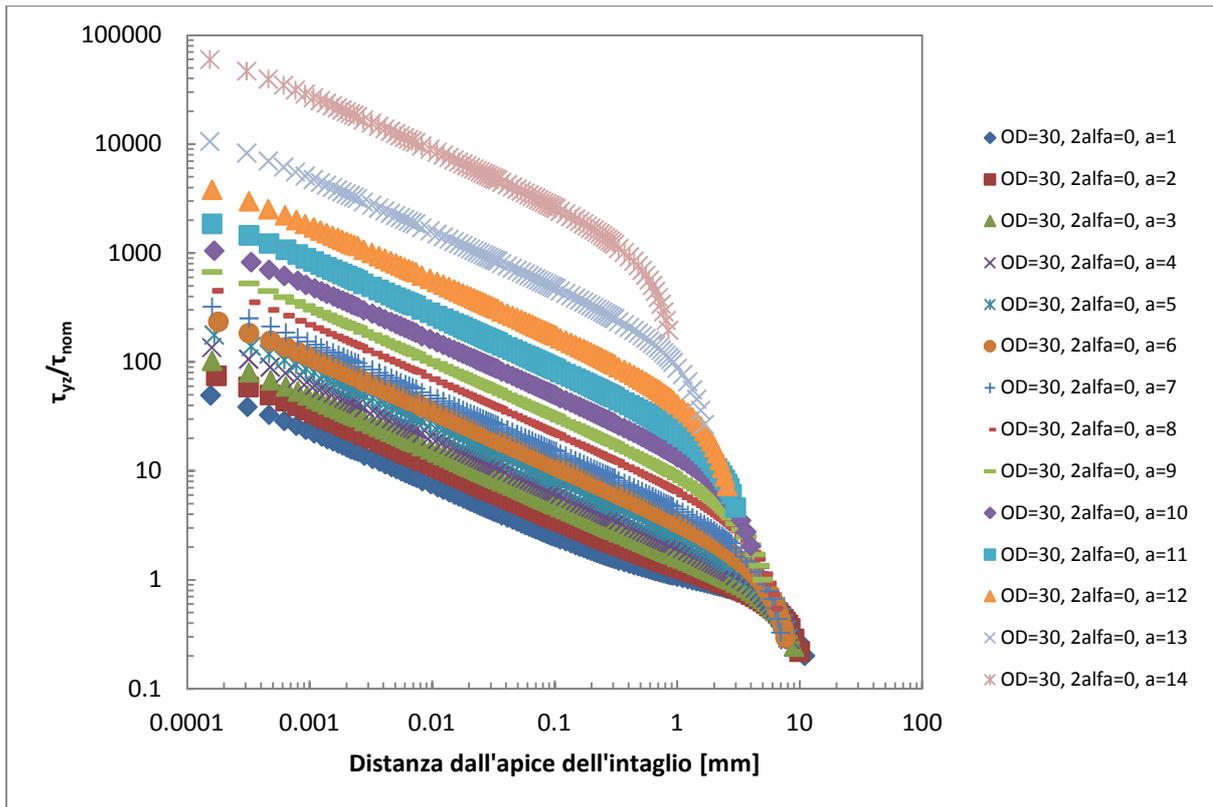


Figura 4.63: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 0°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

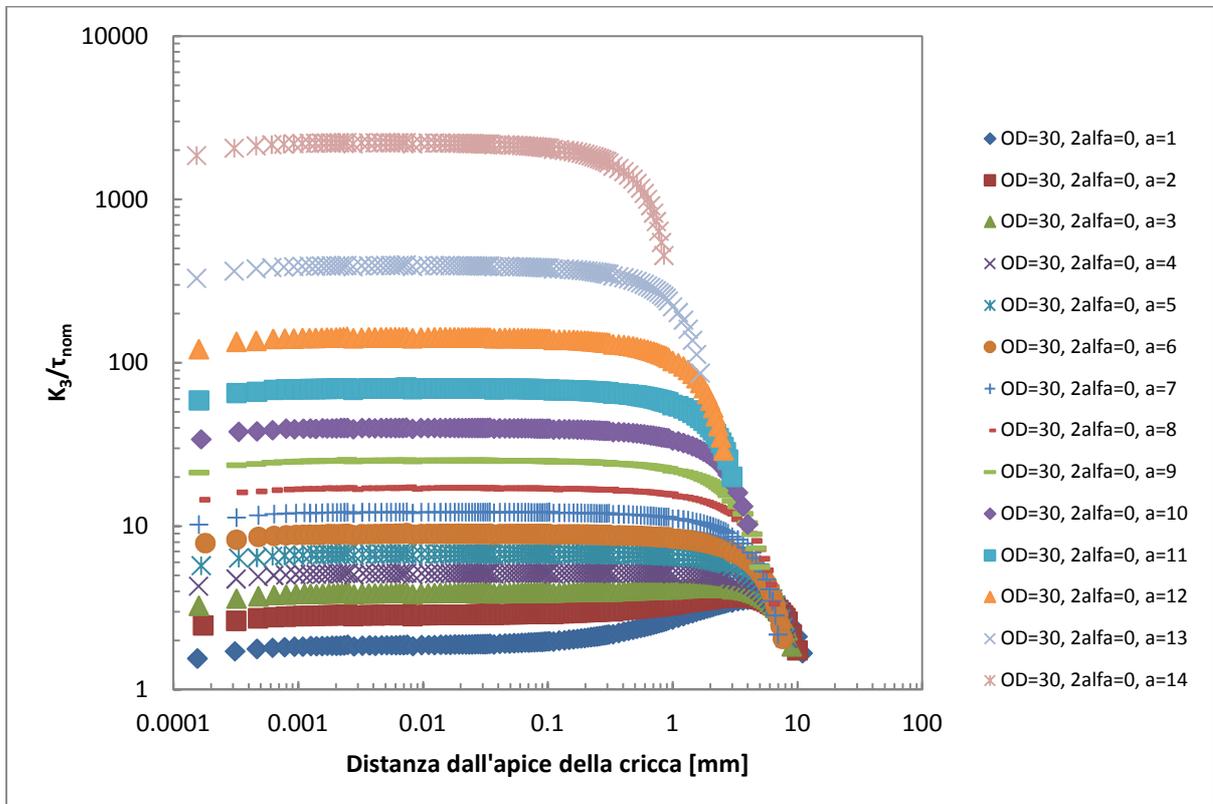


Figura 4.64: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

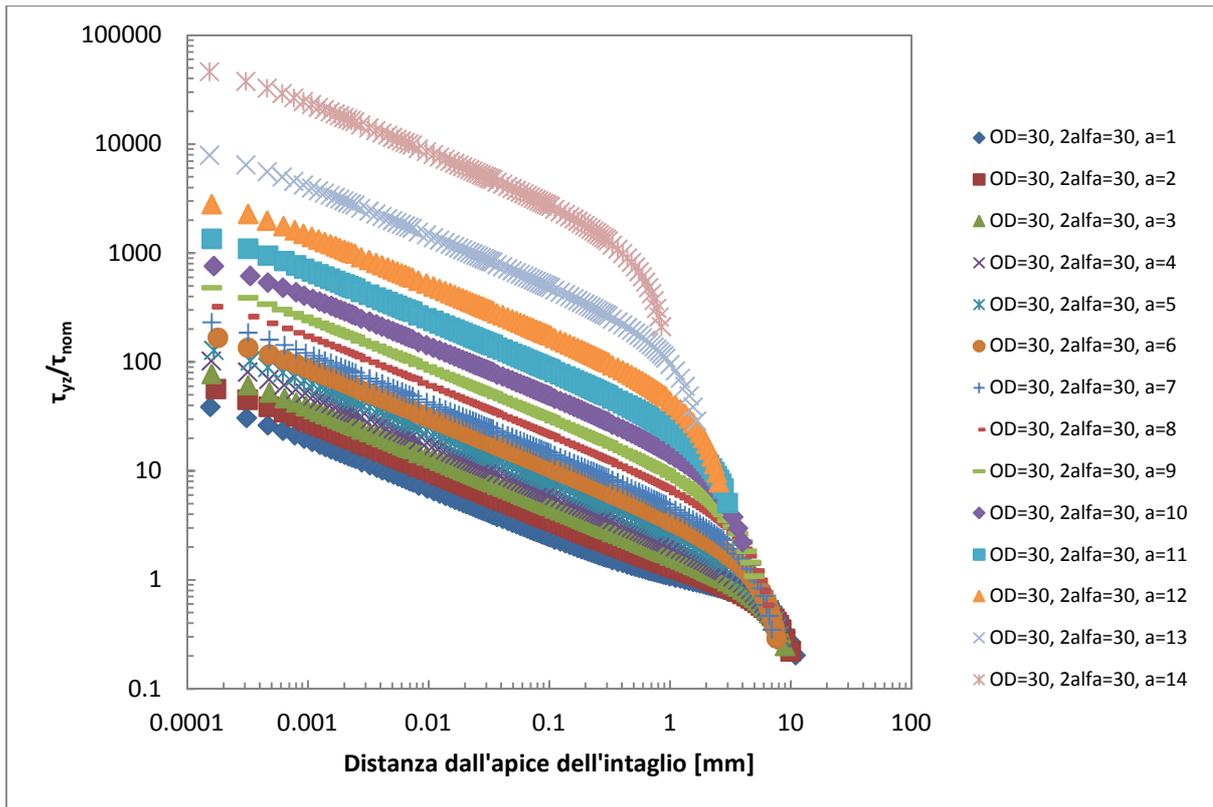


Figura 4.65: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 30°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

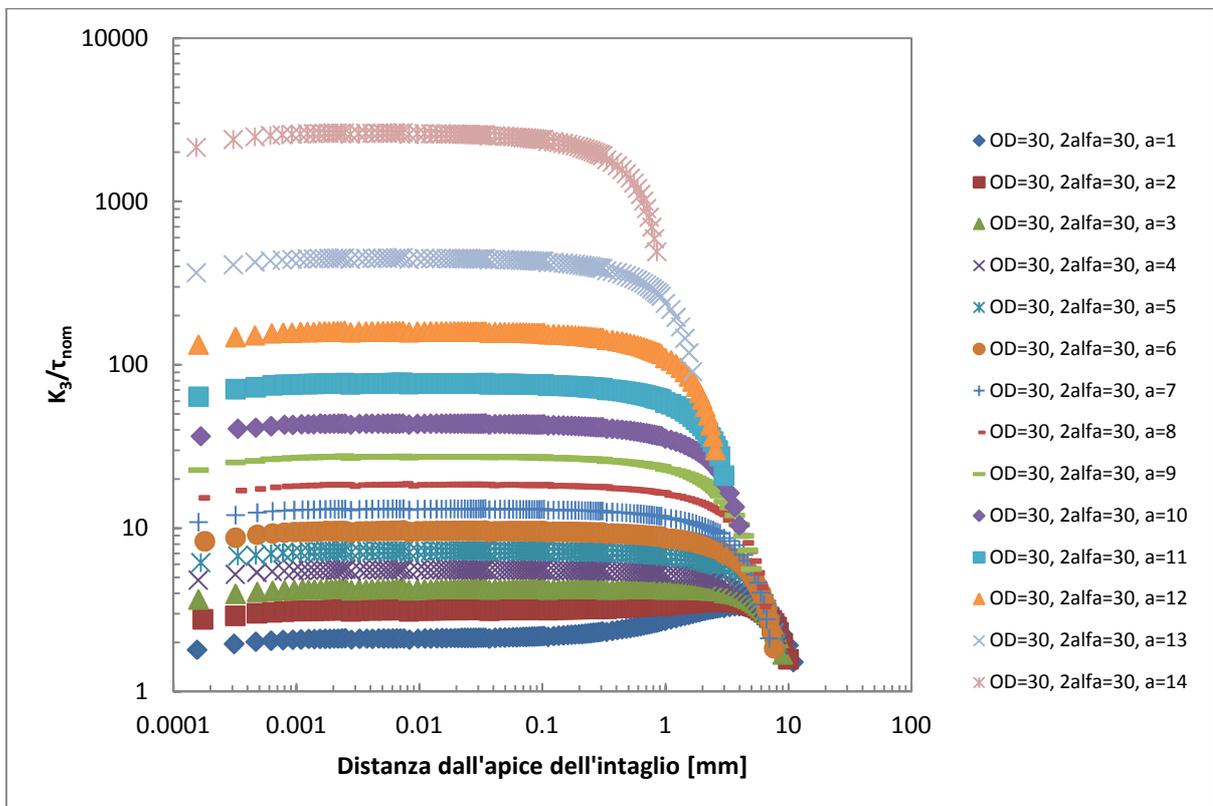


Figura 4.66: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

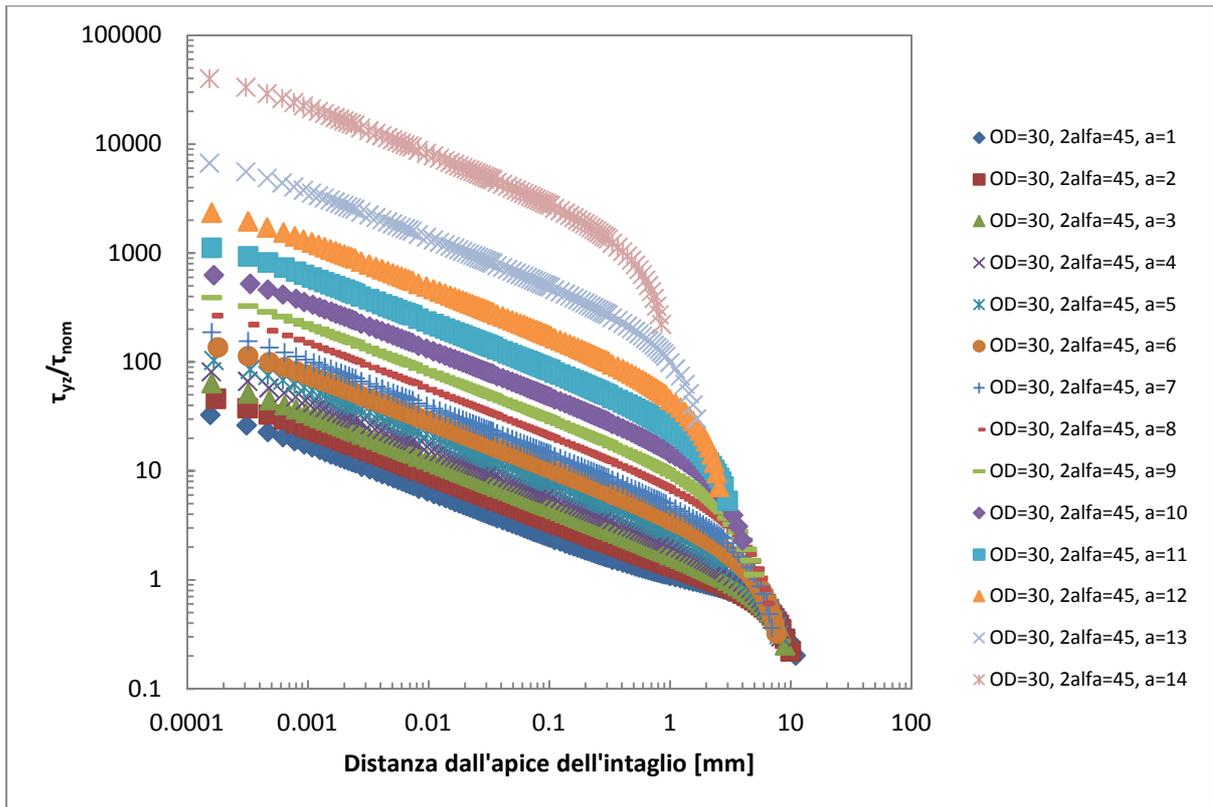


Figura 4.67: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 45°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

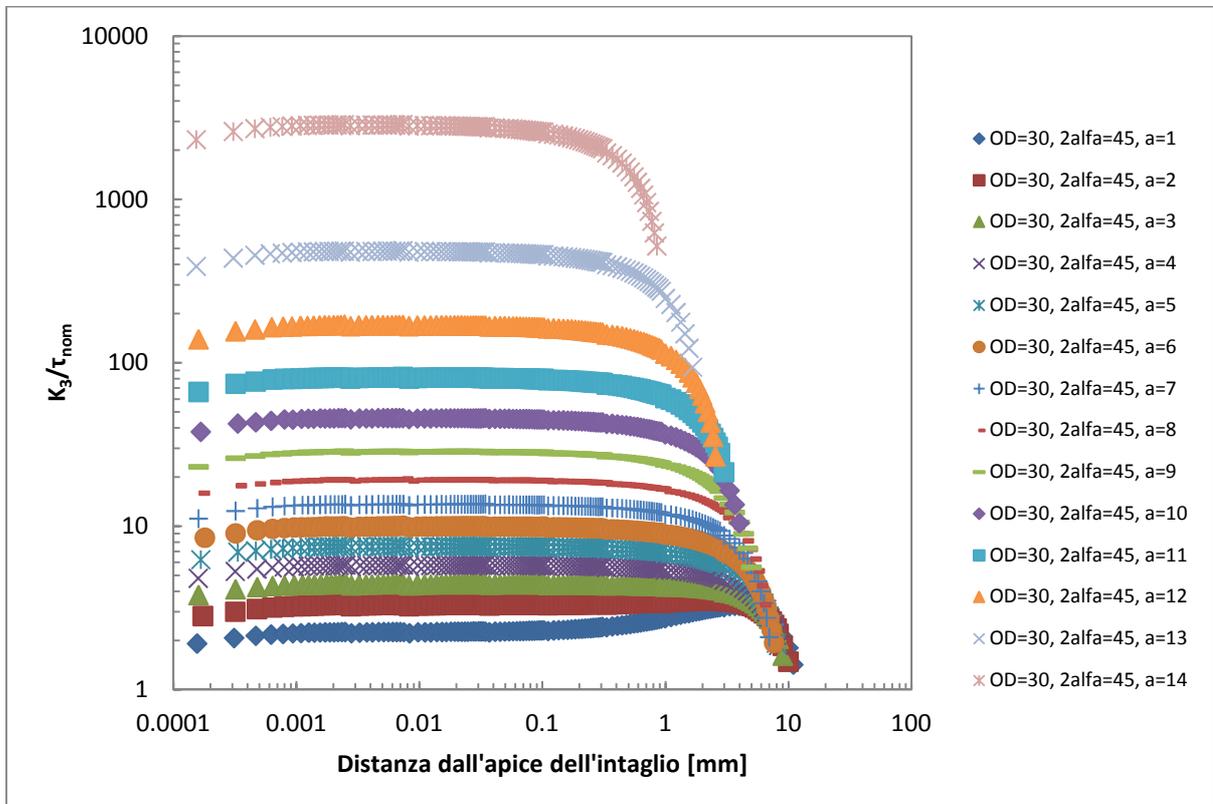


Figura 4.68: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

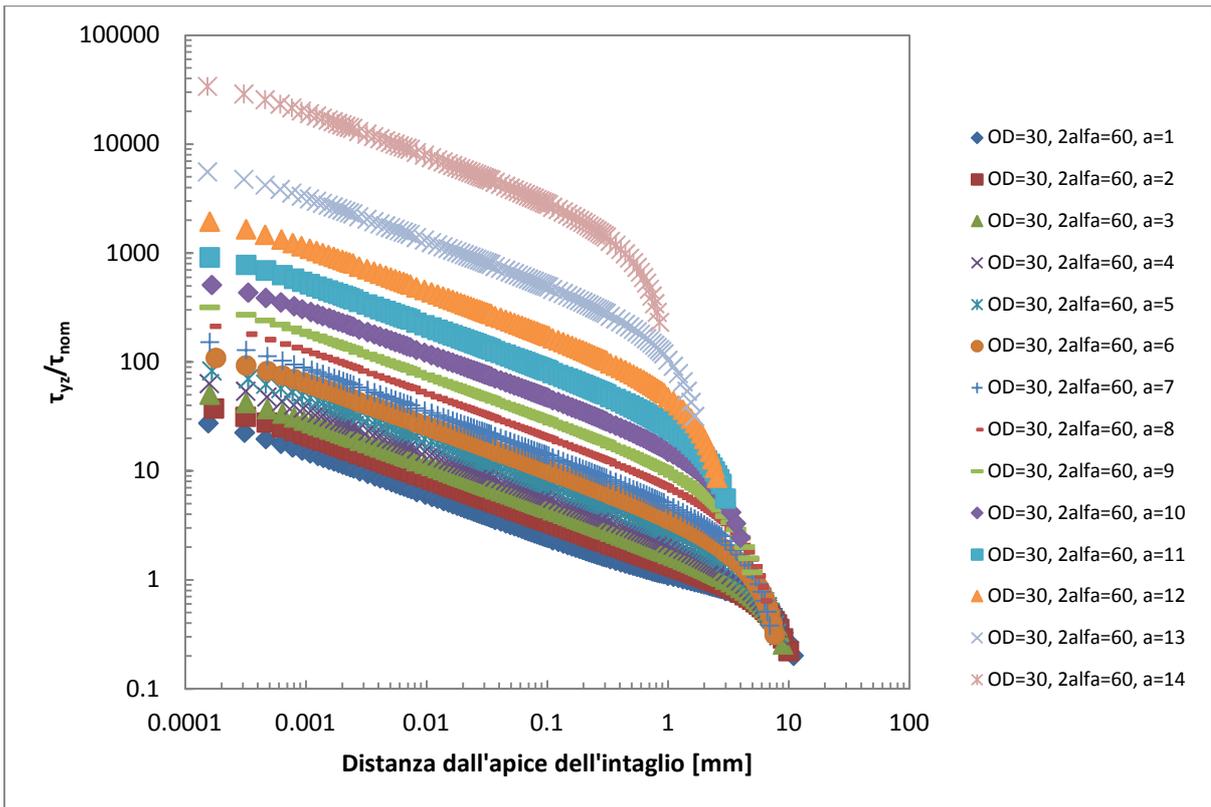


Figura 4.69: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 60°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

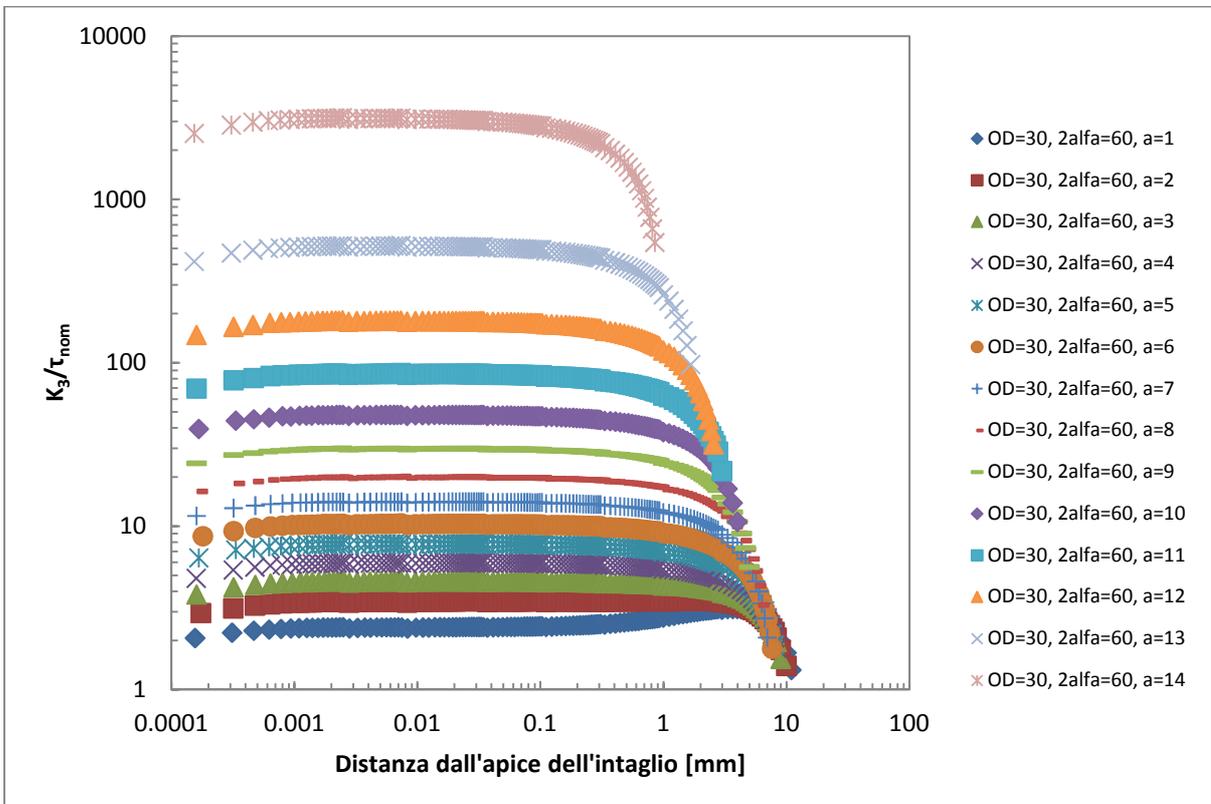


Figura 4.70: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

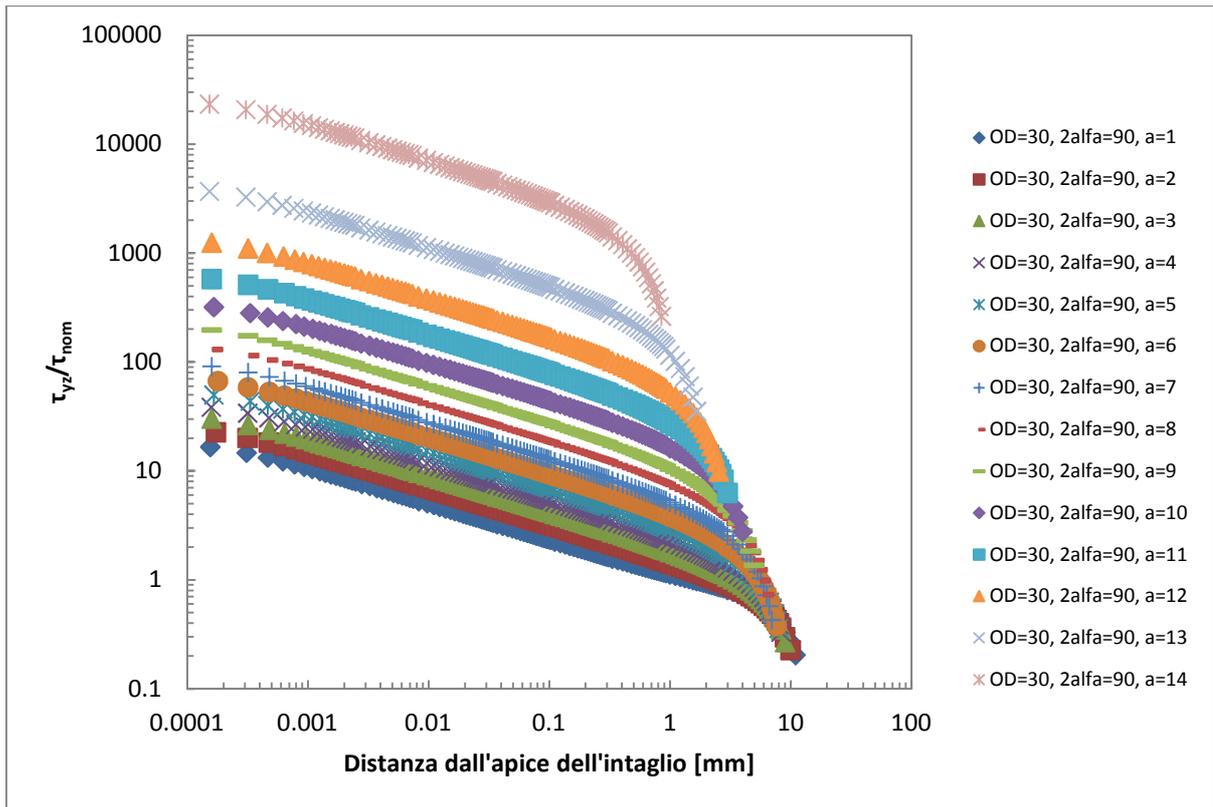


Figura 4.71: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 90°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

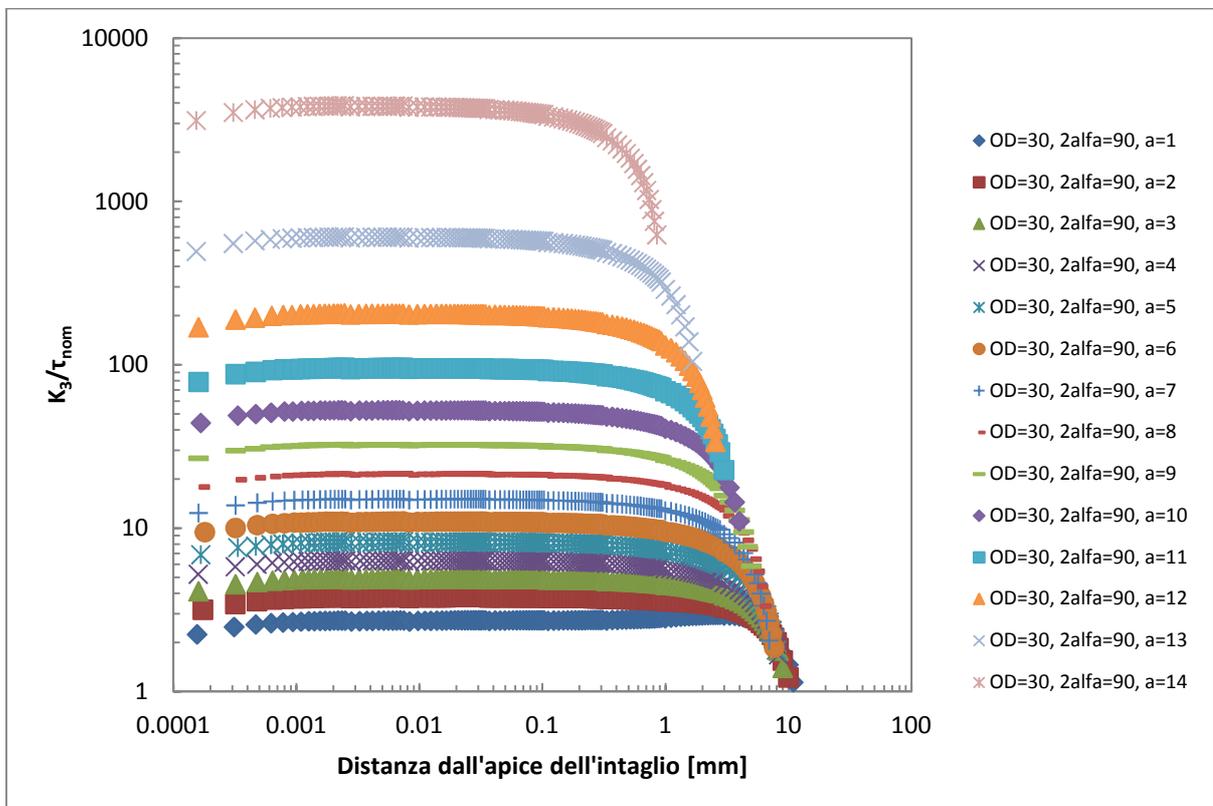


Figura 4.72: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

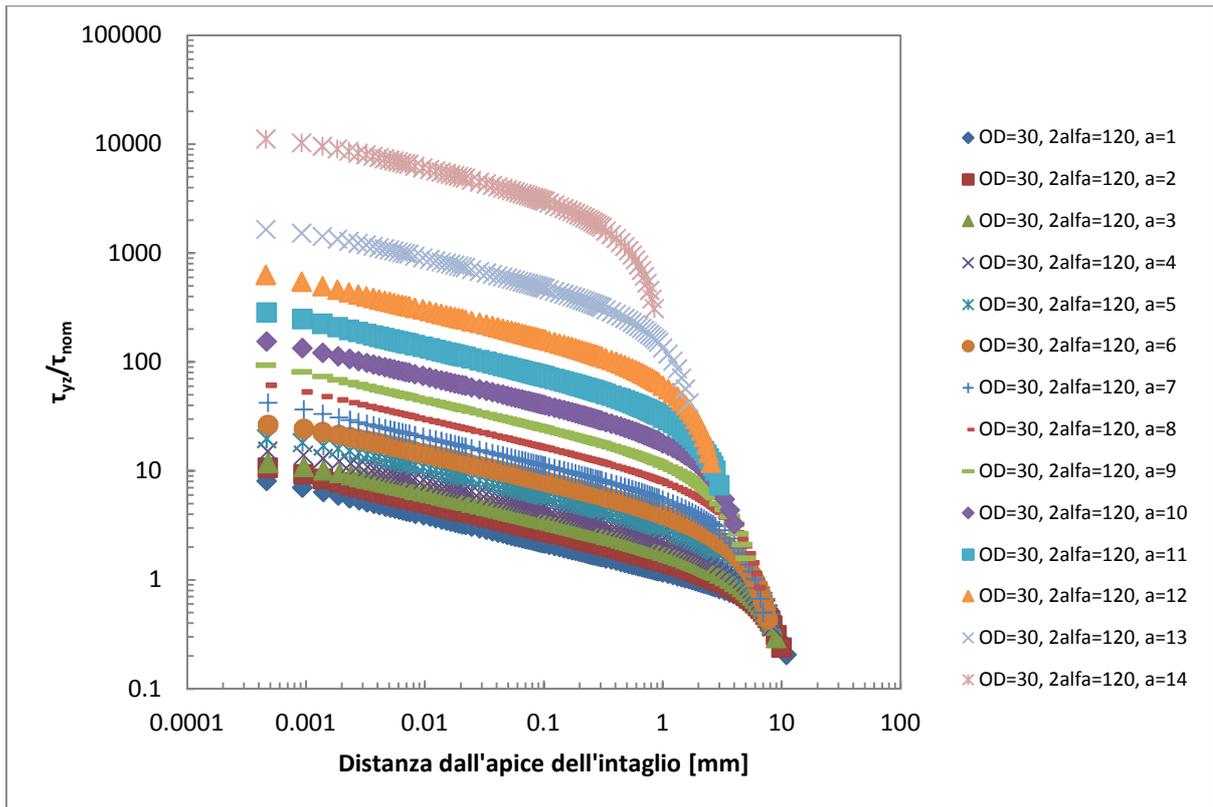


Figura 4.73: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 120° . Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

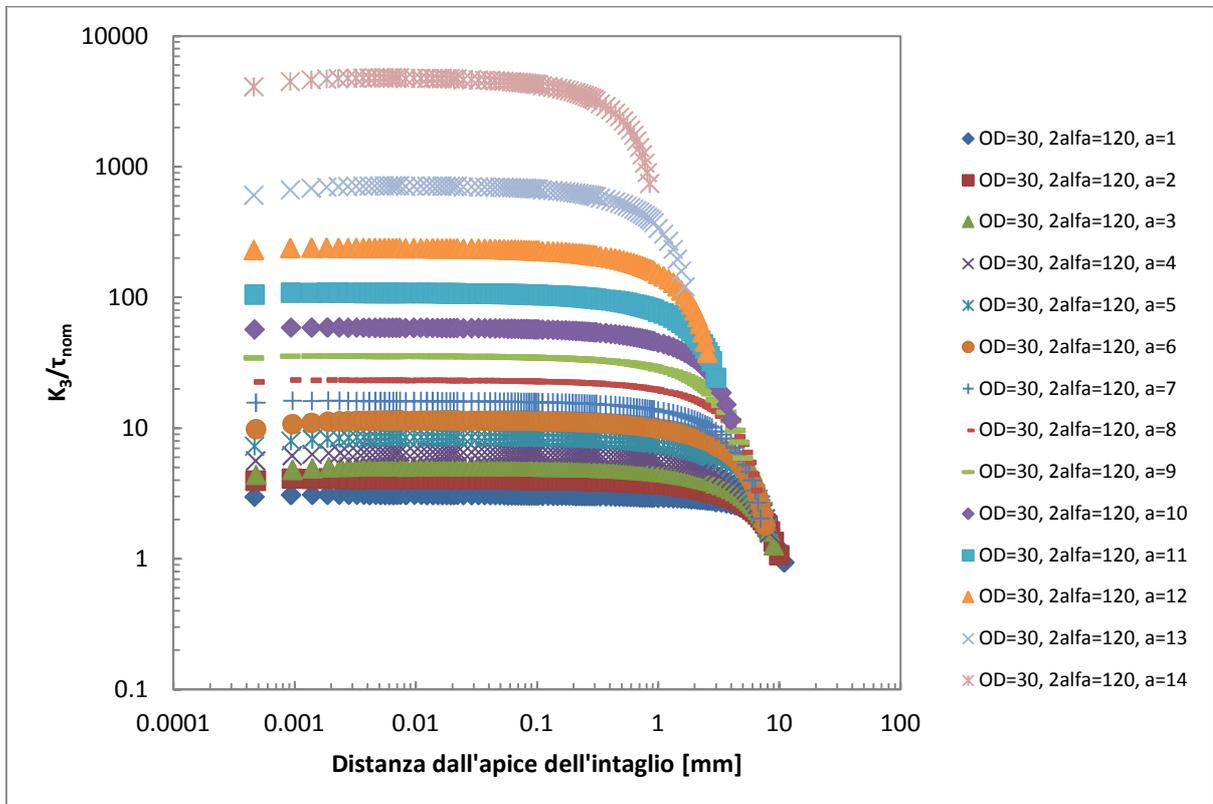


Figura 4.74: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120° . Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

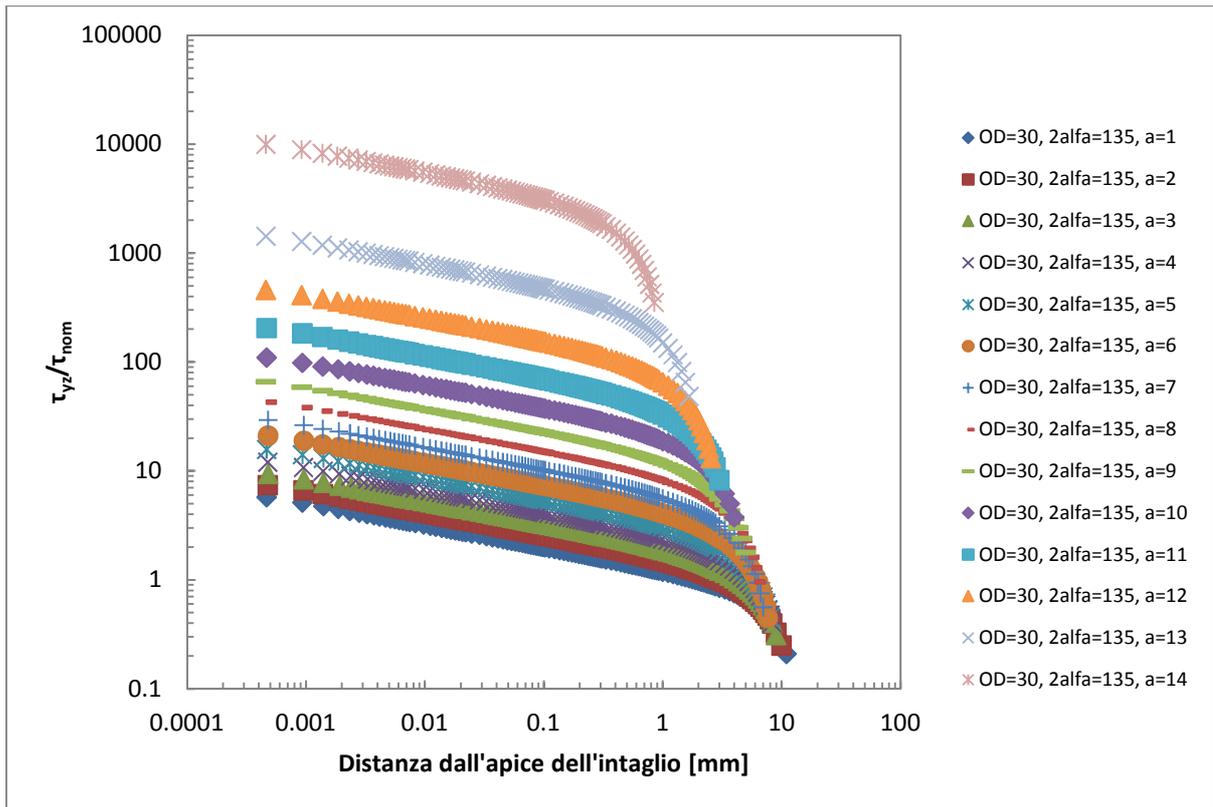


Figura 4.75: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 135° . Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

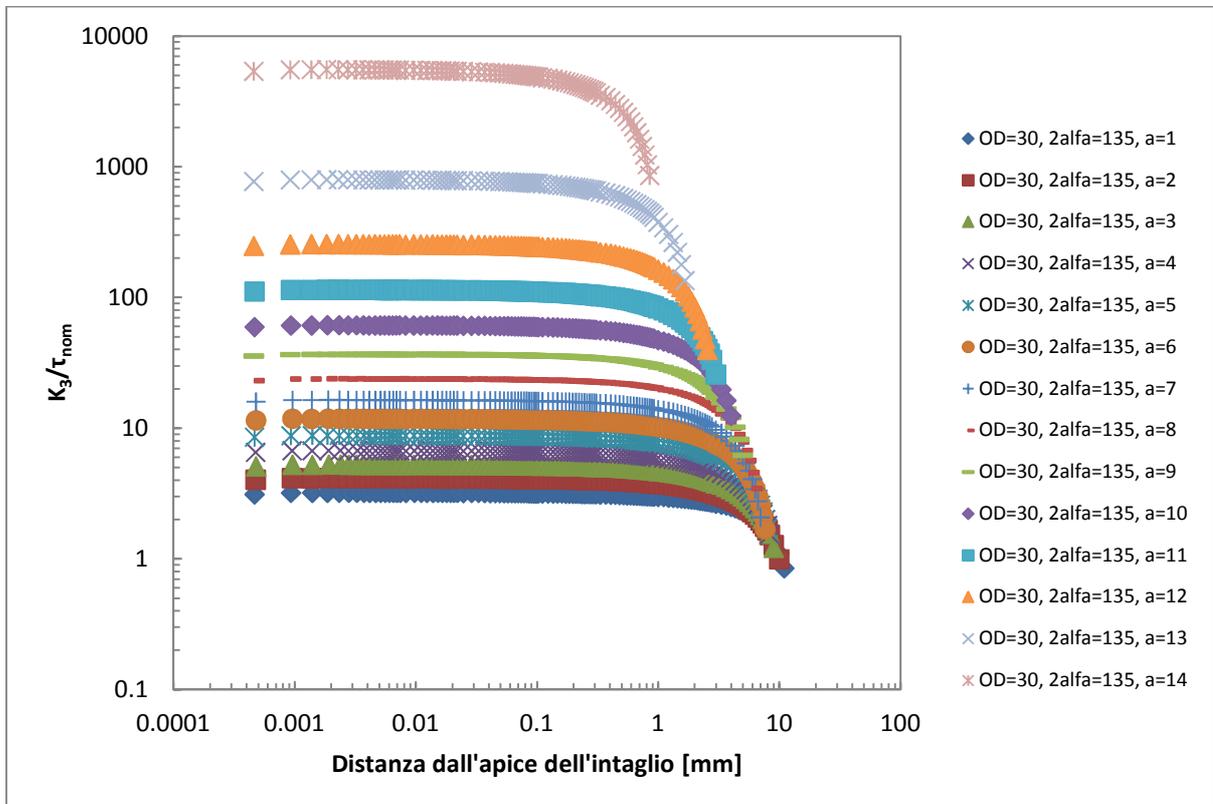


Figura 4.76: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135° . Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

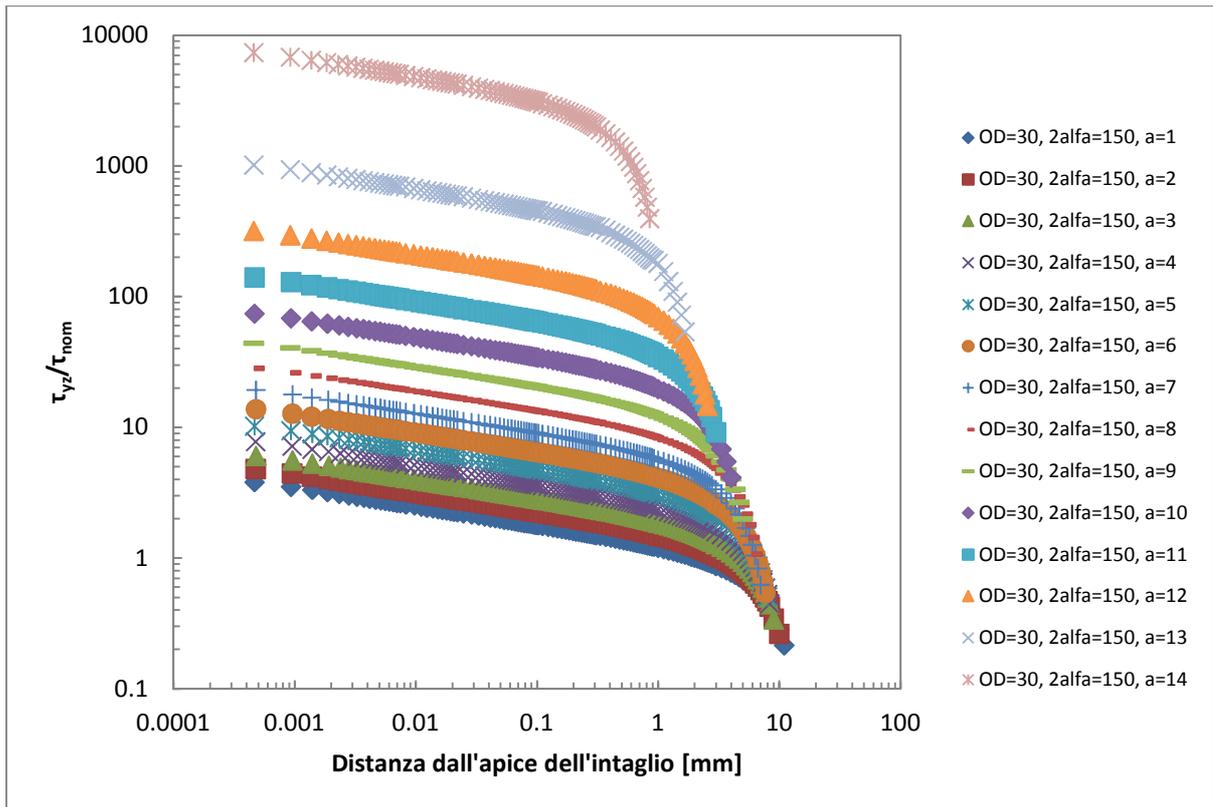


Figura 4.77: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 150°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

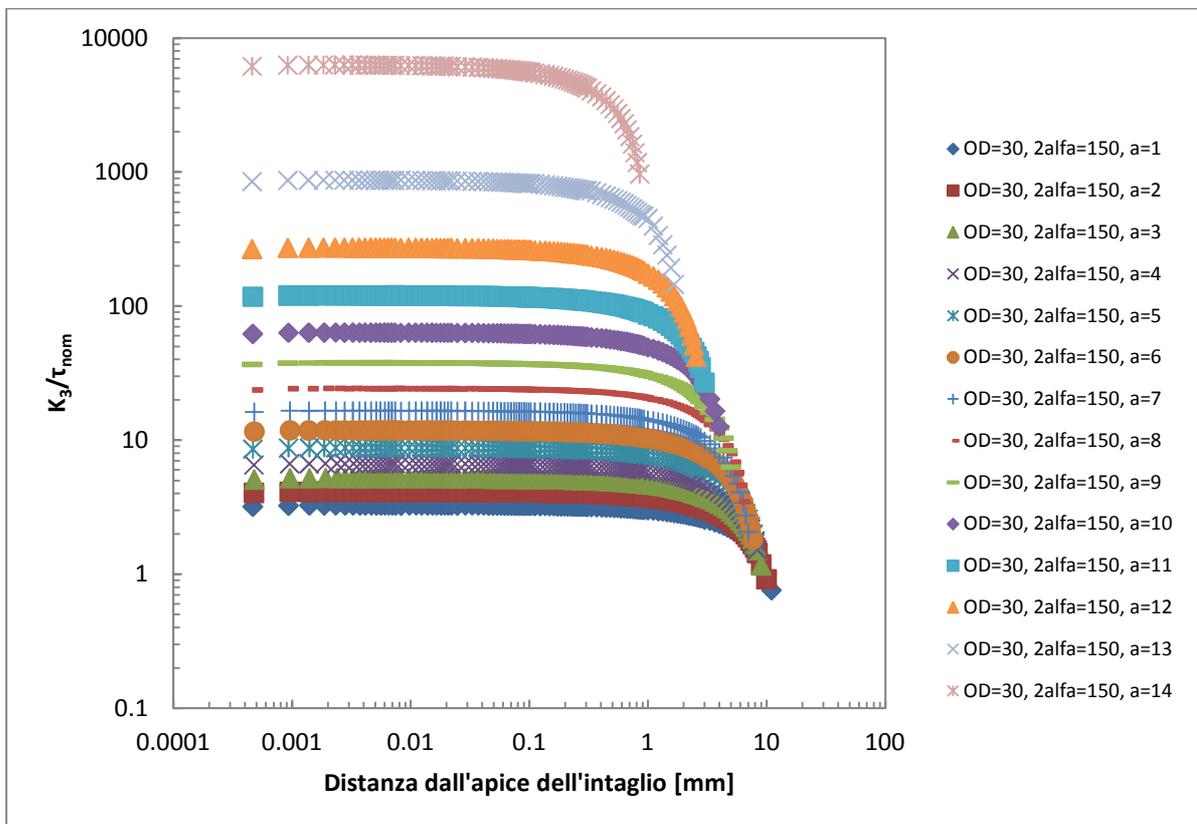


Figura 4.78: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

Appurata quindi la correttezza delle precedenti affermazioni si vuole ora analizzare quanto ottenuto in termini di estensione del campo di tensione locale al variare della dimensione caratteristica dell'intaglio e in funzione dell'angolo d'apertura dello stesso.

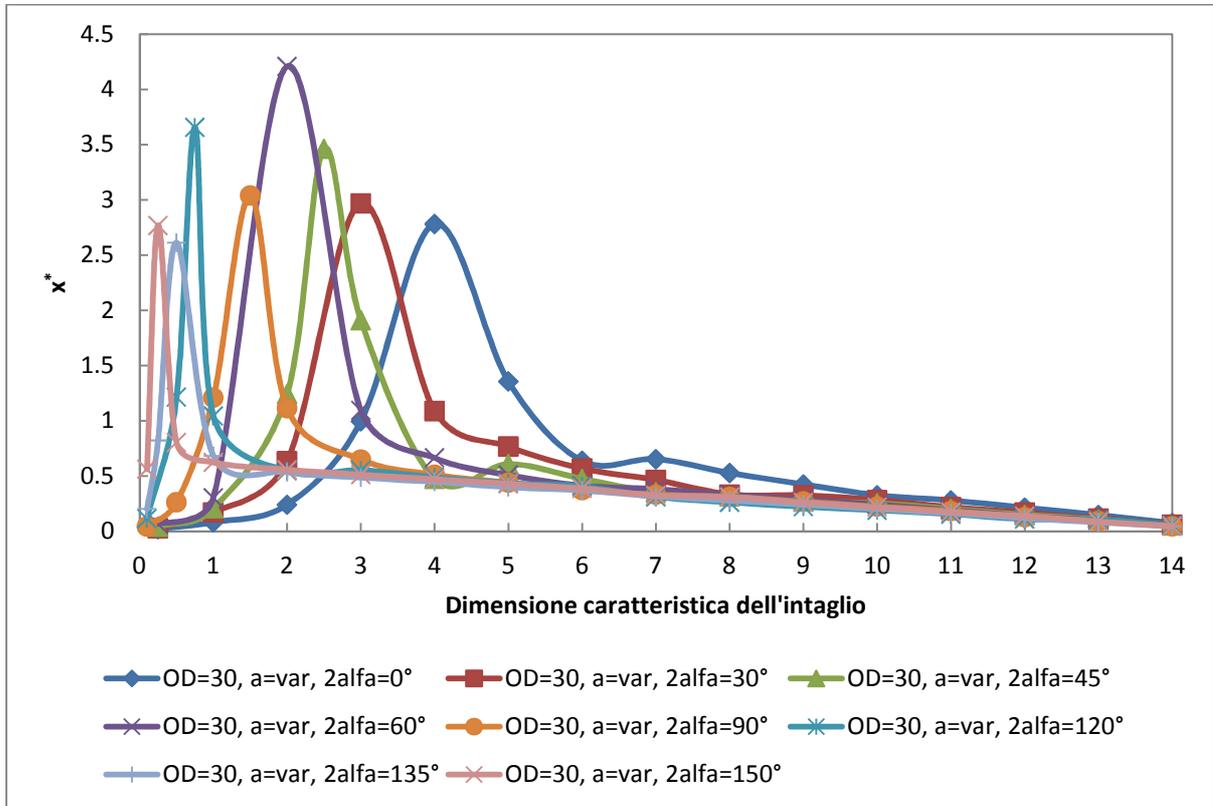


Figura 4.79: Andamento dell'estensione del campo locale di tensione calcolato numericamente x^* in funzione della dimensione caratteristica dell'intaglio. Ogni curva si riferisce ad un diverso angolo d'apertura dell'intaglio.

Per prima cosa è necessario sottolineare che le curve ottenute dal precedente grafico sono legate al numero d'analisi svolto e quindi al numero di punti che le compongono; discretizzando in maniera più fitta il range delle possibili dimensioni caratteristiche dell'intaglio ci potrebbero essere scostamenti anche marcati dalle curve visualizzate, soprattutto nella zona dove esse presentano i picchi, cioè quella riferita alle dimensioni d'intaglio inferiori. Si sottolinea quindi che le curve sono state inserite solo per maggiore chiarezza del diagramma che, altrimenti, dato l'elevato numero di simboli differenti sarebbe di difficile comprensione; esse sono da intendersi come andamento qualitativo dell'estensione del campo locale di tensione calcolata numericamente. Nel caso in esame sono state svolte delle analisi aggiuntive rispetto a quelle elencate nelle tabelle di risultati, ritenute necessarie allo scopo di ricavare il corretto andamento qualitativo delle curve; si osserva quindi un maggior infittimento dei punti per le piccole dimensioni d'intaglio e gli

elevati angoli d'apertura per i quali, senza quest'ultimo, non sarebbe stato possibile osservare i picchi ora visualizzati.

Per tutti gli angoli d'apertura è confermato ancora una volta l'andamento dell' x^* descritto all'interno del paragrafo dedicato alla piastra con cricche laterali sollecitate a modo I: partendo da intagli di piccole dimensioni e aumentando quest'ultime si ha dapprima un aumento dell'estensione del campo locale di tensione, coerentemente con quanto descritto dalla trattazione teorica per un provino di diametro infinito o con intaglio di dimensioni trascurabili rispetto alle proprie, e successivamente si osserva che l'estensione stessa tende a decrescere quando l'intaglio aumenta molto le proprie dimensioni, a causa dell'interazione tra i due campi di tensione locali relativi agli apici dell'intaglio diametralmente opposti che si stanno avvicinando.

Si osserva inoltre che il picco nell'andamento dell'estensione del campo locale di tensione tende a spostarsi verso dimensioni d'intaglio inferiori mano a mano che l'angolo d'apertura aumenta; questo è legato al fatto che per angoli d'apertura elevati si hanno dei campi di tensione con inclinazione inferiore rispetto a quella che si ha per angoli d'apertura più piccoli e quindi i campi stessi dei due punti dell'intaglio diametralmente opposti si influenzano l'un l'altro già a partire da basse dimensioni caratteristiche d'intaglio. La posizione dei massimi lungo la direzione x , cioè data dalla dimensione caratteristica dell'intaglio, è legata alle dimensioni del provino scelte; nel caso in esame esso presenta un diametro esterno pari a 30 mm. Un valore maggiore dello stesso comporterebbe una traslazione verso destra dei picchi, poiché il range delle dimensioni caratteristiche d'intaglio per le quali è possibile considerare l'intaglio di dimensioni trascurabili rispetto a quelle del provino aumenterebbe.

4.3.4 - Mesh PSM non controllata

In questa parte si riporta quanto ottenuto dall'applicazione del PSM per un provino circolare con un intaglio lungo tutta la circonferenza esterna e sollecitato a torsione; ogni risultato di questo sottoparagrafo è ottenuto attraverso l'ausilio di mesh non controllate. La filosofia alla base di questa tipologia di mesh consiste nel creare la stessa senza preoccuparsi del suo layout nelle zone vicine all'apice dell'intaglio che, si ricorda, è molto importante per la corretta applicazione del metodo.

4.3.4.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Per un'esaustiva descrizione del programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi in questione si faccia riferimento al paragrafo 4.1.2.1; il programma utilizzato in questo caso è lo stesso che permette di simulare la geometria con cricca estesa a tutta la circonferenza, è sufficiente imporre un angolo d'apertura dell'intaglio diverso da 0° . Si faccia comunque riferimento al modello numerico descritto nel paragrafo 4.3.1.

4.3.4.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

Si riportano di seguito alcuni esempi delle mesh ottenute attraverso questa modalità di procedere; si osservi fin d'ora che la problematica che si presenta in questa procedura è che il layout della mesh, a parità di global element size, cambia al variare della profondità dell'intaglio, creando una fonte d'errore arbitraria. Per questo motivo è necessario adottare un metodo per il controllo del layout della mesh nelle vicinanze dell'apice dell'intaglio per ottenere risultati più uniformi, che sarà illustrato nei paragrafi 4.3.5 e 4.3.6.

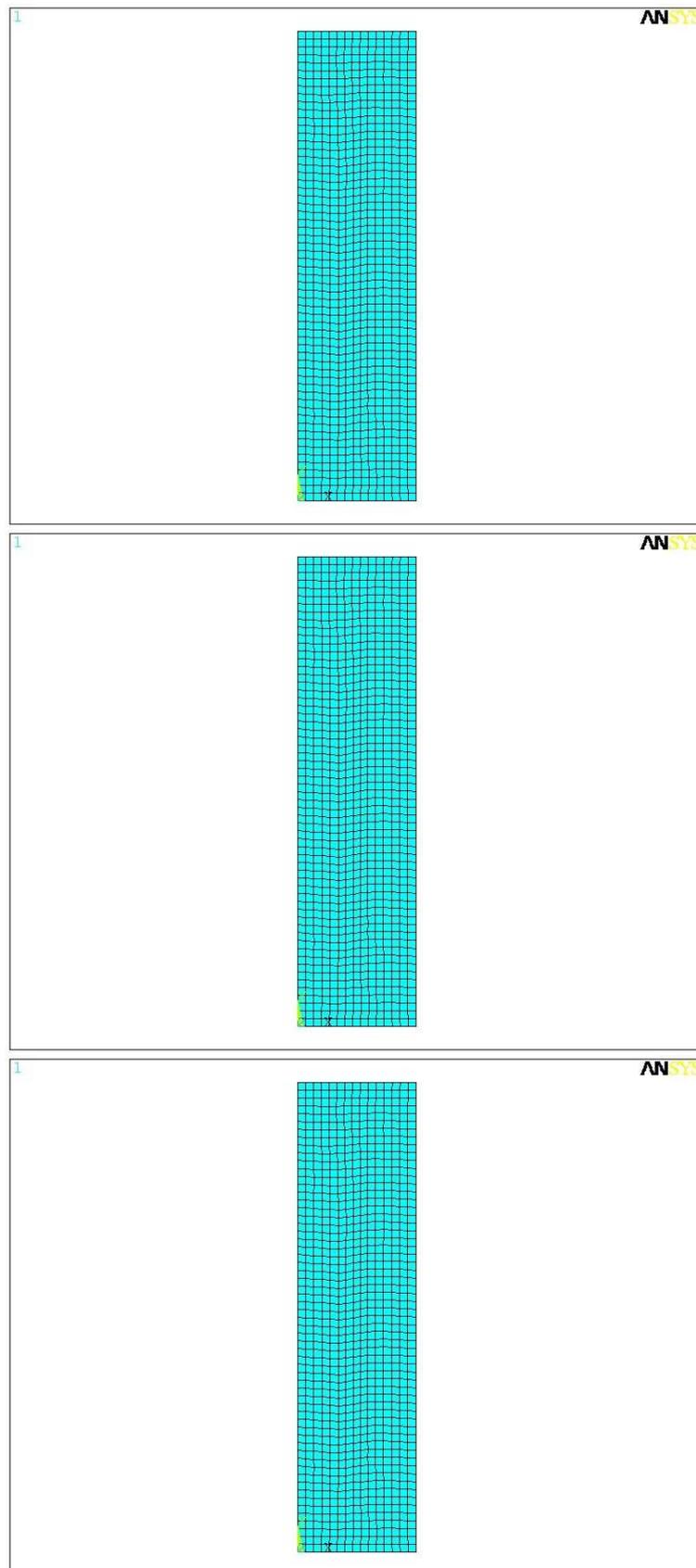


Figura 4.80: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 0^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

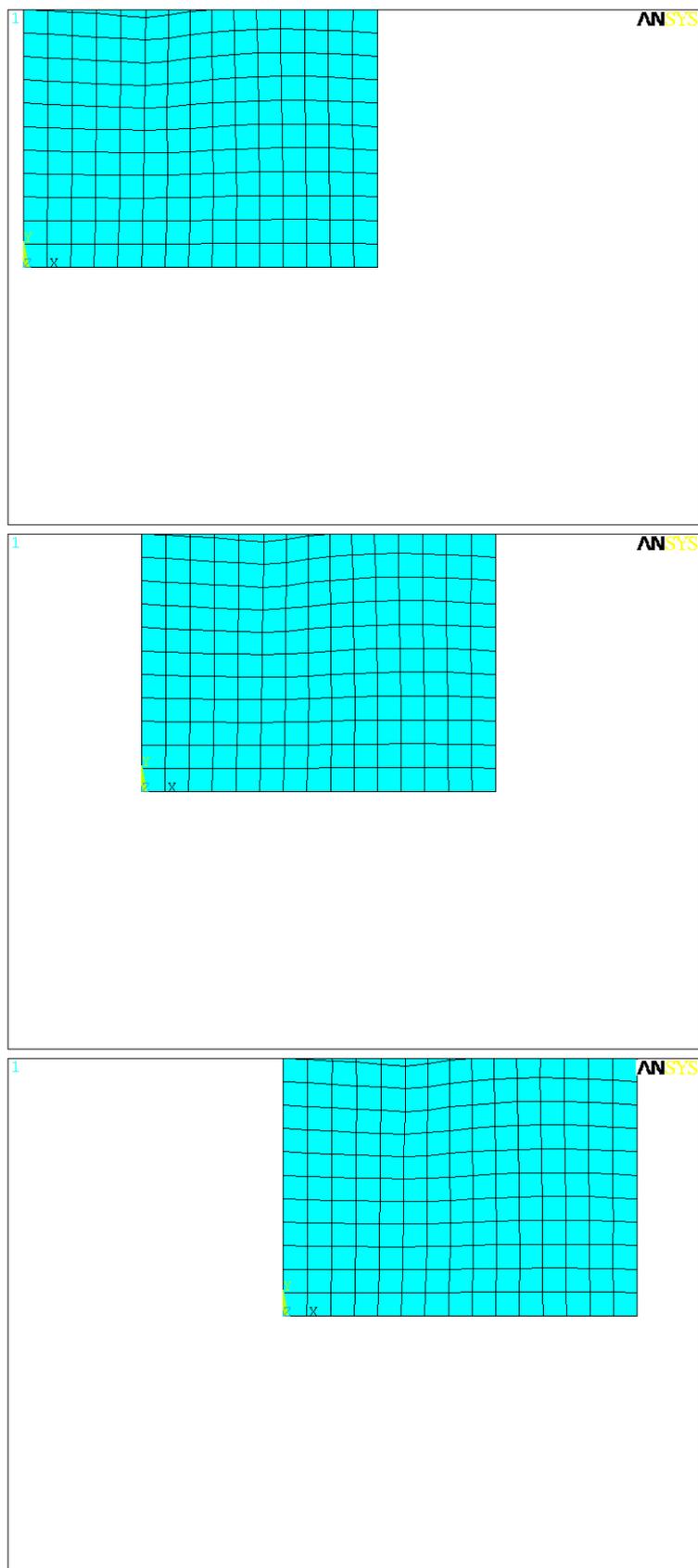


Figura 4.81: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 0^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

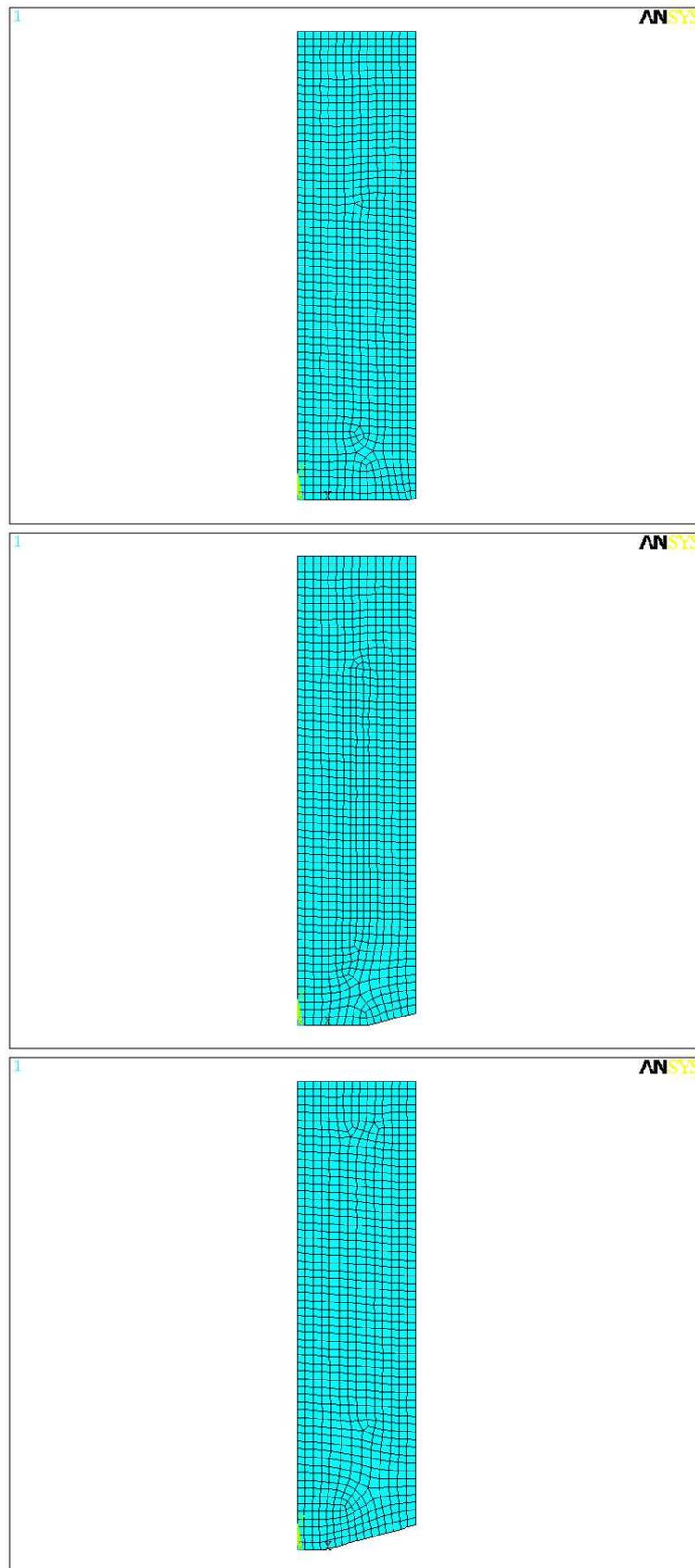


Figura 4.82: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 30^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

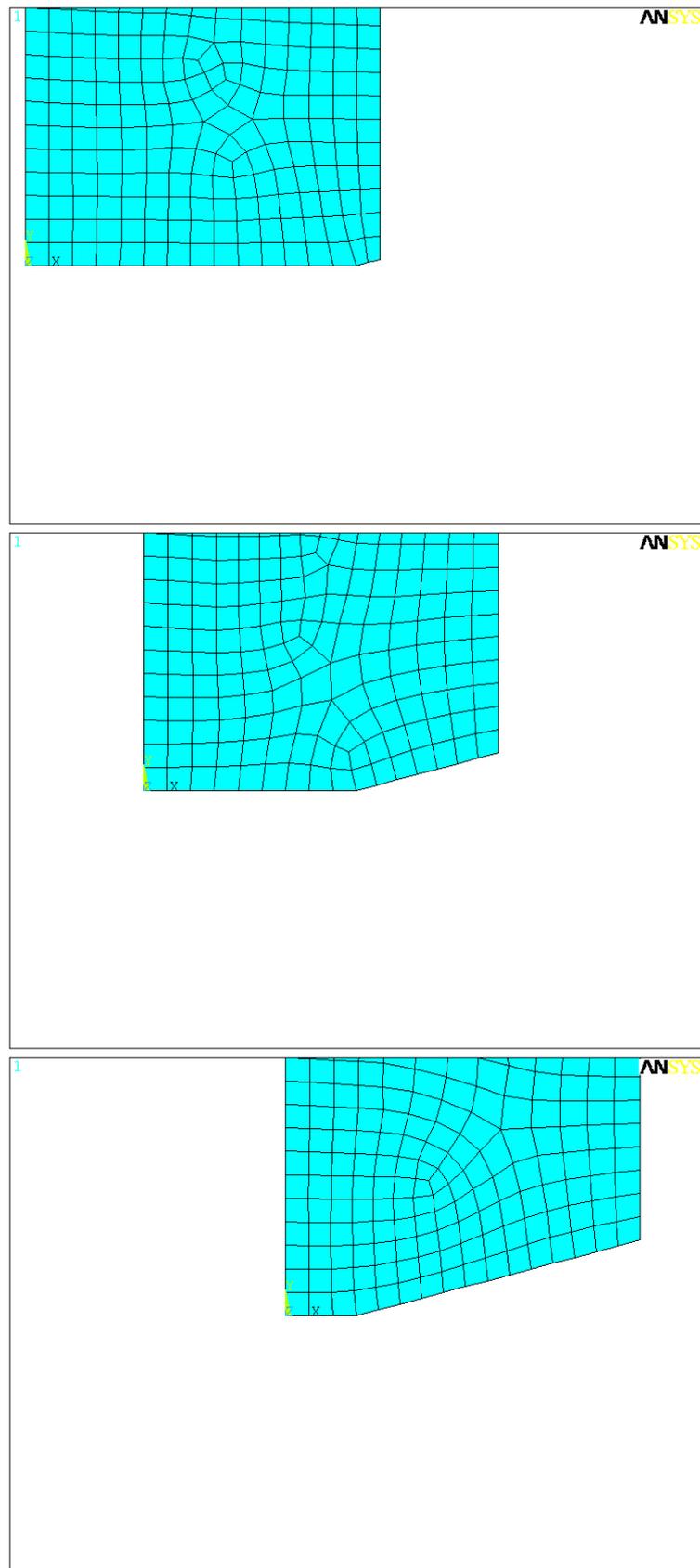


Figura 4.83: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 30^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

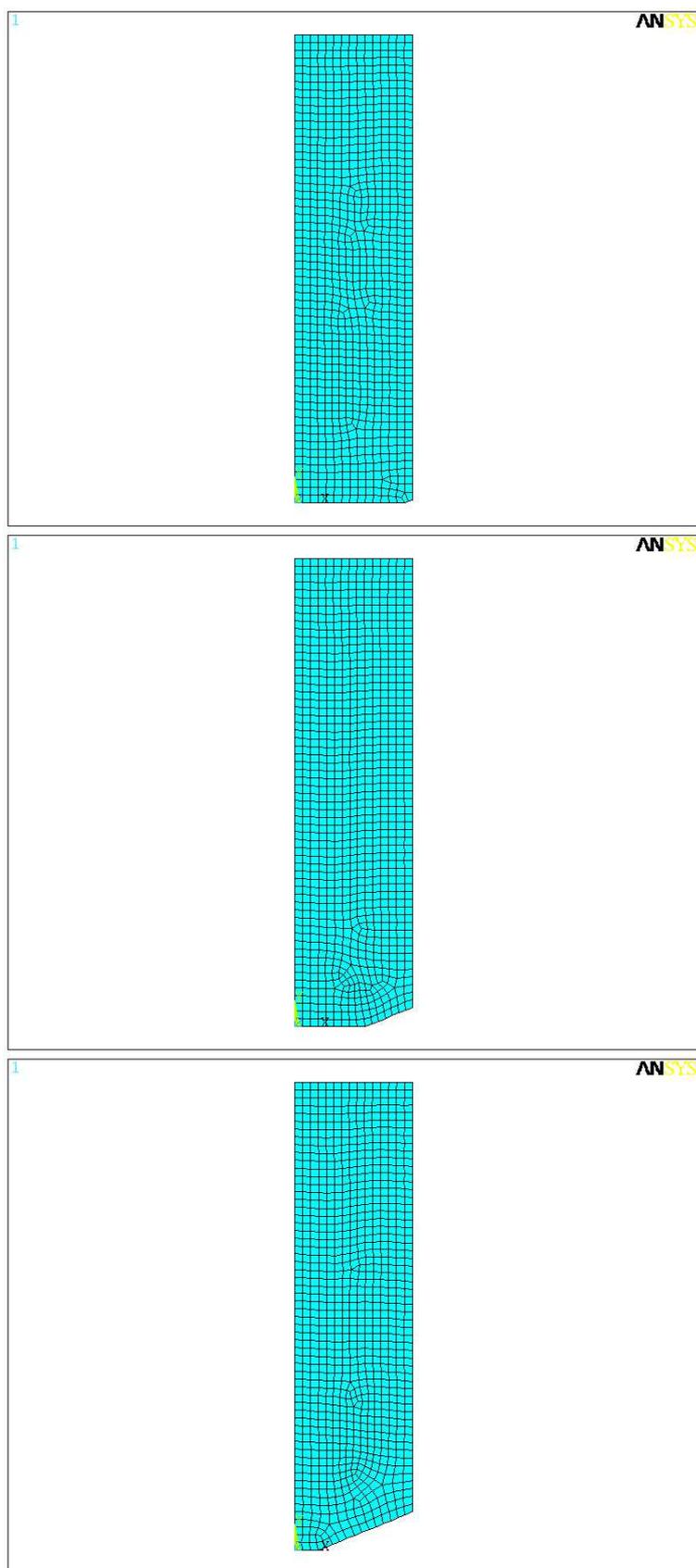


Figura 4.84: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 45^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

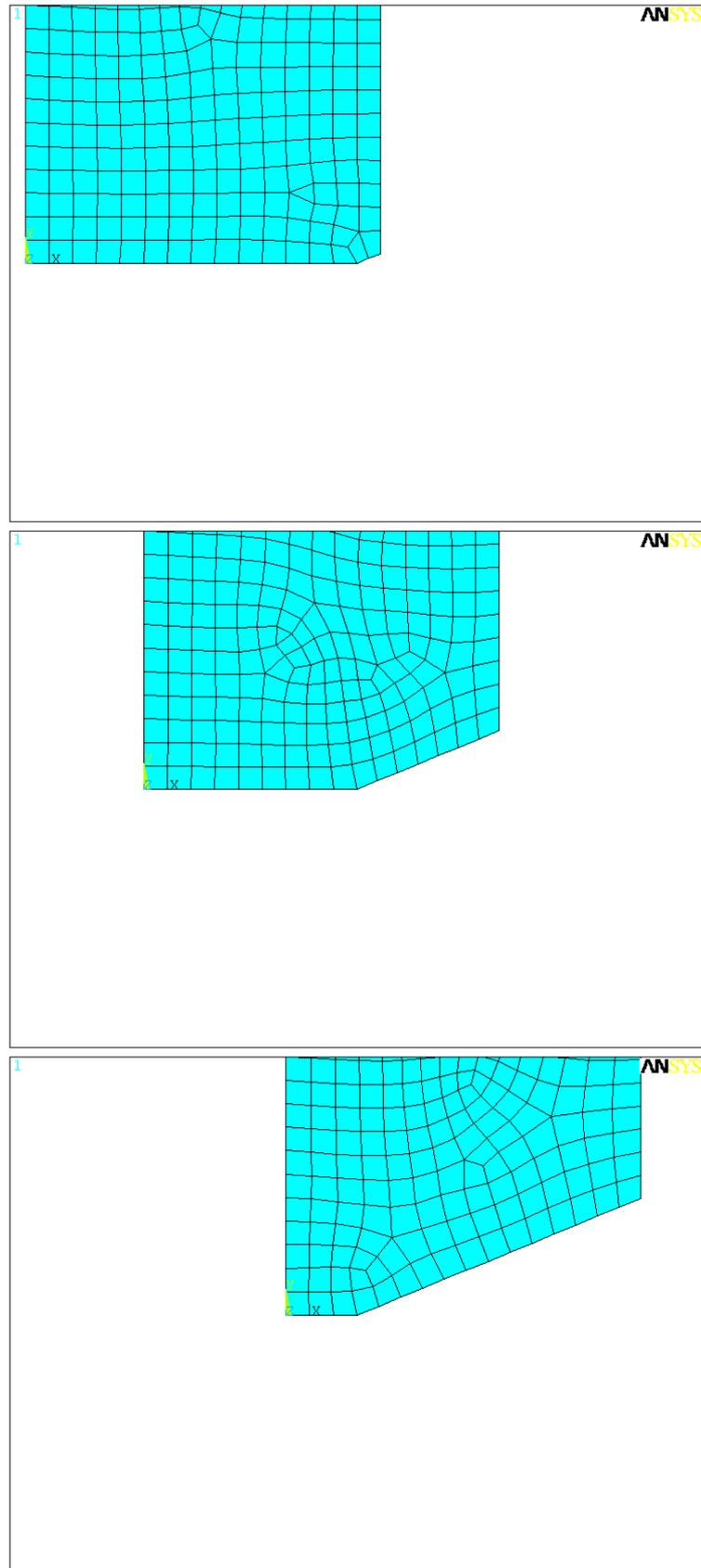


Figura 4.85: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 45^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

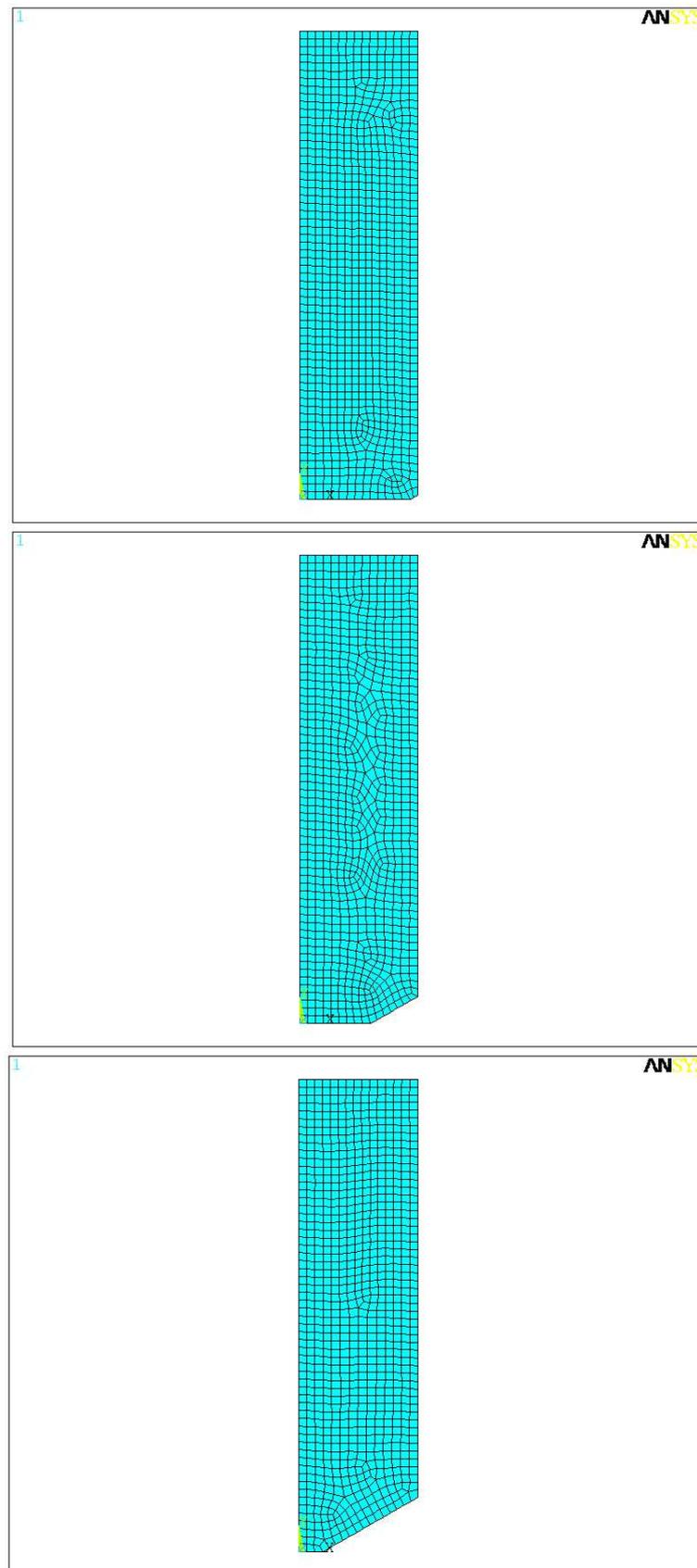


Figura 4.86: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 60^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

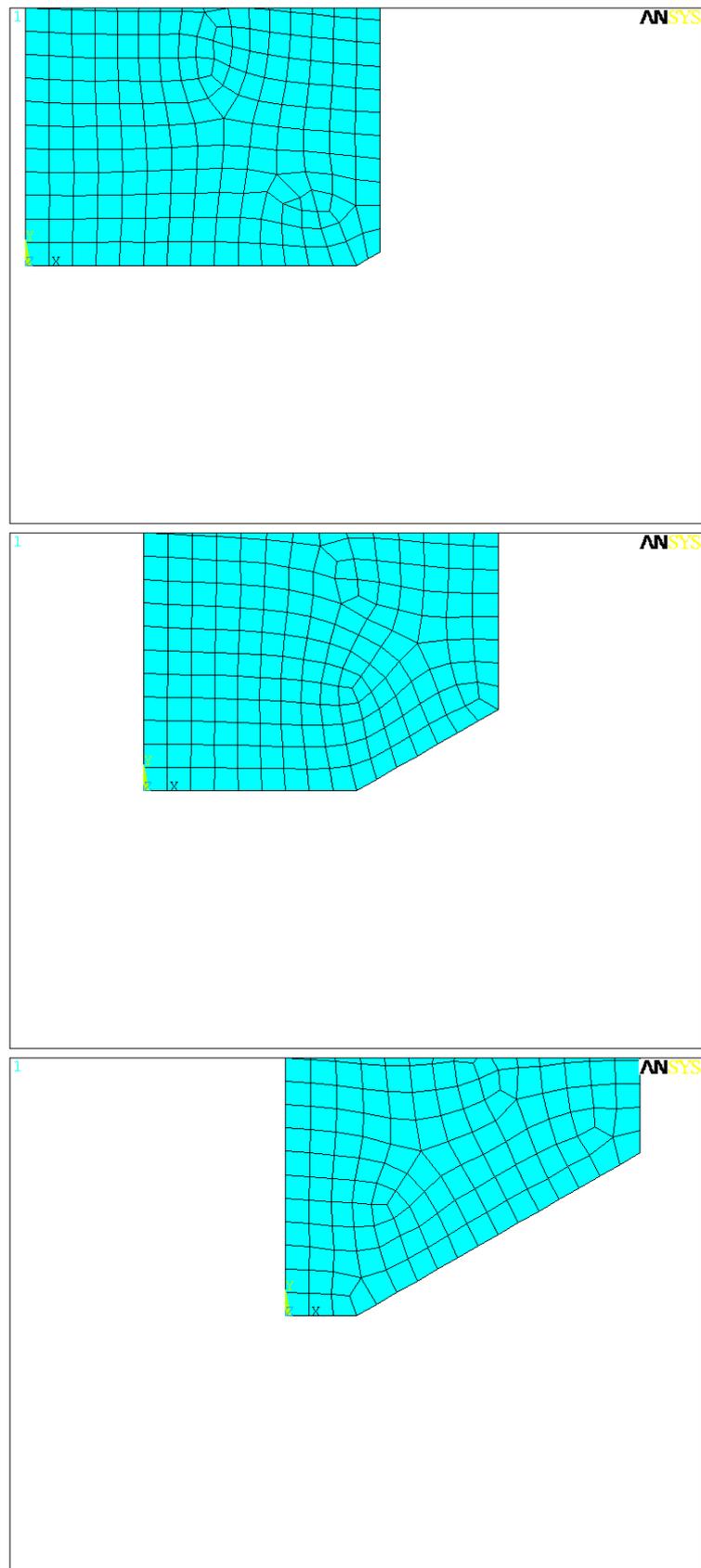


Figura 4.87: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 60^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

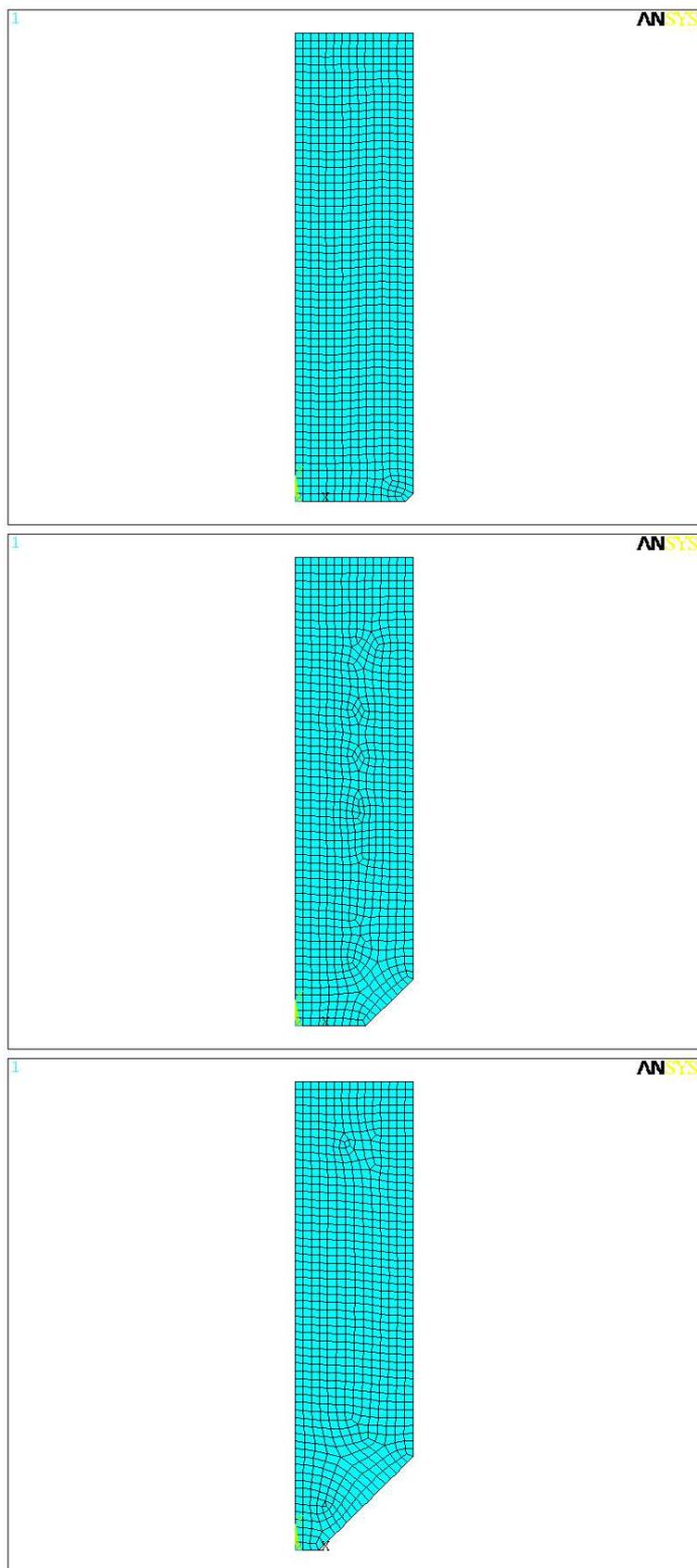


Figura 4.88: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

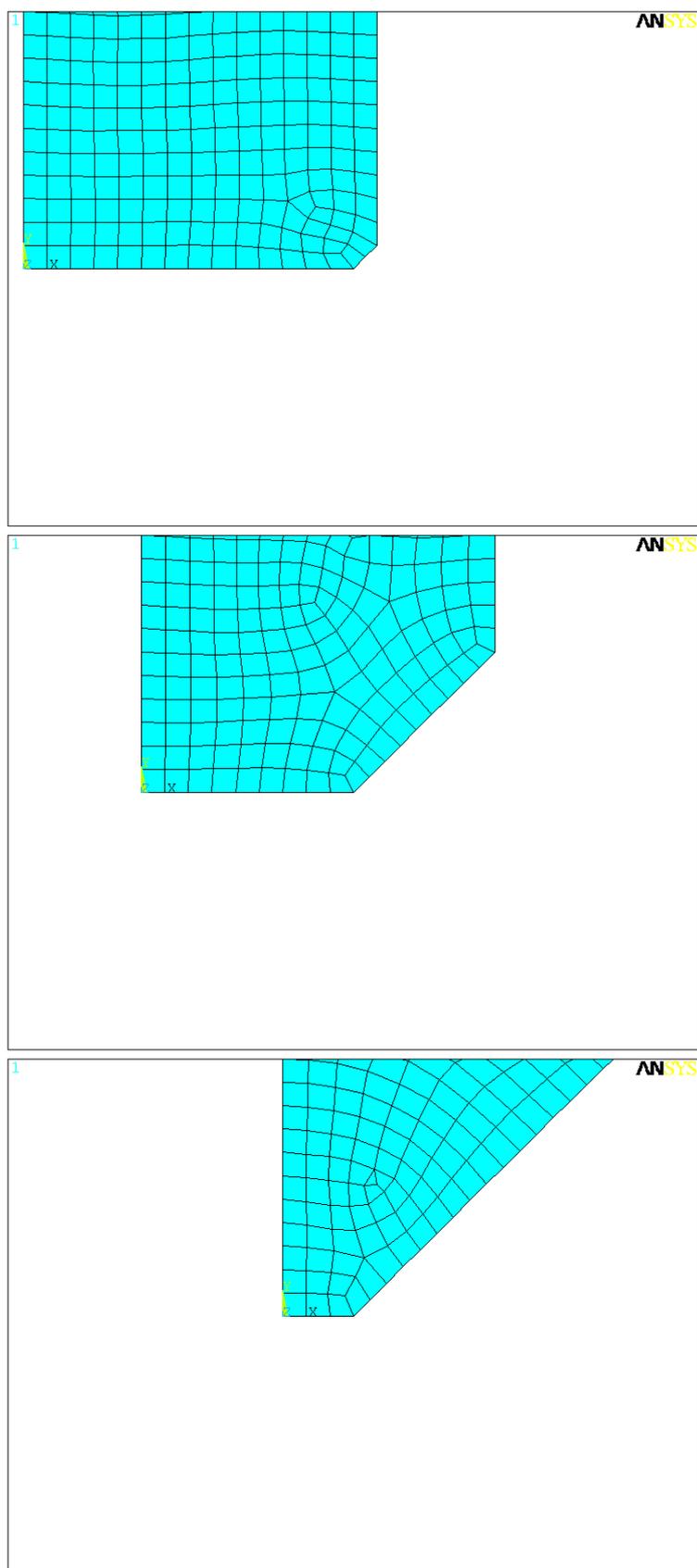


Figura 4.89: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

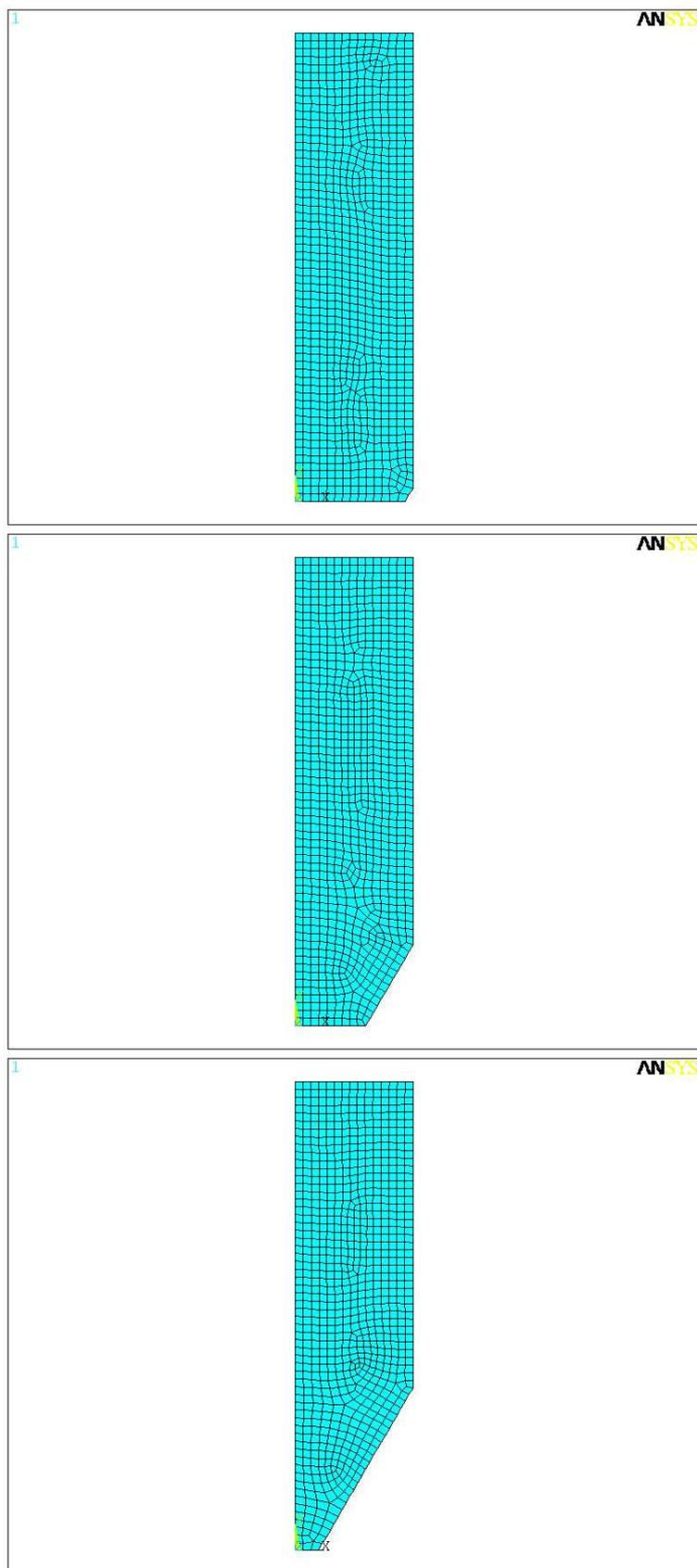


Figura 4.90: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

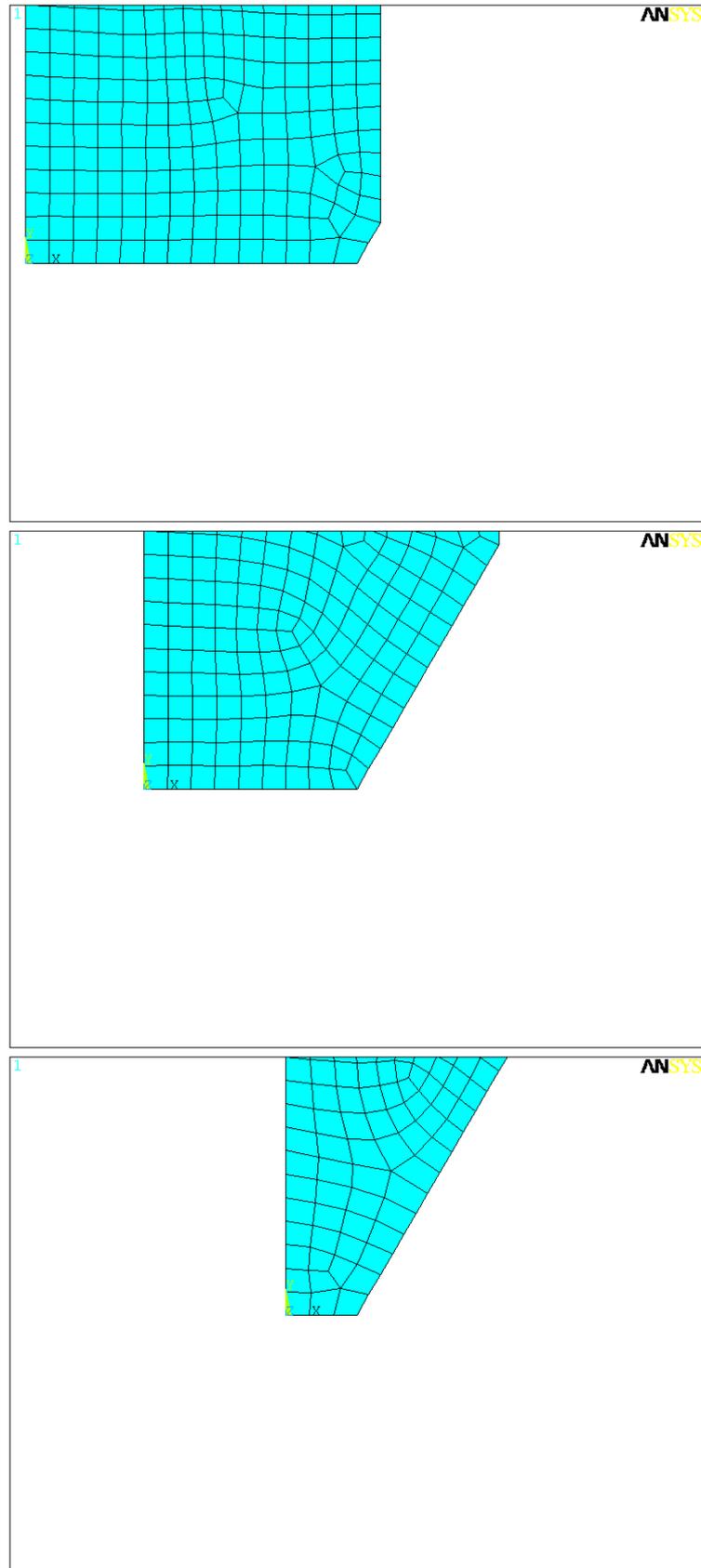


Figura 4.91: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

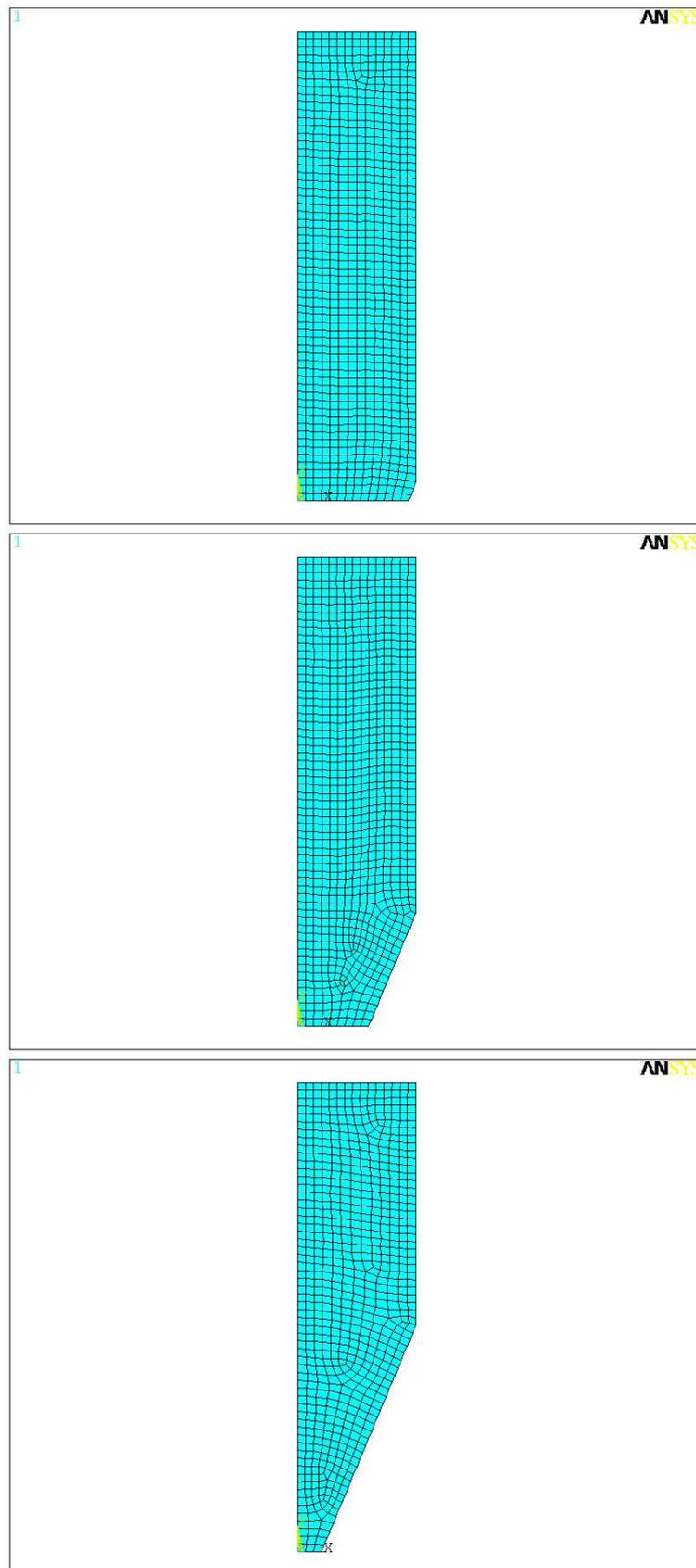


Figura 4.92: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

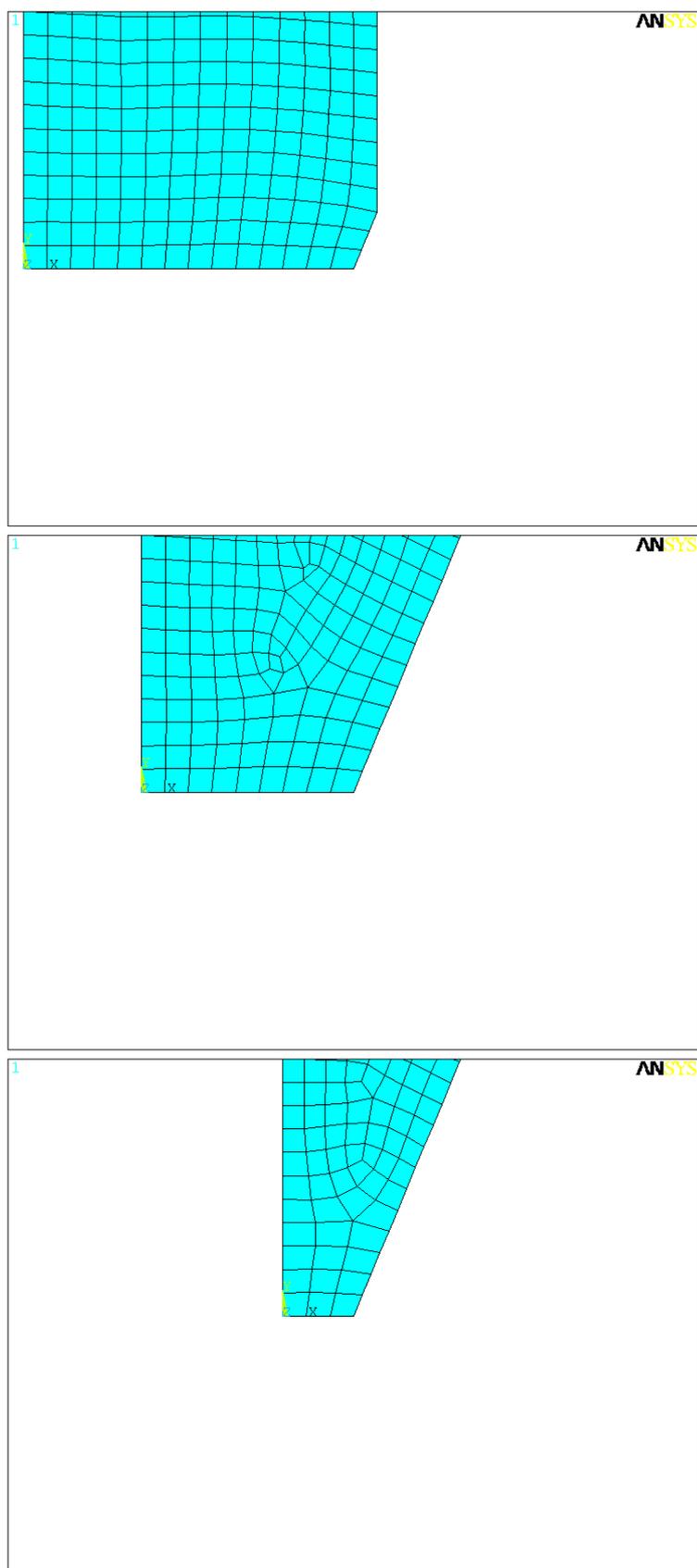


Figura 4.93: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

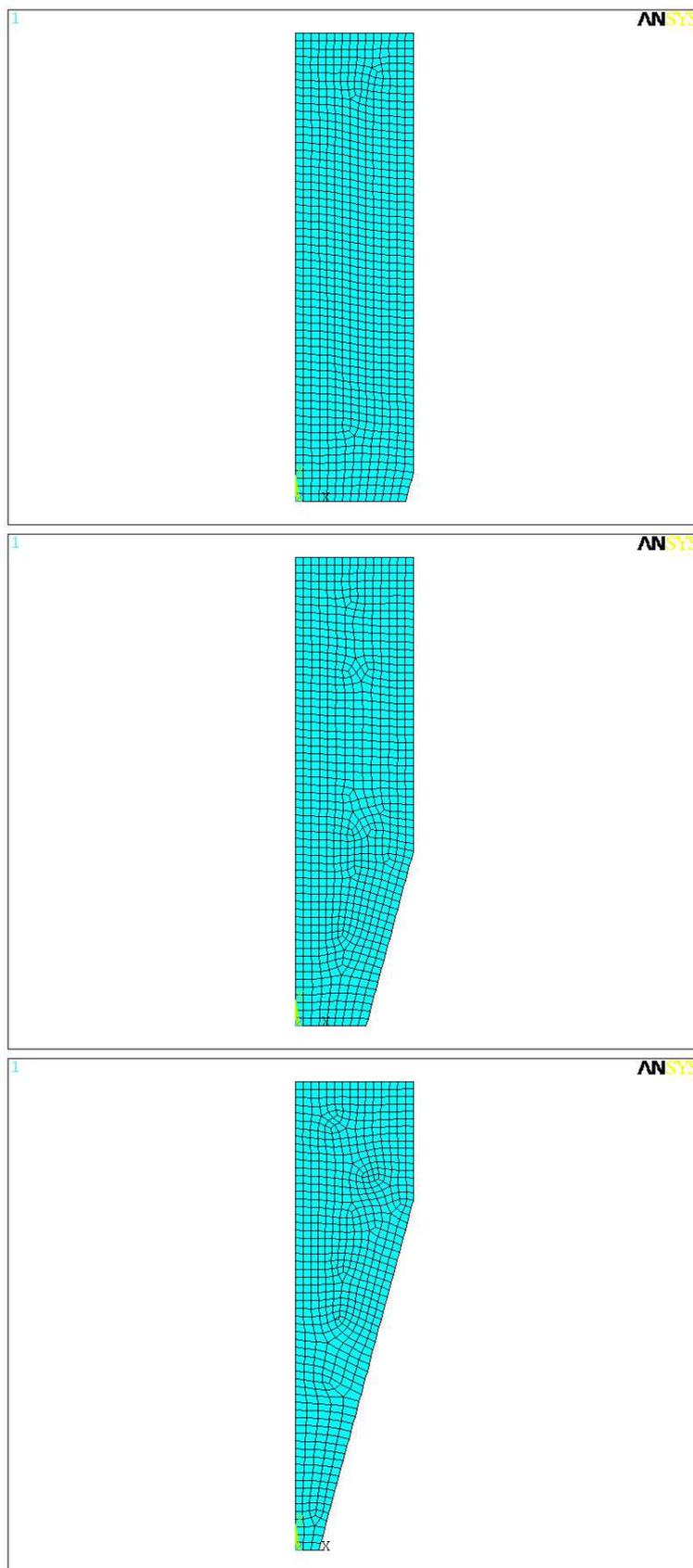


Figura 4.94: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

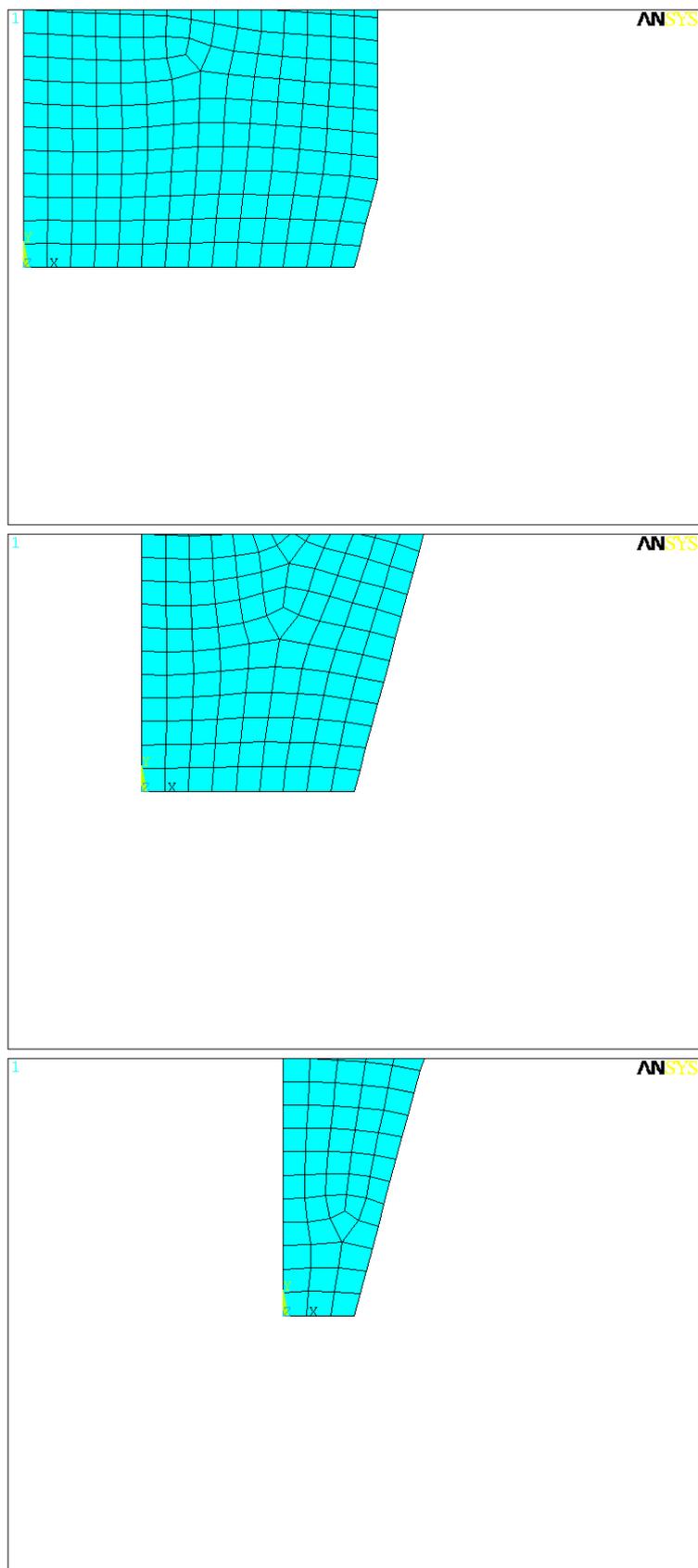


Figura 4.95: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

4.3.4.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

Per quanto riguarda il PSM, l'intera batteria d'analisi pensata nel caso di modo III è realizzata fissando dapprima l'angolo d'apertura dell'intaglio; bloccato questo si è successivamente fissata la global element size utilizzata per la realizzazione della mesh e infine si è iterato sulla dimensione caratteristica dell'intaglio. Terminate quest'ultime si è variato il valore della global element size e infine si è passati all'angolo d'apertura successivo, ripetendo la procedura.

Si elencano di seguito i parametri presi in esame nel presente lavoro:

- Angoli d'apertura: 0°; 30°; 45°; 60°; 90°; 120°; 135°; 150°.
- Dimensioni globali d'elemento: 0.5 mm; 0.4 mm; 0.3 mm; 0.2 mm; 0.1 mm.
- Dimensioni caratteristiche dell'intaglio: da 1 a 14 mm con passo 1 mm.

L'intera batteria d'analisi espressa in termini del parametro adimensionale "a/d" è riportata nella seguente tabella:

d [mm]	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
a [mm]	a/d				
1	2	2.5	3.333333	5	10
2	4	5	6.666667	10	20
3	6	7.5	10	15	30
4	8	10	13.333333	20	40
5	10	12.5	16.666667	25	50
6	12	15	20	30	60
7	14	17.5	23.333333	35	70
8	16	20	26.666667	40	80
9	18	22.5	30	45	90
10	20	25	33.333333	50	100
11	22	27.5	36.666667	55	110
12	24	30	40	60	120
13	26	32.5	43.333333	65	130
14	28	35	46.666667	70	140

Tabella 4.10: Valori del parametro adimensionale a/d per i vari casi analizzati.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal PSM riassumendo in ogni tabella una singola global element size; si è preferito suddividere i risultati riferiti ad ogni angolo d'apertura dell'intaglio in diversi sottoparagrafi.

In tutte le tabelle riportate si noti che:

- a è la dimensione dell'intaglio;
- d è la dimensione globale d'elemento imposta;
- x^* è l'estensione del campo locale di tensione valuta numericamente come già descritto;
- τ_{peak} è la tensione di picco misurata all'apice dell'intaglio e intesa come una τ_{yz} , dove y è la direzione ortogonale alla bisettrice dell'intaglio e z quella uscente dal piano 2D;
- K_{FE}^{***} è il valore adimensionale calcolato numericamente tramite la (1.6).

4.3.4.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 0°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	0.082	0.164	14.972	1.497	1.757
2	4	0.241	0.481	21.385	2.139	1.889
3	6	0.994	1.989	28.412	2.841	1.939
4	8	2.781	5.563	36.865	3.687	1.981
5	10	1.357	2.713	47.76	4.776	2.003
6	12	0.638	1.276	62.953	6.295	2.018
7	14	0.653	1.306	85.354	8.535	2.021
8	16	0.528	1.056	119.01	11.901	2.037
9	18	0.425	0.851	173.88	17.388	2.056
10	20	0.328	0.655	271.47	27.147	2.080
11	22	0.279	0.558	470.82	47.082	2.096
12	24	0.215	0.430	945.68	94.568	2.141
13	26	0.147	0.293	2469.9	246.990	2.253
14	28	0.076	0.151	11545	1154.500	2.723

Tabella 4.11: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0° .

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	0.082	0.205	18.301	1.830	1.607
2	5	0.241	0.601	23.859	2.386	1.893
3	7.5	0.994	2.486	32.743	3.274	1.881
4	10	2.781	6.954	41.313	4.131	1.977
5	12.5	1.357	3.391	55.558	5.556	1.925
6	15	0.638	1.595	71.23	7.123	1.994
7	17.5	0.653	1.633	98.296	9.830	1.962
8	20	0.528	1.320	134.78	13.478	2.011
9	22.5	0.425	1.063	200.67	20.067	1.992
10	25	0.328	0.819	309.76	30.976	2.038
11	27.5	0.279	0.697	541.19	54.119	2.039
12	30	0.215	0.537	1086.4	108.640	2.084
13	32.5	0.147	0.367	2895	289.500	2.149
14	35	0.076	0.189	14235	1423.500	2.469

Tabella 4.12: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	0.082	0.274	19.543	1.954	1.738
2	6.666666667	0.241	0.802	27.868	2.787	1.872
3	10	0.994	3.315	36.987	3.699	1.923
4	13.33333333	2.781	9.272	48.813	4.881	1.932
5	16.66666667	1.357	4.522	63.492	6.349	1.945
6	20	0.638	2.127	83.827	8.383	1.956
7	23.33333333	0.653	2.177	113.58	11.358	1.961
8	26.66666667	0.528	1.760	157.85	15.785	1.983
9	30	0.425	1.418	232.66	23.266	1.984
10	33.33333333	0.328	1.092	365.81	36.581	1.993
11	36.66666667	0.279	0.930	630.6	63.060	2.020
12	40	0.215	0.716	1283.1	128.310	2.038
13	43.33333333	0.147	0.489	3425.1	342.510	2.098
14	46.66666667	0.076	0.252	18081	1808.100	2.245

Tabella 4.13: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	0.082	0.411	22.346	2.235	1.862
2	10	0.241	1.203	33.028	3.303	1.934
3	15	0.994	4.972	44.874	4.487	1.941
4	20	2.781	13.907	58.902	5.890	1.961
5	25	1.357	6.783	77.093	7.709	1.962
6	30	0.638	3.191	102.07	10.207	1.967
7	35	0.653	3.266	138.26	13.826	1.973
8	40	0.528	2.640	193.75	19.375	1.978
9	45	0.425	2.126	284.84	28.484	1.985
10	50	0.328	1.638	447.93	44.793	1.993
11	55	0.279	1.395	777.61	77.761	2.007
12	60	0.215	1.074	1577.2	157.720	2.030
13	65	0.147	0.733	4244.4	424.440	2.073
14	70	0.076	0.379	22714	2271.400	2.188

Tabella 4.14: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	0.082	0.821	30.956	3.096	1.901
2	20	0.241	2.406	46.973	4.697	1.923
3	30	0.994	9.944	64.176	6.418	1.919
4	40	2.781	27.815	84.571	8.457	1.931
5	50	1.357	13.565	110.89	11.089	1.929
6	60	0.638	6.381	147.09	14.709	1.931
7	70	0.653	6.532	199.45	19.945	1.934
8	80	0.528	5.281	279.92	27.992	1.936
9	90	0.425	4.253	412.26	41.226	1.939
10	100	0.328	3.276	650.11	65.011	1.942
11	110	0.279	2.789	1132.2	113.220	1.949
12	120	0.215	2.149	2311.2	231.120	1.959
13	130	0.147	1.466	6295.4	629.540	1.977
14	140	0.076	0.757	34326	3432.600	2.048

Tabella 4.15: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

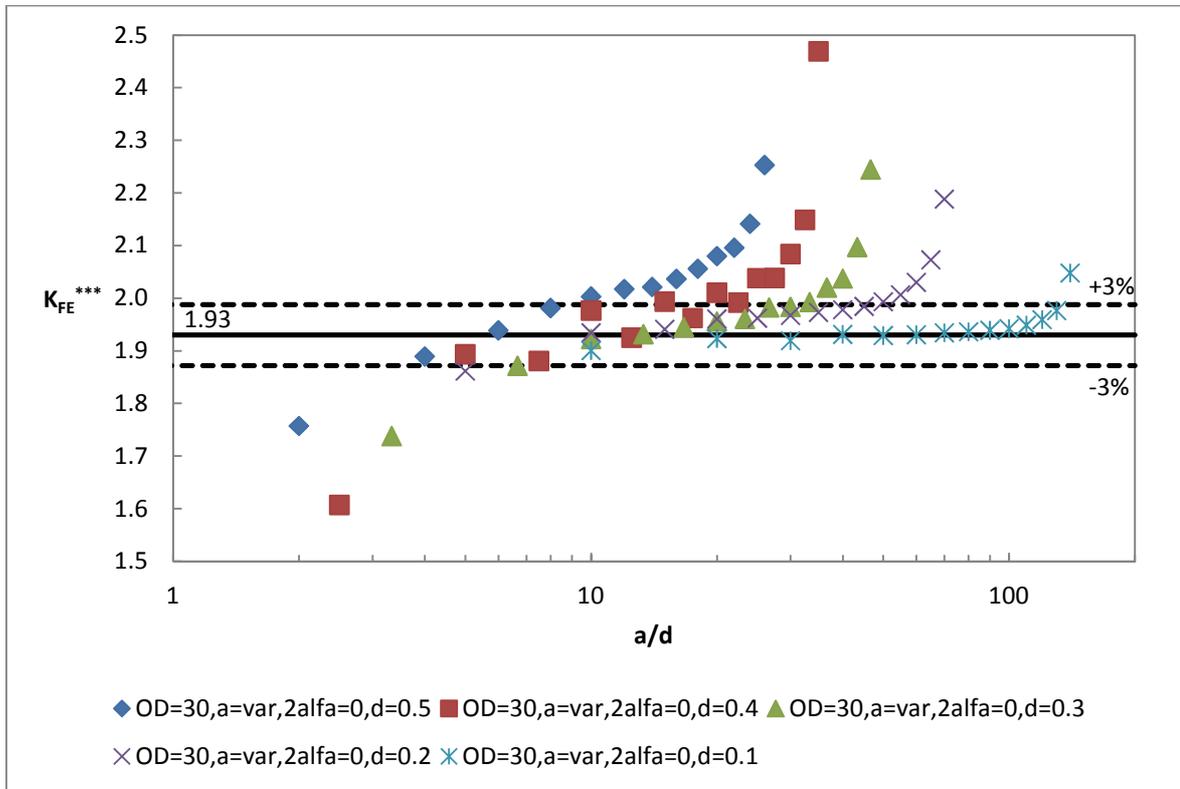


Figura 4.96: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, e in questo caso corrisponde al quello di riferimento calcolato numericamente; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto a quello calcolato.

Ancora una volta si osserva che per elevati valori di a/d , a causa della già citata influenza tra i due campi locali che diminuisce l'estensione x^* , si incorre nuovamente nell'eventualità di utilizzare un numero troppo esiguo di elementi nella zona d'estensione del campo locale di tensione e quindi si osservano dei valori uscenti dalla banda d'accettabilità che non permettono di utilizzare il metodo assumendo un valore del K_{FE}^{***} costante. Riportando invece tutti i risultati in funzione del rapporto tra l'estensione del campo locale di tensione ricavata numericamente e la dimensione globale degli elementi si ottiene l'effetto di spostare i punti che fuoriescono dalla banda, nonostante essi si trovino nella zona a convergenza in termini di a/d , dalla destra del diagramma alla sinistra dello stesso poiché, come appena descritto, l'estensione del campo locale di tensione per cricche di dimensioni molto elevate tende a decrescere.

Si ottiene quindi:

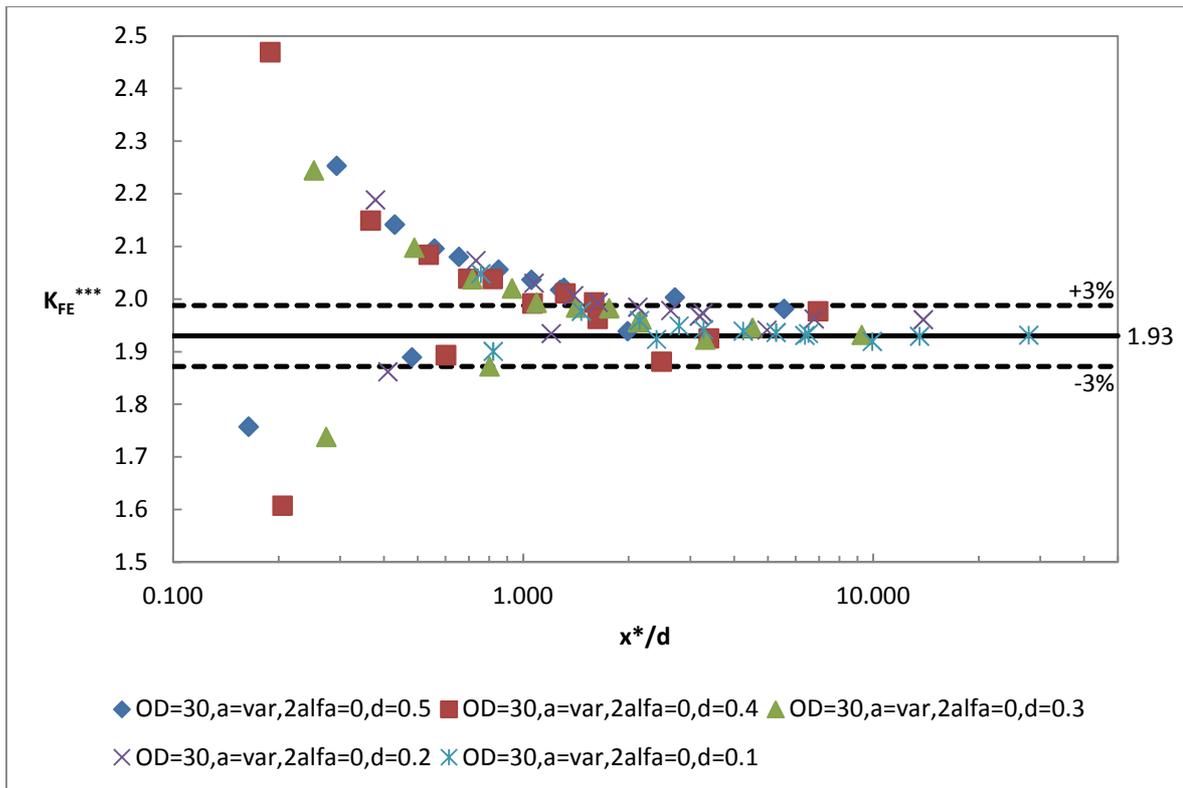


Figura 4.97: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza della cricca. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, e in questo caso corrisponde a quello di riferimento calcolato numericamente; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto a quello calcolato.

Da quest'ultimo diagramma si osserva quindi che la convergenza del metodo è ripristinata grazie a questa nuova definizione riguardo il fattore di convergenza dello stesso; si ricava inoltre che nel caso in esame per assicurare la convergenza del metodo accettando una dispersione del 3% attorno al valore di riferimento, pari a 1.93, è necessario garantire almeno 3 elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione, cioè che sia soddisfatta la seguente relazione:

$$\frac{x^*}{d} \geq 3 \quad (4.5)$$

Si noti inoltre che il valore di riferimento per il K_{FE}^{***} ricavato per angoli d'apertura pari a 0° corrisponde con quello dichiarato in letteratura (fonte: [4]).

4.3.4.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 30°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	0.172	0.343	17.167	1.717	1.693
2	4	0.634	1.269	24.408	2.441	1.771
3	6	2.968	5.937	31.157	3.116	1.865
4	8	1.089	2.179	40.475	4.048	1.883
5	10	0.767	1.534	52.403	5.240	1.896
6	12	0.568	1.136	69.041	6.904	1.910
7	14	0.465	0.930	93.111	9.311	1.927
8	16	0.333	0.666	130.05	13.005	1.944
9	18	0.327	0.653	196.44	19.644	1.914
10	20	0.283	0.566	304	30.400	1.966
11	22	0.220	0.439	511.89	51.189	2.064
12	24	0.170	0.340	1051.6	105.160	2.085
13	26	0.116	0.231	2792.2	279.220	2.202
14	28	0.062	0.124	10958	1095.800	3.260

Tabella 4.16: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	0.172	0.429	17.679	1.768	1.820
2	5	0.634	1.586	27.561	2.756	1.736
3	7.5	2.968	7.421	34.294	3.429	1.875
4	10	1.089	2.723	45.706	4.571	1.846
5	12.5	0.767	1.918	57.666	5.767	1.907
6	15	0.568	1.420	76.433	7.643	1.909
7	17.5	0.465	1.163	104.71	10.471	1.897
8	20	0.333	0.833	146.67	14.667	1.908
9	22.5	0.327	0.817	214.03	21.403	1.944
10	25	0.283	0.708	332.86	33.286	1.988
11	27.5	0.220	0.549	591.61	59.161	1.976
12	30	0.170	0.425	1184.5	118.450	2.049
13	32.5	0.116	0.289	3375.8	337.580	2.016
14	35	0.062	0.154	16934	1693.400	2.335

Tabella 4.17: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	0.172	0.572	20.376	2.038	1.799
2	6.666666667	0.634	2.114	28.572	2.857	1.909
3	10	2.968	9.894	39.407	3.941	1.860
4	13.33333333	1.089	3.631	50.805	5.081	1.892
5	16.66666667	0.767	2.557	69.853	6.985	1.794
6	20	0.568	1.894	86.491	8.649	1.923
7	23.33333333	0.465	1.550	118.85	11.885	1.904
8	26.66666667	0.333	1.110	166.46	16.646	1.916
9	30	0.327	1.089	247.59	24.759	1.916
10	33.33333333	0.283	0.943	399.97	39.997	1.885
11	36.66666667	0.220	0.732	676	67.600	1.971
12	40	0.170	0.567	1413	141.300	1.957
13	43.33333333	0.116	0.385	3780.9	378.090	2.052
14	46.66666667	0.062	0.206	20409	2040.900	2.208

Tabella 4.18: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	0.172	0.858	24.475	2.448	1.801
2	10	0.634	3.172	35.578	3.558	1.843
3	15	2.968	14.841	47.297	4.730	1.863
4	20	1.089	5.446	61.452	6.145	1.881
5	25	0.767	3.836	80.015	8.002	1.883
6	30	0.568	2.841	106.73	10.673	1.874
7	35	0.465	2.326	144.33	14.433	1.885
8	40	0.333	1.666	202.57	20.257	1.893
9	45	0.327	1.633	300.65	30.065	1.897
10	50	0.283	1.415	475.87	47.587	1.905
11	55	0.220	1.098	817.36	81.736	1.960
12	60	0.170	0.850	1715.8	171.580	1.938
13	65	0.116	0.578	4732.7	473.270	1.971
14	70	0.062	0.309	25766	2576.600	2.103

Tabella 4.19: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	0.172	1.715	32.982	3.298	1.832
2	20	0.634	6.343	48.222	4.822	1.863
3	30	2.968	29.683	64.959	6.496	1.859
4	40	1.089	10.893	84.583	8.458	1.873
5	50	0.767	7.672	110.83	11.083	1.863
6	60	0.568	5.681	146.75	14.675	1.867
7	70	0.465	4.651	198.96	19.896	1.874
8	80	0.333	3.331	280.53	28.053	1.873
9	90	0.327	3.266	411.98	41.198	1.897
10	100	0.283	2.830	660.69	66.069	1.880
11	110	0.220	2.196	1149.6	114.960	1.910
12	120	0.170	1.701	2403.4	240.340	1.896
13	130	0.116	1.156	6604.4	660.440	1.935
14	140	0.062	0.618	37342	3734.200	1.988

Tabella 4.20: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

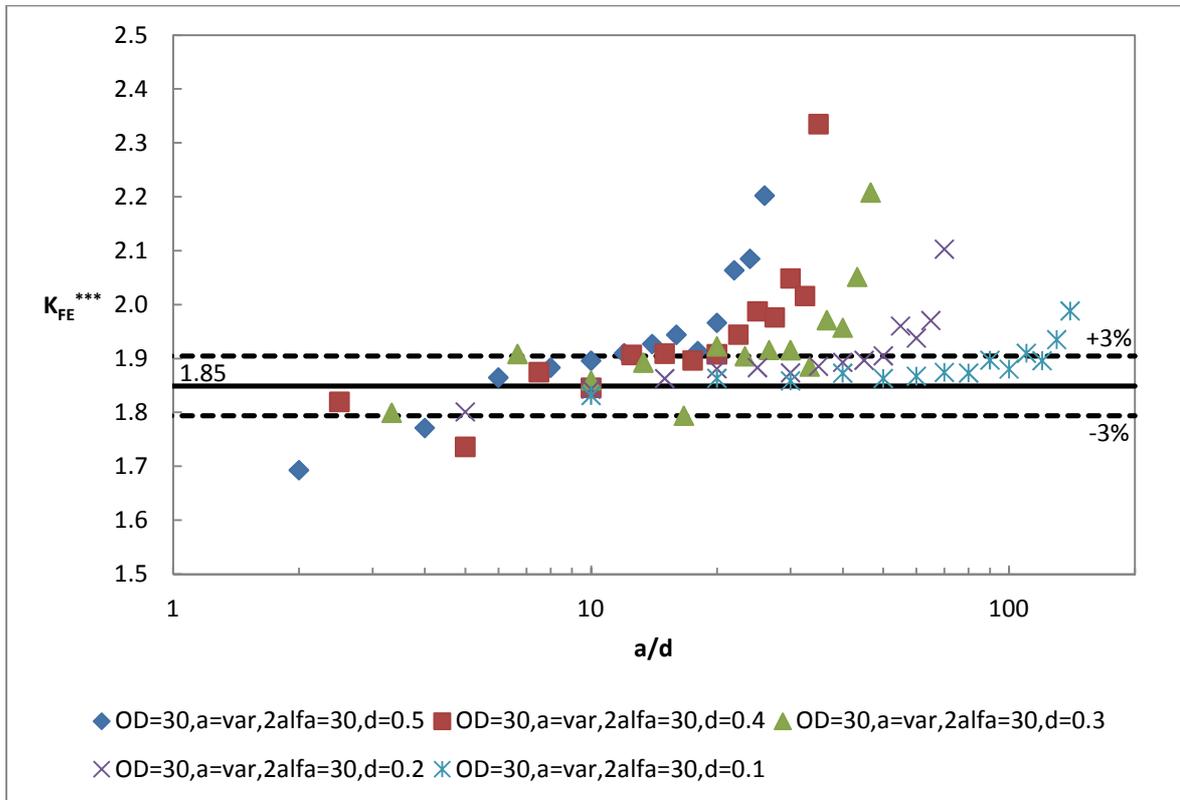


Figura 4.98: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 1.85; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto a quello calcolato.

Innanzitutto in questo caso si nota un rumore maggiore delle curve rispetto al caso con angolo d'apertura 0° (figura 4.96); si osservano infatti delle oscillazioni che rendono meno uniformi le curve. Queste sono causate dal layout della mesh creata: nel caso con angolo d'apertura 0° il layout della mesh rimane sempre uguale al variare sia della dimensione globale d'elemento sia di quella dell'intaglio a causa della semplice geometria che non lascia dubbi al meshatore di Ansys® sulla modalità di stesura dei nodi, mentre nel caso in esame, con angolo d'apertura pari a 30° , quest'ultimo non è più guidato nella stesura dei nodi. Ciò comporta che al variare della dimensione caratteristica dell'intaglio e/o di quella media degli elementi si presentano configurazioni della mesh nei dintorni del punto di singolarità estremamente variabili e anche molto lontane da quelle ottimali descritte in [7] e riportate in figura 1.4.

Anche in questo caso valgono le considerazioni già svolte a riguardo dell'andamento delle curve e del criterio di convergenza adottato; per riportare il metodo al corretto funzionamento è necessario esprimere il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , cioè del numero d'elementi che sono posizionati nella zona d'estensione del campo locale di tensione, come riportato nella figura successiva.

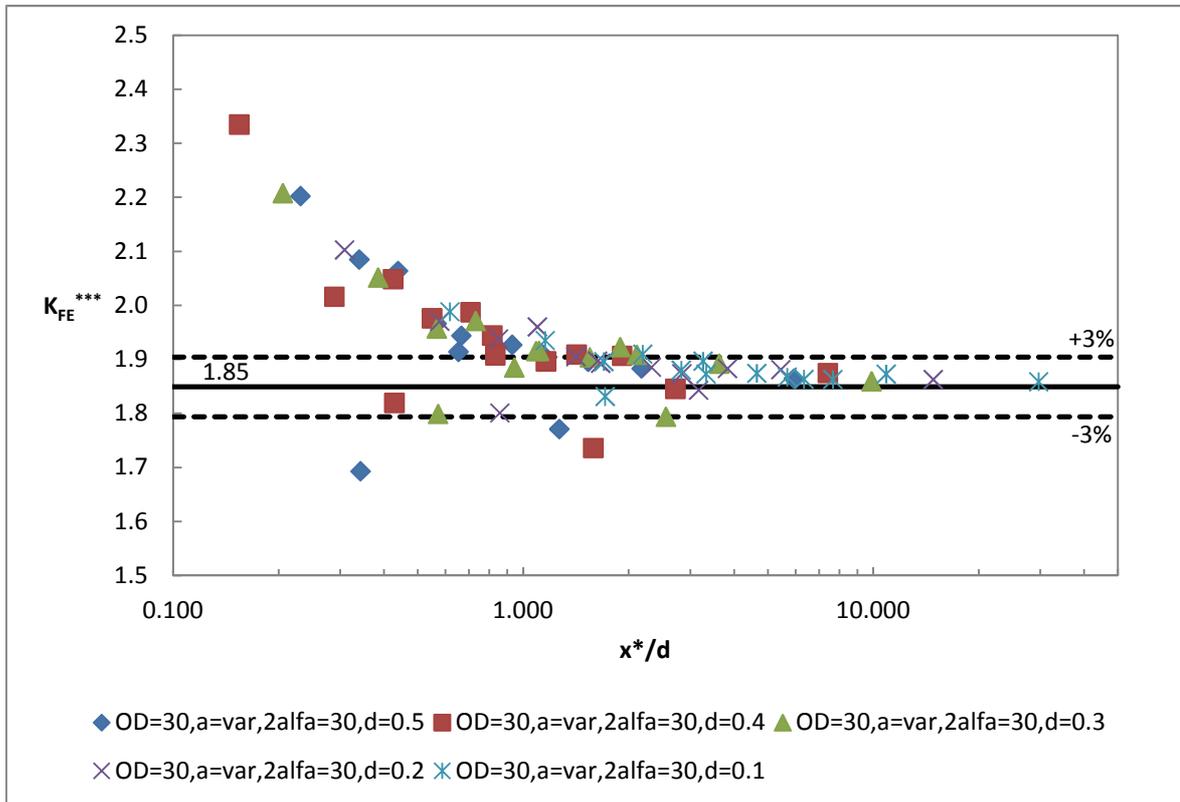


Figura 4.99: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 1.85; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto a quello calcolato.

Il valore di riferimento calcolato in questo caso, pari a 1.85, differisce da quello espresso in letteratura in [4] che è pari a 1.93.

Si osserva quindi che il corretto funzionamento del metodo è ripristinato grazie a questa variazione nella definizione del criterio di convergenza; nel caso in esame, inoltre, per assicurare la convergenza del metodo accettando una dispersione del 3% attorno al valore di riferimento calcolato è necessario garantire almeno 3 elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione, cioè deve essere soddisfatta la:

$$\frac{x^*}{d} \geq 3 \quad (4.6)$$

4.3.4.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 45°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	0.209	0.417	16.365	1.637	1.845
2	4	1.242	2.483	24.609	2.461	1.802
3	6	1.911	3.822	31.975	3.198	1.858
4	8	0.475	0.950	40.885	4.089	1.894
5	10	0.608	1.216	53.034	5.303	1.905
6	12	0.476	0.952	69.744	6.974	1.926
7	14	0.355	0.709	95.238	9.524	1.923
8	16	0.318	0.636	133.2	13.320	1.944
9	18	0.270	0.541	196.92	19.692	1.954
10	20	0.253	0.507	312.36	31.236	1.971
11	22	0.203	0.406	544.41	54.441	2.007
12	24	0.151	0.302	1128.1	112.810	2.025
13	26	0.107	0.214	2968.7	296.870	2.174
14	28	0.053	0.106	13104	1310.400	2.933

Tabella 4.21: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	0.209	0.522	18.796	1.880	1.768
2	5	1.242	3.104	26.471	2.647	1.843
3	7.5	1.911	4.778	35.287	3.529	1.853
4	10	0.475	1.188	45.369	4.537	1.879
5	12.5	0.608	1.520	58.818	5.882	1.890
6	15	0.476	1.190	86.969	8.697	1.700
7	17.5	0.355	0.887	105.32	10.532	1.914
8	20	0.318	0.795	148.63	14.863	1.917
9	22.5	0.270	0.676	219.5	21.950	1.929
10	25	0.253	0.634	352.24	35.224	1.924
11	27.5	0.203	0.508	605.1	60.510	1.987
12	30	0.151	0.377	1271.7	127.170	1.977
13	32.5	0.107	0.268	3381.8	338.180	2.100
14	35	0.053	0.133	20850	2085.000	2.029

Tabella 4.22: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	0.209	0.696	22.814	2.281	1.648
2	6.666666667	1.242	4.139	32.198	3.220	1.714
3	10	1.911	6.371	39.701	3.970	1.863
4	13.33333333	0.475	1.583	49.032	4.903	1.966
5	16.66666667	0.608	2.027	75.311	7.531	1.670
6	20	0.476	1.586	88.698	8.870	1.885
7	23.33333333	0.355	1.182	134.62	13.462	1.694
8	26.66666667	0.318	1.060	169.34	16.934	1.903
9	30	0.270	0.902	251.85	25.185	1.902
10	33.33333333	0.253	0.845	399.93	39.993	1.917
11	36.66666667	0.203	0.677	704.61	70.461	1.930
12	40	0.151	0.503	1443.7	144.370	1.970
13	43.33333333	0.107	0.357	3962.7	396.270	2.027
14	46.66666667	0.053	0.177	21987	2198.700	2.176

Tabella 4.23: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	0.209	1.043	24.962	2.496	1.792
2	10	1.242	6.208	35.639	3.564	1.843
3	15	1.911	9.556	47.428	4.743	1.855
4	20	0.475	2.375	61.622	6.162	1.862
5	25	0.608	3.041	80.372	8.037	1.862
6	30	0.476	2.379	106.44	10.644	1.869
7	35	0.355	1.773	144.52	14.452	1.877
8	40	0.318	1.590	203.96	20.396	1.880
9	45	0.270	1.352	301.01	30.101	1.893
10	50	0.253	1.267	481.9	48.190	1.892
11	55	0.203	1.015	848.21	84.821	1.907
12	60	0.151	0.754	1749.7	174.970	1.934
13	65	0.107	0.535	4875.6	487.560	1.960
14	70	0.053	0.265	27321	2732.100	2.084

Tabella 4.24: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	0.209	2.087	32.831	3.283	1.834
2	20	1.242	12.416	48.059	4.806	1.839
3	30	1.911	19.112	64.069	6.407	1.848
4	40	0.475	4.750	82.176	8.218	1.879
5	50	0.608	6.082	108.84	10.884	1.851
6	60	0.476	4.759	143.99	14.399	1.859
7	70	0.355	3.546	196.08	19.608	1.862
8	80	0.318	3.179	276.74	27.674	1.865
9	90	0.270	2.705	411.45	41.145	1.864
10	100	0.253	2.534	657.55	65.755	1.867
11	110	0.203	2.030	1161.8	116.180	1.874
12	120	0.151	1.508	2418	241.800	1.883
13	130	0.107	1.070	6780.5	678.050	1.897
14	140	0.053	0.531	38935	3893.500	1.968

Tabella 4.25: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

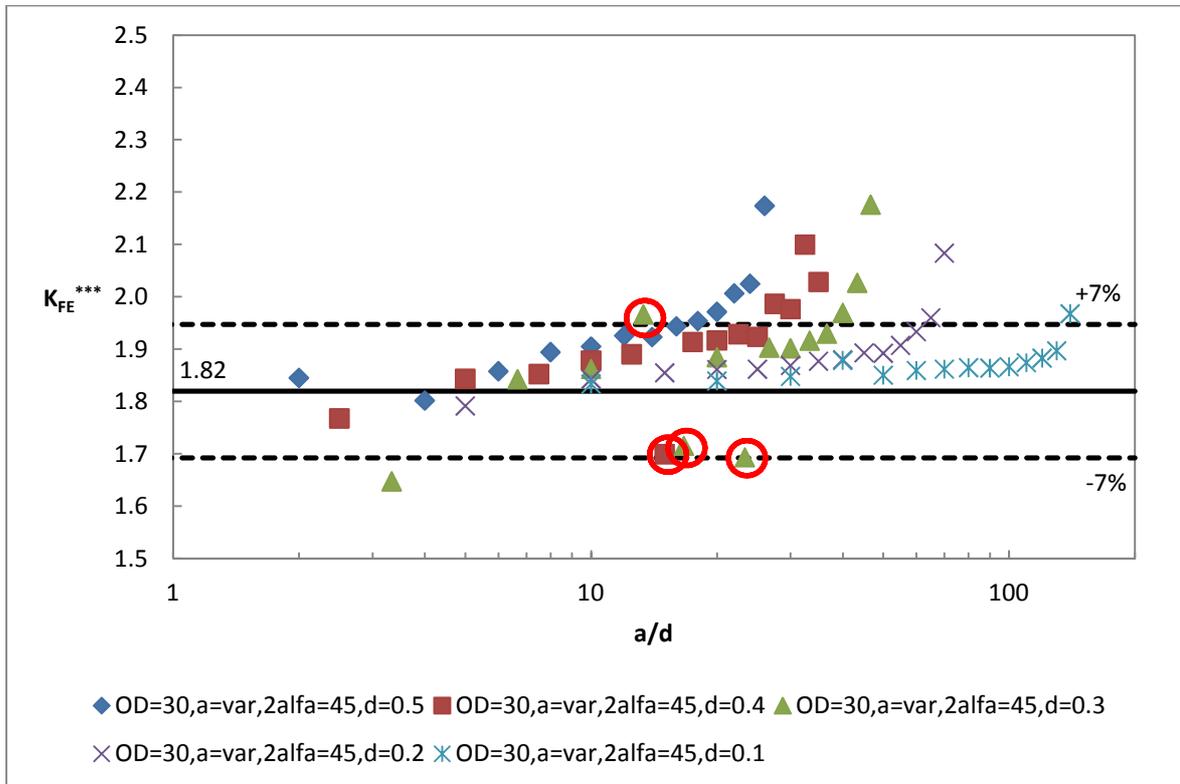


Figura 4.100: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.82; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 7% rispetto al valore calcolato.

In questo caso si osserva che alcuni punti si trovano in posizioni molto scostate rispetto a quelle attese. Ancora una volta ciò è legato al layout che la mesh assume in quei casi particolari: senza alcuna guida il meshatore procede alla creazione di nodi ed elementi che, in alcuni casi, risultano molto lontani in termini di configurazione rispetto a quanto desiderato. Analizzando una ad una le varie mesh ottenute nell'intorno dell'apice dell'intaglio al variare della geometria è possibile confermare la teoria appena esposta. Si riportano di seguito le mesh dei 4 casi che presentano un'elevata differenza rispetto alla configurazione desiderata visibile in figura 1.4 (prendere a riferimento il caso con angolo d'apertura di 30°); si vuole inoltre sottolineare che buona parte delle mesh ottenute con questo procedimento di meshatura presentano delle lievi differenze rispetto a quanto suggerito in letteratura, ma quelle segnalate sono quelle per le quali queste differenze sono marcate.

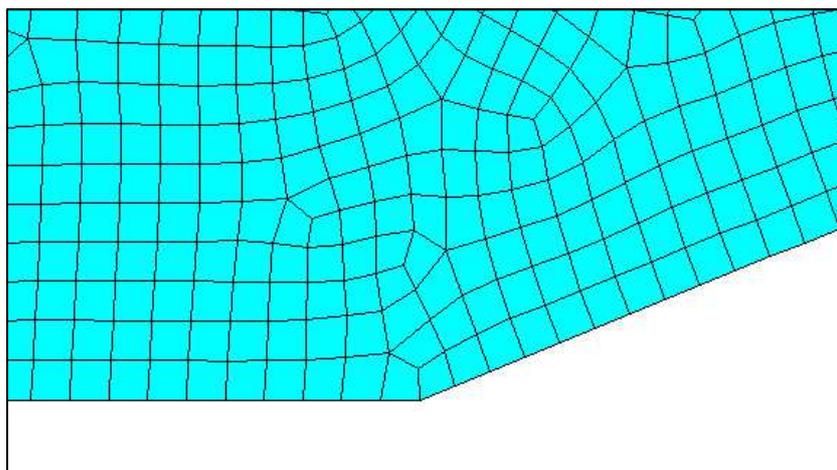


Figura 4.101: Layout della mesh distorta nell'intorno del punto di singolarità geometrica. Questo caso è riferito ad una dimensione d'intaglio pari a 6 mm e una dimensione globale d'elemento di 0.4 mm.

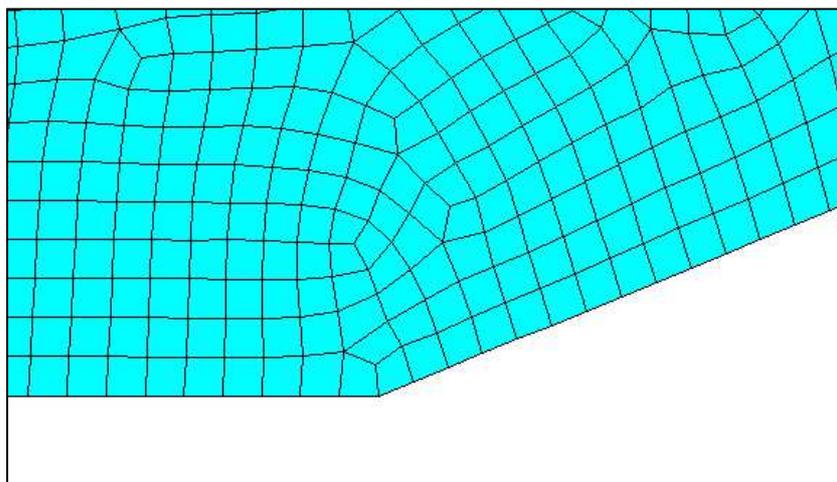


Figura 4.102: Layout della mesh distorta nell'intorno del punto di singolarità geometrica. Questo caso è riferito ad una dimensione d'intaglio pari a 4 mm e una dimensione globale d'elemento di 0.3 mm.

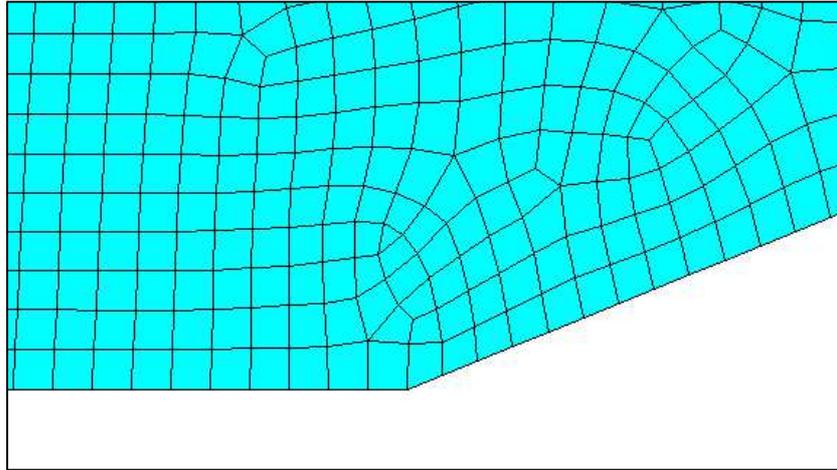


Figura 4.103: Layout della mesh distorta nell'intorno del punto di singolarità geometrica. Questo caso è riferito ad una dimensione d'intaglio pari a 5 mm e una dimensione globale d'elemento di 0.3 mm.

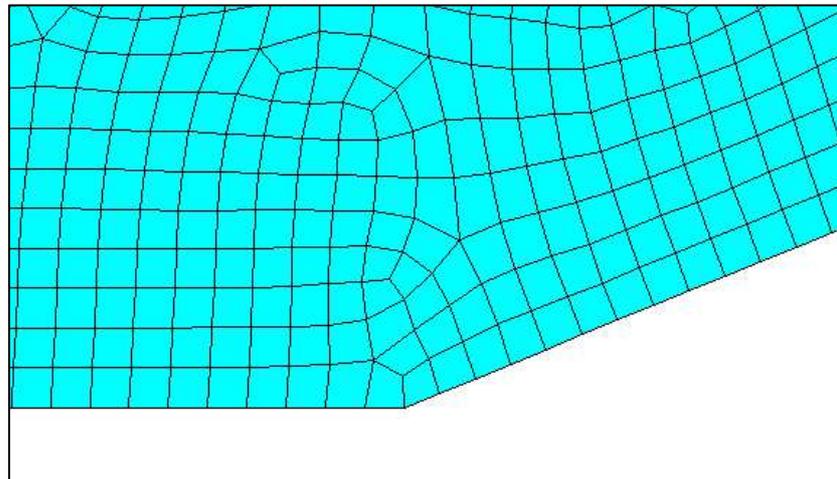


Figura 4.104: Layout della mesh distorta nell'intorno del punto di singolarità geometrica. Questo caso è riferito ad una dimensione d'intaglio pari a 7 mm e una dimensione globale d'elemento di 0.3 mm.

I risultati relativi alle mesh sopracitate sono stati segnalati nelle figure 4.100 e 4.105 con dei simboli rossi; come si nota essi si discostano molto dagli andamenti attesi. Risulta inoltre necessario far notare che i punti segnalati non sono gli unici per i quali si è ottenuta una mesh con una distorsione rispetto al layout desiderato, ma ne esistono anche altri che presentano lievi variazioni rispetto alla configurazione ottimale e che sono localizzati soprattutto per molto piccole o molto grandi dimensioni d'intaglio; nella figura sono stati segnalati solamente quelli che presentano le differenze più elevate. Anche in questo caso valgono le considerazioni già svolte a riguardo dell'andamento delle curve e al criterio di convergenza adottato; per riportare il metodo al corretto funzionamento è ancora una volta necessario esprimere il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d come riportato nella figura successiva,

dove sono stati nuovamente segnalati i punti che presentano una mesh molto diversa da quella desiderata.

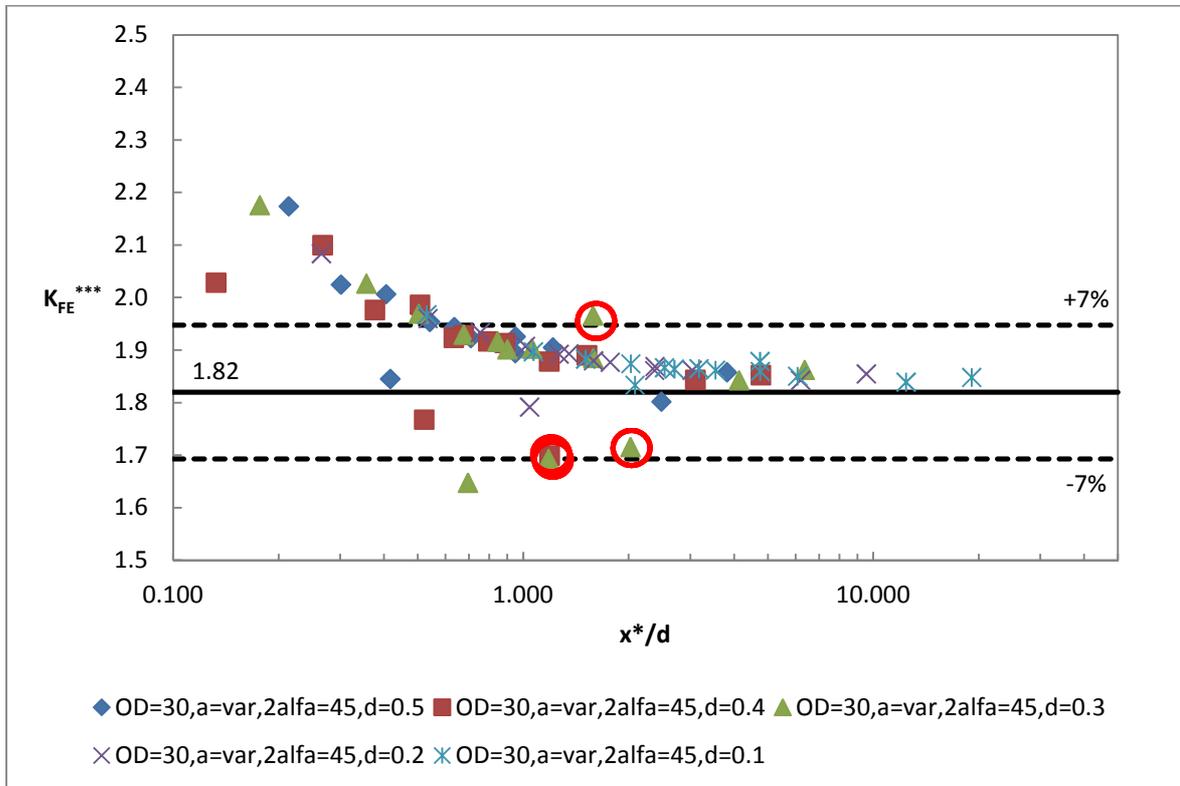


Figura 4.105: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.82; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 7% rispetto al valore calcolato.

Il valore medio del K_{FE}^{***} ricavato in questo caso, pari a 1.82, differisce da quello dichiarato in letteratura in [4] che è pari a 1.93.

Si osserva inoltre che, soprattutto a causa dei punti segnalati in rosso che presentano una mesh molto distorta rispetto a quella desiderata, la convergenza del metodo con questo secondo criterio di convergenza è ripristinata previa l'accettazione di un'ampiezza della banda d'accettabilità molto elevata e pari al 7% del valore di riferimento calcolato; la convergenza stessa è assicurata per un $x^*/d \geq 2$ circa.

4.3.4.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 60°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	0.304	0.607	18.234	1.823	1.735
2	4	4.208	8.416	24.131	2.413	1.895
3	6	1.095	2.190	31.941	3.194	1.897
4	8	0.666	1.332	41.716	4.172	1.883
5	10	0.510	1.020	53.747	5.375	1.908
6	12	0.414	0.828	70.576	7.058	1.930
7	14	0.383	0.767	96.565	9.657	1.922
8	16	0.333	0.666	135.49	13.549	1.943
9	18	0.291	0.581	200.9	20.090	1.955
10	20	0.243	0.487	324.04	32.404	1.948
11	22	0.193	0.387	560.17	56.017	2.013
12	24	0.139	0.279	1143.4	114.340	2.084
13	26	0.100	0.200	3160.3	316.030	2.160
14	28	0.050	0.100	14248	1424.800	2.898

Tabella 4.26: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	0.304	0.759	18.822	1.882	1.838
2	5	4.208	10.520	29.093	2.909	1.718
3	7.5	1.095	2.738	35.162	3.516	1.884
4	10	0.666	1.665	49.137	4.914	1.747
5	12.5	0.510	1.275	59.162	5.916	1.895
6	15	0.414	1.034	85.717	8.572	1.738
7	17.5	0.383	0.959	106.32	10.632	1.909
8	20	0.333	0.833	163.26	16.326	1.763
9	22.5	0.291	0.727	241.95	24.195	1.775
10	25	0.243	0.609	389.41	38.941	1.773
11	27.5	0.193	0.484	630.7	63.070	1.955
12	30	0.139	0.348	1432.1	143.210	1.819
13	32.5	0.100	0.250	3523	352.300	2.119
14	35	0.050	0.125	20177	2017.700	2.237

Tabella 4.27: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	0.304	1.012	22.575	2.258	1.719
2	6.666666667	4.208	14.027	32.74	3.274	1.713
3	10	1.095	3.650	39.636	3.964	1.875
4	13.33333333	0.666	2.220	55.608	5.561	1.732
5	16.66666667	0.510	1.700	72.976	7.298	1.724
6	20	0.414	1.379	88.406	8.841	1.890
7	23.33333333	0.383	1.278	130.27	13.027	1.748
8	26.66666667	0.333	1.110	183.33	18.333	1.762
9	30	0.291	0.969	251.51	25.151	1.916
10	33.33333333	0.243	0.812	436.2	43.620	1.776
11	36.66666667	0.193	0.645	785.48	78.548	1.761
12	40	0.139	0.464	1499.6	149.960	1.949
13	43.33333333	0.100	0.333	4543	454.300	1.843
14	46.66666667	0.050	0.167	26785	2678.500	1.891

Tabella 4.28: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	0.304	1.518	24.764	2.476	1.843
2	10	4.208	21.041	35.495	3.550	1.858
3	15	1.095	5.475	46.828	4.683	1.866
4	20	0.666	3.329	60.717	6.072	1.866
5	25	0.510	2.550	78.553	7.855	1.883
6	30	0.414	2.069	104.3	10.430	1.884
7	35	0.383	1.917	142.01	14.201	1.886
8	40	0.333	1.665	201.06	20.106	1.889
9	45	0.291	1.454	300.63	30.063	1.885
10	50	0.243	1.217	477.8	47.780	1.906
11	55	0.193	0.967	847.87	84.787	1.919
12	60	0.139	0.696	1770.9	177.090	1.941
13	65	0.100	0.500	5041.7	504.170	1.953
14	70	0.050	0.251	28114	2811.400	2.119

Tabella 4.29: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	0.304	3.037	32.686	3.269	1.843
2	20	4.208	42.081	46.98	4.698	1.853
3	30	1.095	10.950	61.78	6.178	1.867
4	40	0.666	6.659	80.29	8.029	1.862
5	50	0.510	5.100	104.38	10.438	1.870
6	60	0.414	4.138	138.59	13.859	1.871
7	70	0.383	3.834	185.56	18.556	1.904
8	80	0.333	3.330	267.42	26.742	1.874
9	90	0.291	2.907	398.68	39.868	1.876
10	100	0.243	2.435	639.54	63.954	1.879
11	110	0.193	1.935	1138.9	113.890	1.885
12	120	0.139	1.393	2391.1	239.110	1.897
13	130	0.100	0.999	6784.6	678.460	1.915
14	140	0.050	0.502	39611	3961.100	1.984

Tabella 4.30: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

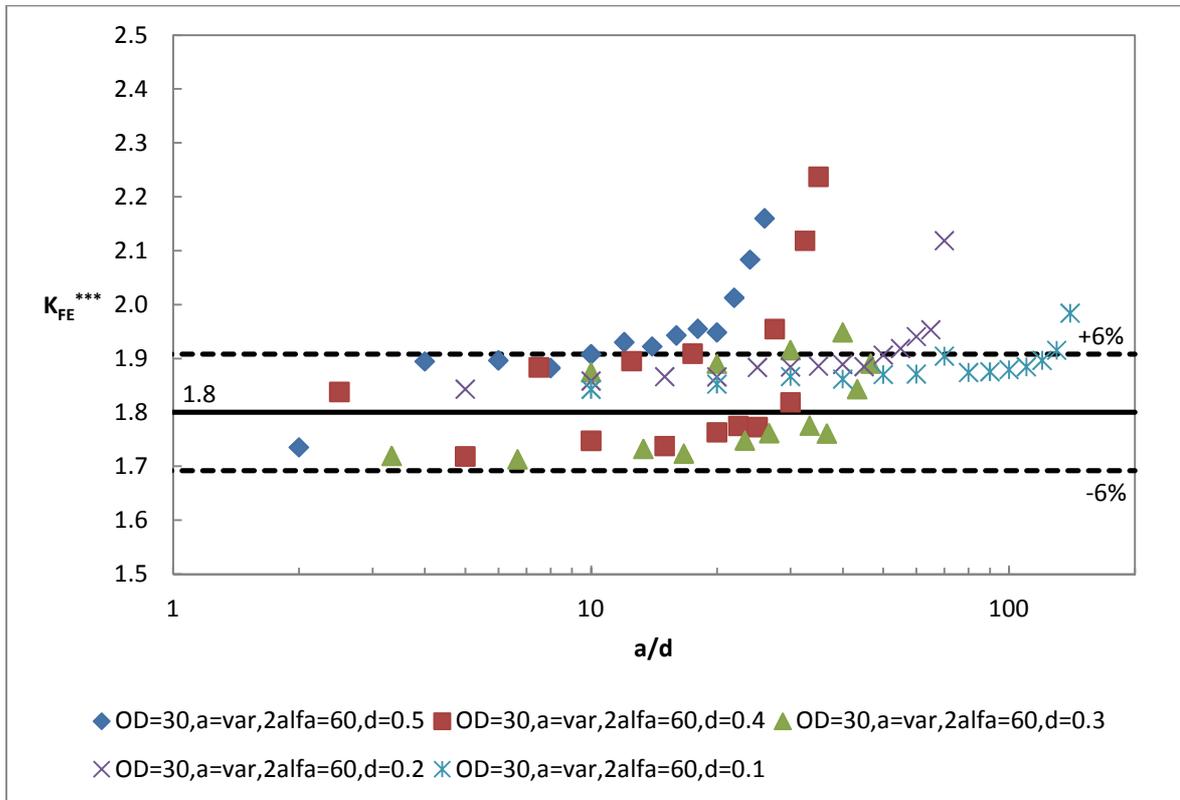


Figura 4.106: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 1.8; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 6% rispetto al valore calcolato.

Anche in questo caso si osserva una marcata deviazione dei risultati rispetto alle curve attese; ancora una volta ciò è dovuto alla differenza del layout della mesh che si ottiene al variare della dimensione caratteristica dell'intaglio e della global element size.

Di seguito si riportano degli esempi delle mesh ottenute con questa geometria:

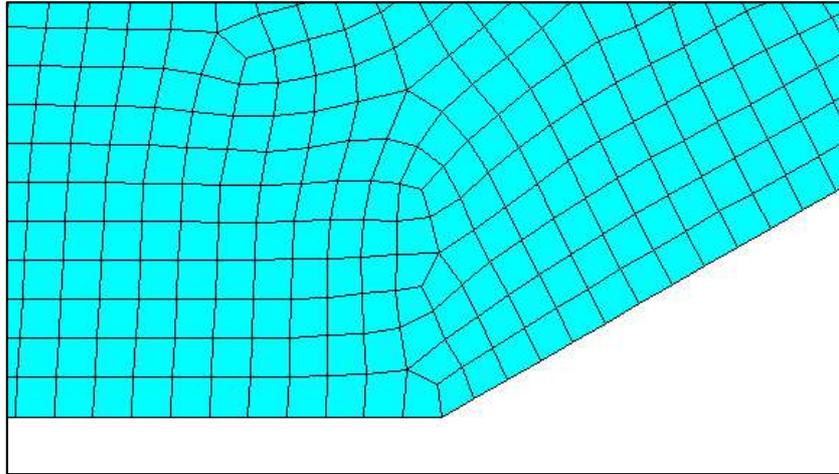


Figura 4.107: Layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità geometrica. Questo caso è riferito ad una dimensione d'intaglio pari a 5 mm e una dimensione globale d'elemento di 0.3 mm.

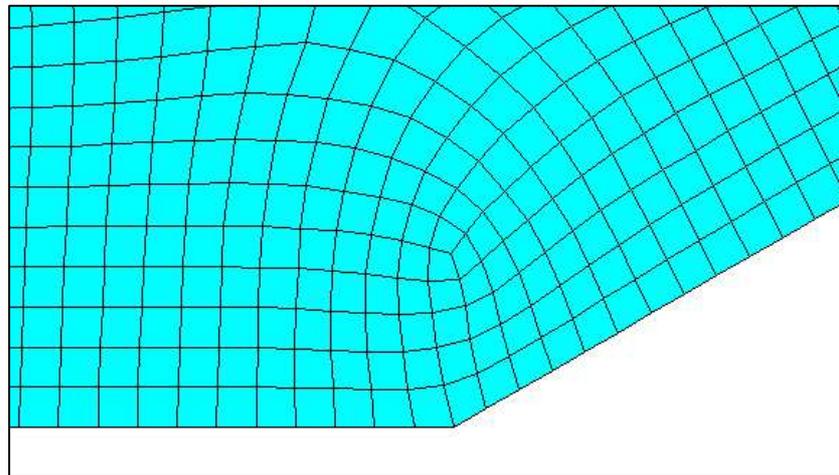


Figura 4.108: Layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità geometrica. Questo caso è riferito ad una dimensione d'intaglio pari a 6 mm e una dimensione globale d'elemento di 0.3 mm.

Come si osserva dalle immagini precedenti la mesh nel primo caso è molto diversa da quanto ci si aspettava, mentre nel secondo si avvicina molto a quanto raffigurato nella figura 1.4 (riferirsi sempre al caso con angolo d'apertura di 30°); coerentemente il primo caso fornisce un K_{FE}^{***} pari a 1.724, che si scosta del 10.7% dal valore suggerito in letteratura, mentre il secondo caso fornisce un 1.890, che presenta invece uno scostamento percentuale pari al 2% circa. Da queste osservazioni si nota come il corretto layout della mesh influenza in modo significativo i risultati.

Anche in questo caso per riportare il metodo al corretto funzionamento è ancora una volta necessario esprimere il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d come riportato nella figura successiva:

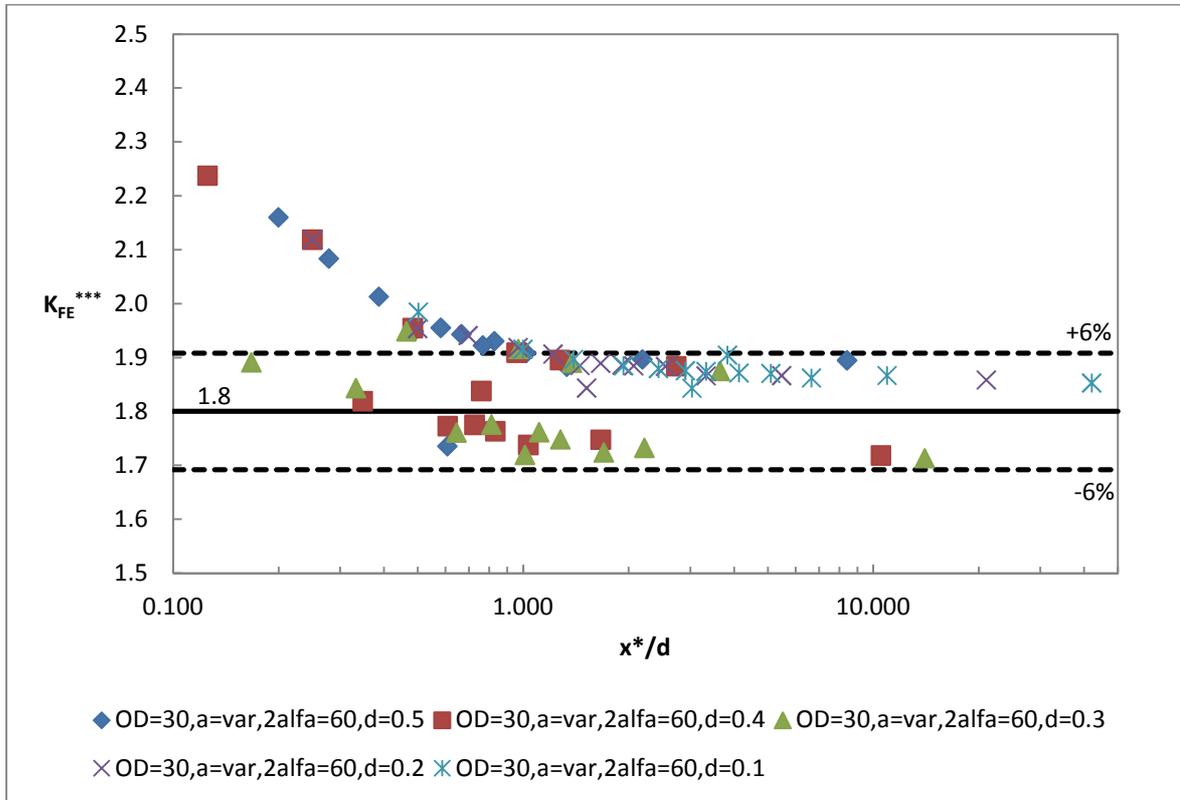


Figura 4.109: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.8; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 6% rispetto al valore calcolato.

Il valore di riferimento adottato in questo caso per i risultati numerici è pari a 1.8.

Si osserva quindi che anche in questo caso la convergenza del metodo è ristabilita grazie a questo nuovo criterio di convergenza in x^*/d ; in questo caso però è stato necessario ampliare notevolmente le bande d'accettabilità fino al limite del 6% del valore di riferimento calcolato a causa dell'elevata differenza tra il layout delle mesh ottenute al variare della dimensione caratteristica dell'intaglio e della dimensione globale d'elemento. Il limite di convergenza assunto in termini di x^*/d è pari a 1.2. Si conferma quindi, previa l'accettazione dei limiti descritti, la convergenza del metodo anche per provini con intaglio con angolo d'apertura pari a 60° .

4.3.4.3.5 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	1.210	2.420	18.658	1.866	1.834
2	4	1.115	2.230	24.96	2.496	1.906
3	6	0.650	1.300	32.738	3.274	1.888
4	8	0.512	1.024	42.082	4.208	1.893
5	10	0.442	0.883	56.836	5.684	1.823
6	12	0.373	0.746	74.724	7.472	1.848
7	14	0.332	0.664	102.26	10.226	1.849
8	16	0.312	0.623	145.45	14.545	1.859
9	18	0.271	0.541	218.62	21.862	1.865
10	20	0.224	0.449	352.37	35.237	1.880
11	22	0.184	0.367	632.28	63.228	1.895
12	24	0.129	0.257	1326.6	132.660	1.948
13	26	0.094	0.187	3770.3	377.030	2.017
14	28	0.046	0.092	20791	2079.100	2.316

Tabella 4.31: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	1.210	3.025	20.867	2.087	1.766
2	5	1.115	2.787	27.134	2.713	1.888
3	7.5	0.650	1.625	35.495	3.550	1.876
4	10	0.512	1.281	47.83	4.783	1.794
5	12.5	0.442	1.104	61.097	6.110	1.827
6	15	0.373	0.933	76.787	7.679	1.937
7	17.5	0.332	0.830	110.77	11.077	1.839
8	20	0.312	0.779	143.48	14.348	2.030
9	22.5	0.271	0.677	236.68	23.668	1.856
10	25	0.224	0.561	389.41	38.941	1.832
11	27.5	0.184	0.459	685.74	68.574	1.883
12	30	0.129	0.321	1483.1	148.310	1.877
13	32.5	0.094	0.234	4147.3	414.730	1.975
14	35	0.046	0.115	24246	2424.600	2.139

Tabella 4.32: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	1.210	4.033	22.864	2.286	1.774
2	6.666666667	1.115	3.716	29.639	2.964	1.903
3	10	0.650	2.167	38.952	3.895	1.882
4	13.33333333	0.512	1.707	52.61	5.261	1.795
5	16.66666667	0.442	1.472	68.271	6.827	1.799
6	20	0.373	1.243	89.988	8.999	1.819
7	23.33333333	0.332	1.106	125.45	12.545	1.787
8	26.66666667	0.312	1.039	176.95	17.695	1.812
9	30	0.271	0.902	263.13	26.313	1.837
10	33.33333333	0.224	0.748	428.48	42.848	1.833
11	36.66666667	0.184	0.612	774.47	77.447	1.835
12	40	0.129	0.428	1627	162.700	1.883
13	43.33333333	0.094	0.312	4776.6	477.660	1.887
14	46.66666667	0.046	0.153	28669	2866.900	1.991

Tabella 4.33: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	1.210	6.050	24.657	2.466	1.883
2	10	1.115	5.574	35.635	3.564	1.812
3	15	0.650	3.250	44.828	4.483	1.872
4	20	0.512	2.561	59.695	5.970	1.811
5	25	0.442	2.208	77.703	7.770	1.810
6	30	0.373	1.865	103.92	10.392	1.803
7	35	0.332	1.660	141.36	14.136	1.816
8	40	0.312	1.558	200.77	20.077	1.828
9	45	0.271	1.354	303.23	30.323	1.825
10	50	0.224	1.122	491.37	49.137	1.829
11	55	0.184	0.918	886.25	88.625	1.835
12	60	0.129	0.643	1892.2	189.220	1.854
13	65	0.094	0.468	5482.5	548.250	1.882
14	70	0.046	0.229	33182	3318.200	1.970

Tabella 4.34: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	1.210	12.100	33.138	3.314	1.765
2	20	1.115	11.148	45.145	4.515	1.802
3	30	0.650	6.500	58.642	5.864	1.803
4	40	0.512	5.122	75.467	7.547	1.805
5	50	0.442	4.415	98.206	9.821	1.804
6	60	0.373	3.730	130.53	13.053	1.809
7	70	0.332	3.319	179.01	17.901	1.806
8	80	0.312	3.117	255.56	25.556	1.809
9	90	0.271	2.707	385	38.500	1.811
10	100	0.224	2.244	625.1	62.510	1.812
11	110	0.184	1.837	1130.4	113.040	1.813
12	120	0.129	1.285	2443.4	244.340	1.809
13	130	0.094	0.937	7083.1	708.310	1.836
14	140	0.046	0.458	43868	4386.800	1.877

Tabella 4.35: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

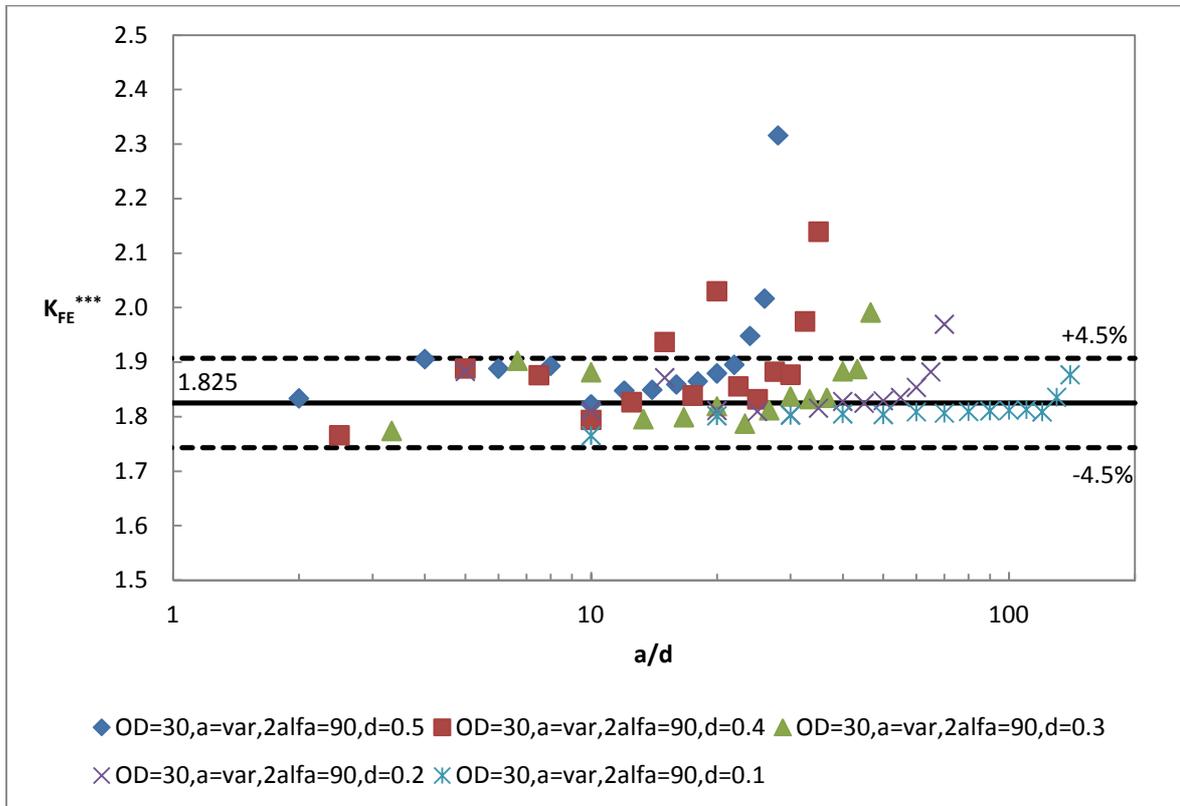


Figura 4.110: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.825; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4.5% rispetto al valore calcolato.

Anche in questo caso si osserva una marcata deviazione dei risultati rispetto alle curve attese; valgono ancora le considerazioni svolte nei casi precedenti. Ancora una volta si osserva che, a causa delle problematiche già descritte, il metodo non converge se utilizzato in termini di a/d ; risulta quindi necessario esprimere i risultati in termini di x^*/d .

Si ottiene quindi:

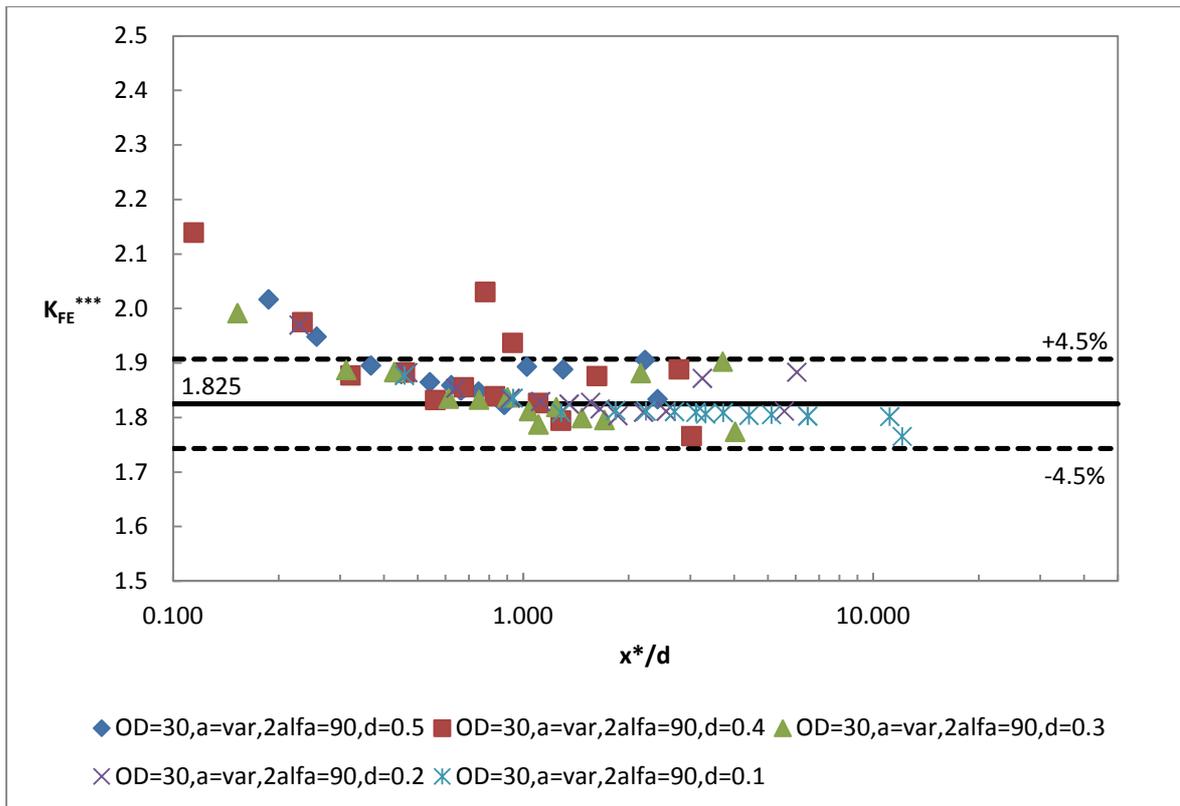


Figura 4.111: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 1.825; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4.5% rispetto al valore calcolato.

Il valore di riferimento adottato per questa geometria è di 1.825.

Anche in questo caso si è ristabilita la convergenza del metodo grazie a questo nuovo criterio; si osserva però che le bande d'accettabilità utilizzate hanno ampiezza pari al 4.5% del valore calcolato. Il limite di convergenza in x^*/d assunto in questo caso è pari a 1.2.

Si conferma quindi anche in questo caso la convergenza del metodo.

4.3.4.3.6 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	1.044	2.088	19.844	1.984	1.849
2	4	0.547	1.094	26.596	2.660	1.827
3	6	0.553	1.106	30.891	3.089	1.974
4	8	0.490	0.979	39.509	3.951	1.978
5	10	0.436	0.873	51.399	5.140	1.981
6	12	0.406	0.813	68.036	6.804	1.997
7	14	0.312	0.623	105.68	10.568	1.811
8	16	0.263	0.525	152.39	15.239	1.814
9	18	0.223	0.446	232.58	23.258	1.818
10	20	0.191	0.381	383.37	38.337	1.820
11	22	0.156	0.311	706.93	70.693	1.823
12	24	0.111	0.221	1544.8	154.480	1.836
13	26	0.105	0.209	3896	389.600	2.164
14	28	0.058	0.116	22598	2259.800	2.487

Tabella 4.36: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	1.044	2.611	21.162	2.116	1.833
2	5	0.547	1.368	28.124	2.812	1.827
3	7.5	0.553	1.382	32.783	3.278	1.967
4	10	0.490	1.224	41.816	4.182	1.976
5	12.5	0.436	1.091	54.59	5.459	1.972
6	15	0.406	1.016	72.735	7.274	1.975
7	17.5	0.312	0.779	111.61	11.161	1.813
8	20	0.263	0.656	160.54	16.054	1.820
9	22.5	0.223	0.557	245.84	24.584	1.818
10	25	0.191	0.477	406.13	40.613	1.816
11	27.5	0.156	0.389	747.75	74.775	1.822
12	30	0.111	0.277	1645.2	164.520	1.823
13	32.5	0.105	0.261	4213.8	421.380	2.116
14	35	0.058	0.145	26359	2635.900	2.254

Tabella 4.37: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	1.044	3.481	22.925	2.293	1.818
2	6.666666667	0.547	1.824	30.417	3.042	1.815
3	10	0.553	1.843	35.101	3.510	1.974
4	13.33333333	0.490	1.632	45.37	4.537	1.957
5	16.66666667	0.436	1.455	59.214	5.921	1.954
6	20	0.406	1.355	78.688	7.869	1.962
7	23.33333333	0.312	1.039	119	11.900	1.828
8	26.66666667	0.263	0.875	172.75	17.275	1.818
9	30	0.223	0.743	263.86	26.386	1.820
10	33.33333333	0.191	0.636	435	43.500	1.822
11	36.66666667	0.156	0.518	804.24	80.424	1.820
12	40	0.111	0.369	1768.2	176.820	1.823
13	43.33333333	0.105	0.349	4693.5	469.350	2.041
14	46.66666667	0.058	0.194	25299	2529.900	2.524

Tabella 4.38: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	1.044	5.221	25.231	2.523	1.828
2	10	0.547	2.736	33.774	3.377	1.809
3	15	0.553	2.764	38.996	3.900	1.966
4	20	0.490	2.448	49.929	4.993	1.968
5	25	0.436	2.182	65.498	6.550	1.955
6	30	0.406	2.032	86.887	8.689	1.966
7	35	0.312	1.558	132.27	13.227	1.820
8	40	0.263	1.313	190.91	19.091	1.821
9	45	0.223	1.114	291.66	29.166	1.823
10	50	0.191	0.953	481.42	48.142	1.822
11	55	0.156	0.778	889.11	88.911	1.822
12	60	0.111	0.554	1961.2	196.120	1.819
13	65	0.105	0.523	5239.8	523.980	2.023
14	70	0.058	0.291	33667	3366.700	2.099

Tabella 4.39: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	1.044	10.442	30.244	3.024	1.814
2	20	0.547	5.471	39.733	3.973	1.829
3	30	0.553	5.528	46.553	4.655	1.959
4	40	0.490	4.896	60.045	6.005	1.946
5	50	0.436	4.364	77.698	7.770	1.960
6	60	0.406	4.064	104.6	10.460	1.942
7	70	0.312	3.116	157.02	15.702	1.823
8	80	0.263	2.625	227.63	22.763	1.816
9	90	0.223	2.229	346.34	34.634	1.825
10	100	0.191	1.907	571.81	57.181	1.824
11	110	0.156	1.555	1056.2	105.620	1.824
12	120	0.111	1.107	2339.2	233.920	1.813
13	130	0.105	1.046	6384.3	638.430	1.975
14	140	0.058	0.581	41899	4189.900	2.005

Tabella 4.40: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

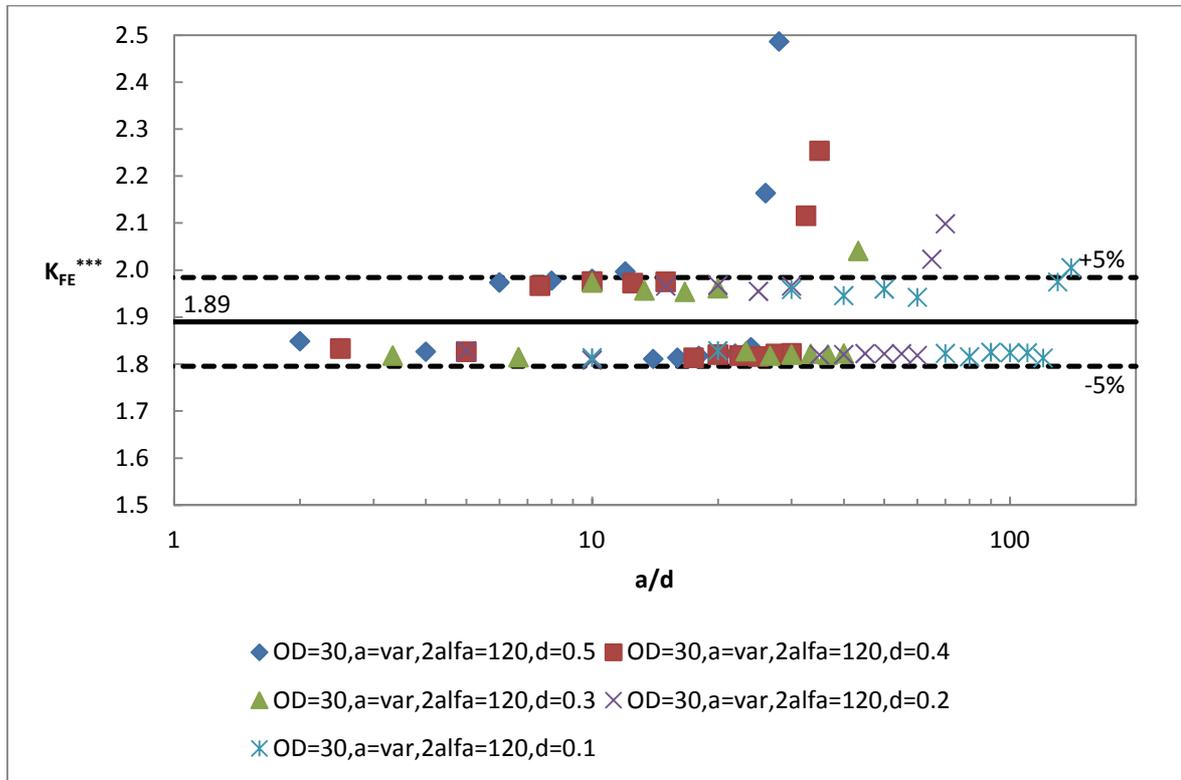


Figura 4.112: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.89; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato.

Anche in questo caso si osserva una marcata deviazione dei risultati rispetto alle curve attese; valgono ancora le considerazioni svolte nei casi precedenti. Risulta ancora una volta necessario esprimere i risultati in termini di x^*/d come già osservato.

Si ottiene quindi:

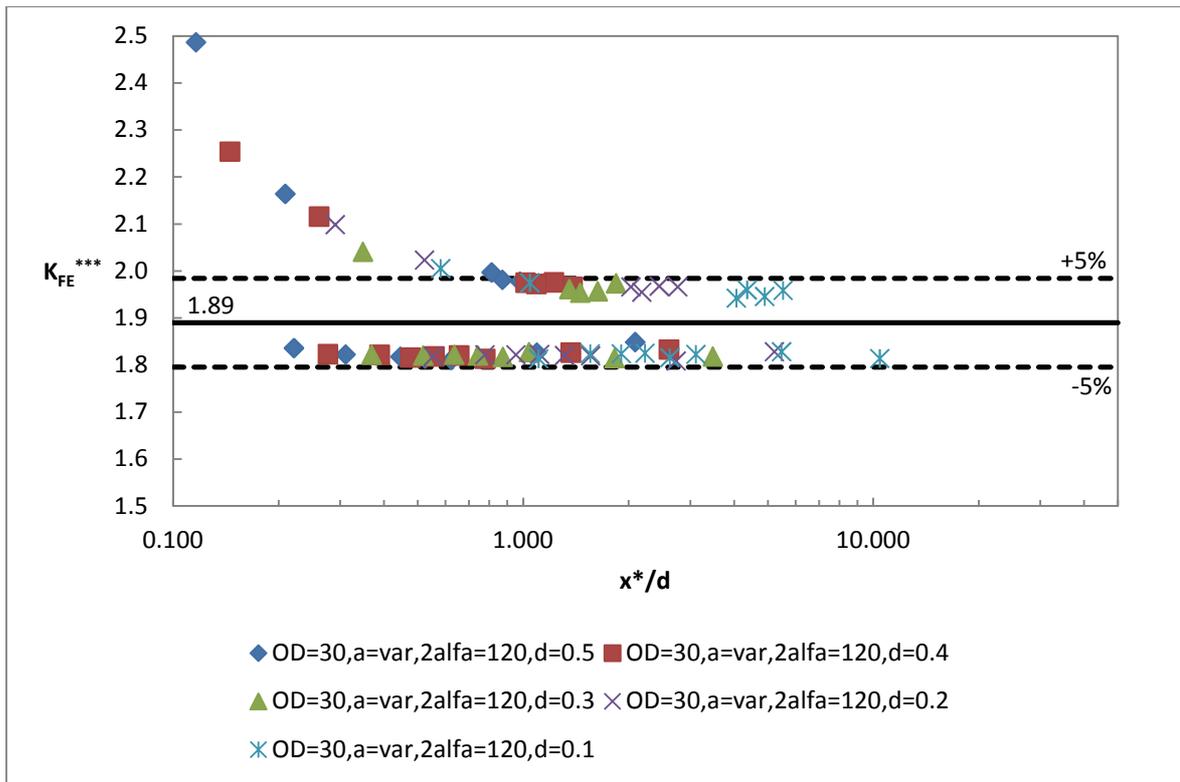


Figura 4.113: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.89; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato.

Il valore di riferimento adottato per questa geometria è di 1.89.

Anche in questo caso si è ristabilita la convergenza del metodo grazie a questo nuovo criterio; si osserva però che le bande d'accettabilità hanno ampiezza pari al 5% del valore calcolato e che in questo caso il limite minimo in termine di x^*/d è pari a 1 circa. Si osserva inoltre che la maggior parte delle geometrie convergono a due precisi valori del K_{FE}^{***} ; questo aspetto, come già descritto, è legato all'ottenimento di due diversi layout di mesh.

Di seguito si riportano due esempi delle due tipologie di mesh che portano a questi due diversi valori di convergenza:

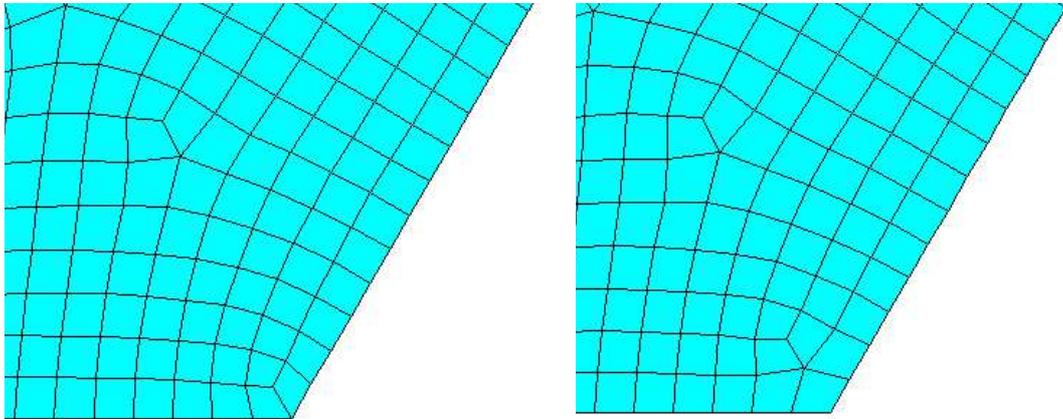


Figura 4.114: Layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità geometrica. A sinistra è raffigurato il caso di dimensione caratteristica dell'incisione pari a 6 mm e global element size pari a 0.3 mm, mentre a destra è rappresentato il layout nel caso di dimensione d'incisione 7 mm e global element size 0.3 mm.

Si osserva perciò che i due diversi valori di convergenza visibili in figura 4.113 sono dovuti a questi due layout di mesh; a causa delle medie nodali eseguite da Ansys® la configurazione con due elementi posizionati all'apice dell'incisione (rispettivamente quattro considerando il provino intero) fornisce un K_{FE}^{***} pari a 1.962 mentre in quella con un solo elemento (rispettivamente due) si ottiene un 1.828. Già da ora si osserva quindi che se si riuscisse a forzare il meshatore automatico di Ansys® ad eseguire un layout di mesh che non varia al variare delle configurazioni geometriche sarebbe ipoteticamente possibile riunire tutti i valori in un unico livello di riferimento fissato l'angolo d'apertura.

Si conferma anche in questo caso la convergenza del metodo.

4.3.4.3.7 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	0.683	1.367	19.037	1.904	1.931
2	4	0.536	1.072	24.225	2.423	1.961
3	6	0.487	0.974	30.57	3.057	1.970
4	8	0.449	0.897	39.037	3.904	1.975
5	10	0.399	0.799	51.234	5.123	1.967
6	12	0.371	0.742	68.727	6.873	1.970
7	14	0.317	0.634	95.399	9.540	1.973
8	16	0.278	0.557	138.57	13.857	1.975
9	18	0.242	0.485	213.85	21.385	1.969
10	20	0.203	0.405	355.48	35.548	1.974
11	22	0.166	0.331	662.49	66.249	1.977
12	24	0.120	0.240	1477.1	147.710	1.986
13	26	0.081	0.163	4580.4	458.040	1.991
14	28	0.045	0.089	31043	3104.300	2.040

Tabella 4.41: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	0.683	1.709	19.682	1.968	1.953
2	5	0.536	1.340	25.411	2.541	1.955
3	7.5	0.487	1.217	31.951	3.195	1.971
4	10	0.449	1.121	41.044	4.104	1.964
5	12.5	0.399	0.998	53.411	5.341	1.973
6	15	0.371	0.927	71.933	7.193	1.969
7	17.5	0.317	0.792	99.72	9.972	1.974
8	20	0.278	0.696	146.07	14.607	1.959
9	22.5	0.242	0.606	222.99	22.299	1.974
10	25	0.203	0.507	372.39	37.239	1.970
11	27.5	0.166	0.414	693.17	69.317	1.976
12	30	0.120	0.300	1552.9	155.290	1.975
13	32.5	0.081	0.204	4802.4	480.240	1.986
14	35	0.045	0.112	33410	3341.000	1.982

Tabella 4.42: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	0.683	2.278	20.717	2.072	1.965
2	6.666666667	0.536	1.786	26.792	2.679	1.964
3	10	0.487	1.623	33.909	3.391	1.967
4	13.33333333	0.449	1.495	43.253	4.325	1.974
5	16.66666667	0.399	1.331	56.898	5.690	1.961
6	20	0.371	1.236	76.035	7.604	1.973
7	23.33333333	0.317	1.056	105.59	10.559	1.974
8	26.66666667	0.278	0.928	153.64	15.364	1.972
9	30	0.242	0.808	236.43	23.643	1.972
10	33.33333333	0.203	0.675	394.33	39.433	1.971
11	36.66666667	0.166	0.552	737.67	73.767	1.967
12	40	0.120	0.400	1643.9	164.390	1.977
13	43.33333333	0.081	0.272	5127	512.700	1.971
14	46.66666667	0.045	0.149	35491	3549.100	1.976

Tabella 4.43: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	0.683	3.417	22.599	2.260	1.954
2	10	0.536	2.680	29.021	2.902	1.966
3	15	0.487	2.435	36.701	3.670	1.971
4	20	0.449	2.243	46.967	4.697	1.971
5	25	0.399	1.996	61.352	6.135	1.973
6	30	0.371	1.854	82.396	8.240	1.974
7	35	0.317	1.585	114.56	11.456	1.973
8	40	0.278	1.392	166.47	16.647	1.974
9	45	0.242	1.211	256.26	25.626	1.973
10	50	0.203	1.013	426.92	42.692	1.974
11	55	0.166	0.828	797.16	79.716	1.974
12	60	0.120	0.600	1783.4	178.340	1.976
13	65	0.081	0.407	5540	554.000	1.978
14	70	0.045	0.223	38408	3840.800	1.981

Tabella 4.44: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	0.683	6.835	25.793	2.579	1.967
2	20	0.536	5.359	33.247	3.325	1.972
3	30	0.487	4.869	42.081	4.208	1.974
4	40	0.449	4.486	53.854	5.385	1.975
5	50	0.399	3.993	70.374	7.037	1.976
6	60	0.371	3.709	94.527	9.453	1.977
7	70	0.317	3.169	131.45	13.145	1.976
8	80	0.278	2.784	191.19	19.119	1.975
9	90	0.242	2.423	294.34	29.434	1.974
10	100	0.203	2.026	490.37	49.037	1.974
11	110	0.166	1.656	915.87	91.587	1.973
12	120	0.120	1.200	2049.4	204.940	1.975
13	130	0.081	0.815	6378	637.800	1.973
14	140	0.045	0.447	44424	4442.400	1.967

Tabella 4.45: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

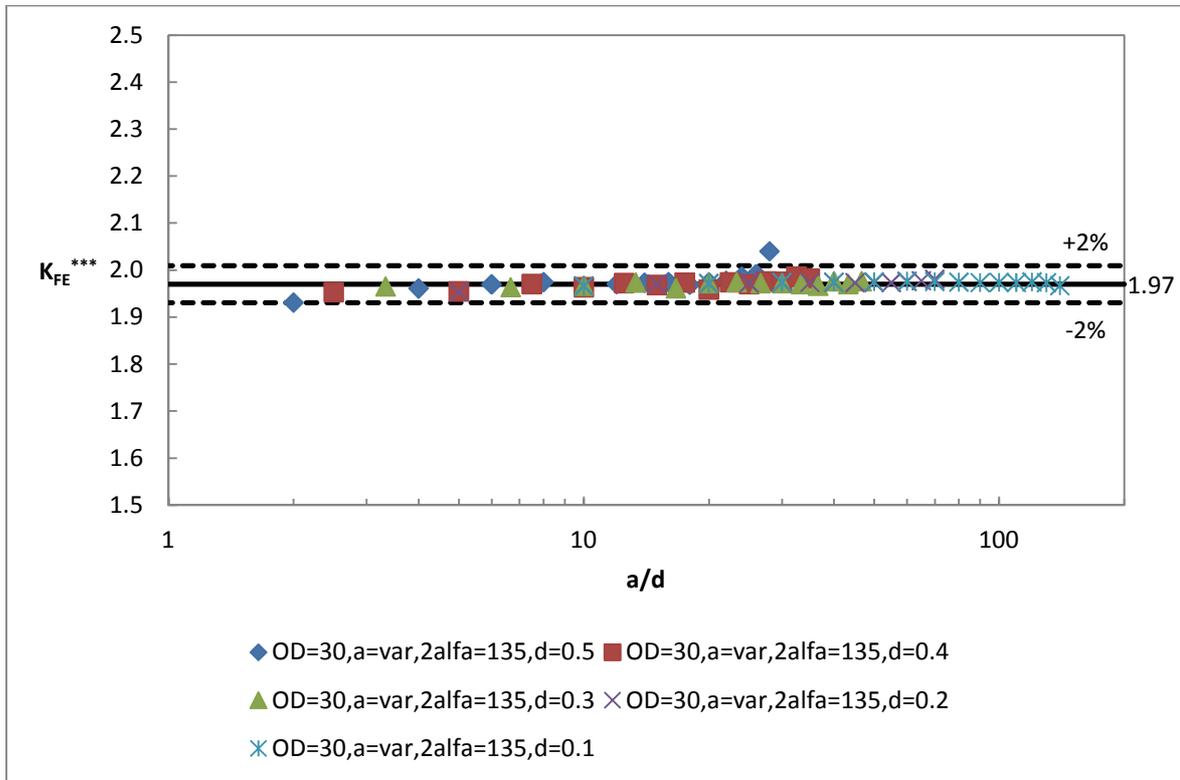


Figura 4.115: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.97; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

In quest'ultimo caso trattato si osserva che la dispersione dei risultati risulta praticamente nulla; quasi tutti i valori ricavati si assestano attorno al livello 1.97. Si osserva ancora però la tendenza, molto meno marcata per quest'angolo d'apertura, a far uscire dalla banda d'accettabilità i risultati relativi a intagli di dimensioni elevate, cioè che presentano un a/d elevato; si sottolinea nuovamente però che in questo caso questa tendenza è molto attenuata e che, per i valori ricavati con le global element size utilizzate nel presente lavoro, per far rientrare in banda tutti i risultati sarebbe sufficiente aumentare leggermente la larghezza della banda d'accettabilità che ora è stata fissata al $\pm 2\%$ del valore di riferimento.

Per dimostrare ancora una volta la validità del secondo approccio di convergenza, cioè quello in x^*/d , si riassumono i risultati in un secondo grafico in funzione proprio di questo

parametro senza mutare l'ampiezza della banda d'accettabilità pari al $\pm 2\%$. Si ottiene quindi:

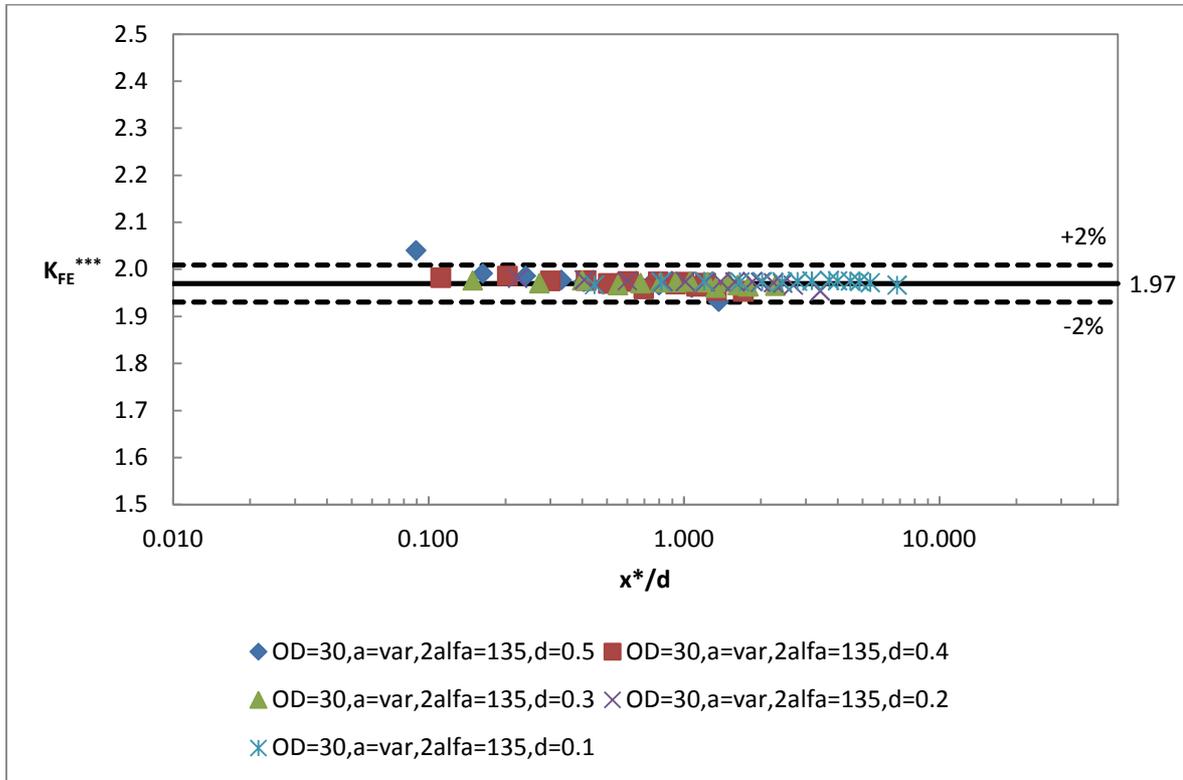


Figura 4.116: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.97; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Si osserva quindi che, pur mantenendo le stesse bande d'accettabilità utilizzate nel caso di a/d , tutti i punti risultano a convergenza poiché l'unico risultato che usciva dalle bande in precedenza viene spostato a sinistra per i motivi più volte illustrati.

Il valore di riferimento adottato è pari a 1.97 e l'ampiezza delle bande di dispersione è uguale al 2% di quest'ultimo; il limite di convergenza assunto in termini di x^*/d è pari a 0.2.

Anche in questo caso di angolo d'apertura pari a 135° il metodo risulta quindi valido; questo caso è particolarmente importante perché rispecchia l'angolo d'apertura utilizzato quando si modella una saldatura.

4.3.4.3.8 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	0.625	1.249	16.991	1.699	2.121
2	4	0.558	1.116	21.478	2.148	2.119
3	6	0.514	1.027	27.099	2.710	2.119
4	8	0.472	0.945	34.636	3.464	2.127
5	10	0.431	0.861	45.518	4.552	2.126
6	12	0.389	0.778	61.546	6.155	2.125
7	14	0.327	0.654	86.353	8.635	2.119
8	16	0.310	0.621	126.05	12.605	2.123
9	18	0.261	0.522	195.93	19.593	2.123
10	20	0.219	0.438	330.53	33.053	2.118
11	22	0.175	0.350	624.06	62.406	2.123
12	24	0.138	0.277	1416.5	141.650	2.122
13	26	0.089	0.177	4503.1	450.310	2.129
14	28	0.047	0.095	31657	3165.700	2.189

Tabella 4.46: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	0.625	1.561	17.54	1.754	2.121
2	5	0.558	1.395	22.18	2.218	2.119
3	7.5	0.514	1.284	27.856	2.786	2.128
4	10	0.472	1.181	35.803	3.580	2.125
5	12.5	0.431	1.076	47.019	4.702	2.124
6	15	0.389	0.972	63.462	6.346	2.127
7	17.5	0.327	0.818	88.888	8.889	2.125
8	20	0.310	0.776	130.35	13.035	2.120
9	22.5	0.261	0.653	202.13	20.213	2.124
10	25	0.219	0.548	341.29	34.129	2.118
11	27.5	0.175	0.437	645.4	64.540	2.120
12	30	0.138	0.346	1465.7	146.570	2.118
13	32.5	0.089	0.222	4654	465.400	2.127
14	35	0.047	0.118	33475	3347.500	2.137

Tabella 4.47: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	0.625	2.082	18.223	1.822	2.127
2	6.666666667	0.558	1.859	23.03	2.303	2.126
3	10	0.514	1.712	29.05	2.905	2.127
4	13.33333333	0.472	1.574	37.285	3.729	2.126
5	16.66666667	0.431	1.435	49.047	4.905	2.122
6	20	0.389	1.297	66.149	6.615	2.126
7	23.33333333	0.327	1.090	92.649	9.265	2.125
8	26.66666667	0.310	1.035	135.72	13.572	2.121
9	30	0.261	0.871	210.59	21.059	2.124
10	33.33333333	0.219	0.730	354.78	35.478	2.123
11	36.66666667	0.175	0.583	672.74	67.274	2.119
12	40	0.138	0.461	1526.6	152.660	2.118
13	43.33333333	0.089	0.296	4863.2	486.320	2.121
14	46.66666667	0.047	0.158	35342	3534.200	2.109

Tabella 4.48: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	0.625	3.123	19.364	1.936	2.121
2	10	0.558	2.789	24.392	2.439	2.127
3	15	0.514	2.568	30.749	3.075	2.129
4	20	0.472	2.362	39.489	3.949	2.127
5	25	0.431	2.153	51.82	5.182	2.128
6	30	0.389	1.945	70.021	7.002	2.129
7	35	0.327	1.635	98.102	9.810	2.126
8	40	0.310	1.552	143.57	14.357	2.125
9	45	0.261	1.306	223.08	22.308	2.125
10	50	0.219	1.095	375.85	37.585	2.123
11	55	0.175	0.875	710.99	71.099	2.124
12	60	0.138	0.692	1616.8	161.680	2.120
13	65	0.089	0.443	5150.8	515.080	2.122
14	70	0.047	0.236	37219	3721.900	2.122

Tabella 4.49: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	0.625	6.245	21.329	2.133	2.126
2	20	0.558	5.578	26.932	2.693	2.127
3	30	0.514	5.135	33.945	3.395	2.129
4	40	0.472	4.723	43.593	4.359	2.127
5	50	0.431	4.305	57.268	5.727	2.126
6	60	0.389	3.890	77.339	7.734	2.128
7	70	0.327	3.270	108.23	10.823	2.128
8	80	0.310	3.104	158.67	15.867	2.123
9	90	0.261	2.612	246.42	24.642	2.124
10	100	0.219	2.191	414.6	41.460	2.125
11	110	0.175	1.749	784.53	78.453	2.126
12	120	0.138	1.384	1785.2	178.520	2.119
13	130	0.089	0.887	5692.3	569.230	2.120
14	140	0.047	0.473	41205	4120.500	2.116

Tabella 4.50: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

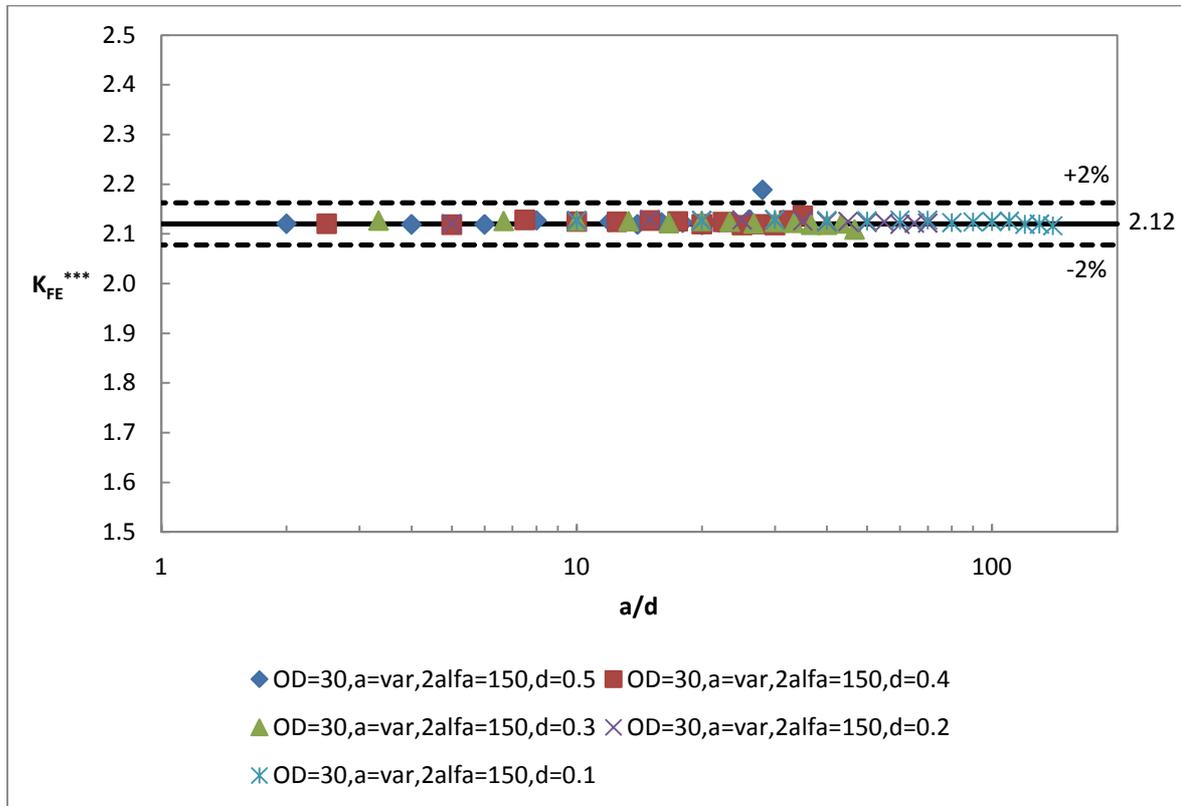


Figura 4.117: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento 2.12; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Dapprima si osserva che la dispersione dei risultati attorno al valore di riferimento è esigua; è però necessario notare che quest'ultimo assume valori sensibilmente differenti rispetto a quelli ricavati per i casi precedenti. Il valore di riferimento adottato, pari a 2.12, risulta infatti maggiore rispetto a quelli ricavati per tutte le altre geometrie analizzate finora. Anche in questo caso, assunta un'ampiezza della banda di dispersione pari al 2%, si nota che la tendenza delle curve espresse in a/d è quella di uscire dalla stessa per valori elevati di quest'ultimo parametro; per risolvere questa problematica si è nuovamente passati a descrivere le curve in termini di x^*/d mantenendo inalterata l'ampiezza delle bande di dispersione.

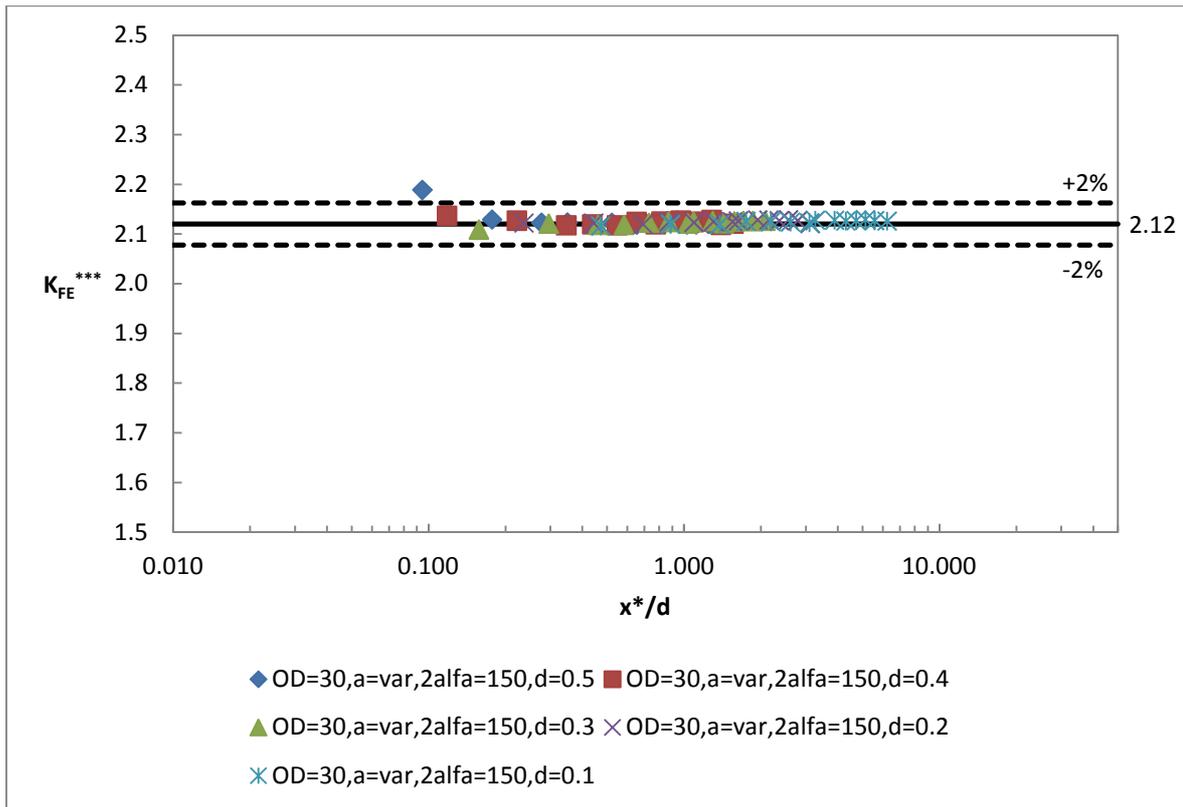


Figura 4.118: Andamento del K_{FE}^{*} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 2.12; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.**

Si osserva quindi che, pur mantenendo le stesse bande d'accettabilità utilizzate nel caso di a/d , tutti i punti risultano a convergenza poiché l'unico punto che usciva dalle bande in precedenza viene spostato a sinistra per i motivi già illustrati in precedenza.

Il valore di riferimento ricavato in questo caso è quindi pari a 2.12 e con bande di dispersione di ampiezza pari al 2% di quest'ultimo si ricava un limite di convergenza in x^*/d pari a 0.2.

4.3.4.4 - Riassunto dei risultati ottenuti

Come ultimo passo di questo paragrafo, nel quale si ricorda si applica il metodo del PSM eseguendo una mesh di tipo free senza alcun tipo di controllo sul layout della stessa nell'intorno del punto di singolarità, si vuole riassumere tutti i risultati raccolti finora con lo scopo di fornire una linea guida che consenta di applicare il metodo per ogni angolo d'apertura anche in questo caso di sollecitazione di modo III.

Si riportano quindi tutti i dati in un unico grafico dove si rappresentano con lo stesso simbolo e lo stesso colore i risultati relativi ad un singolo angolo d'apertura dell'intaglio. Si riporta dapprima il grafico suddetto in termini di a/d .

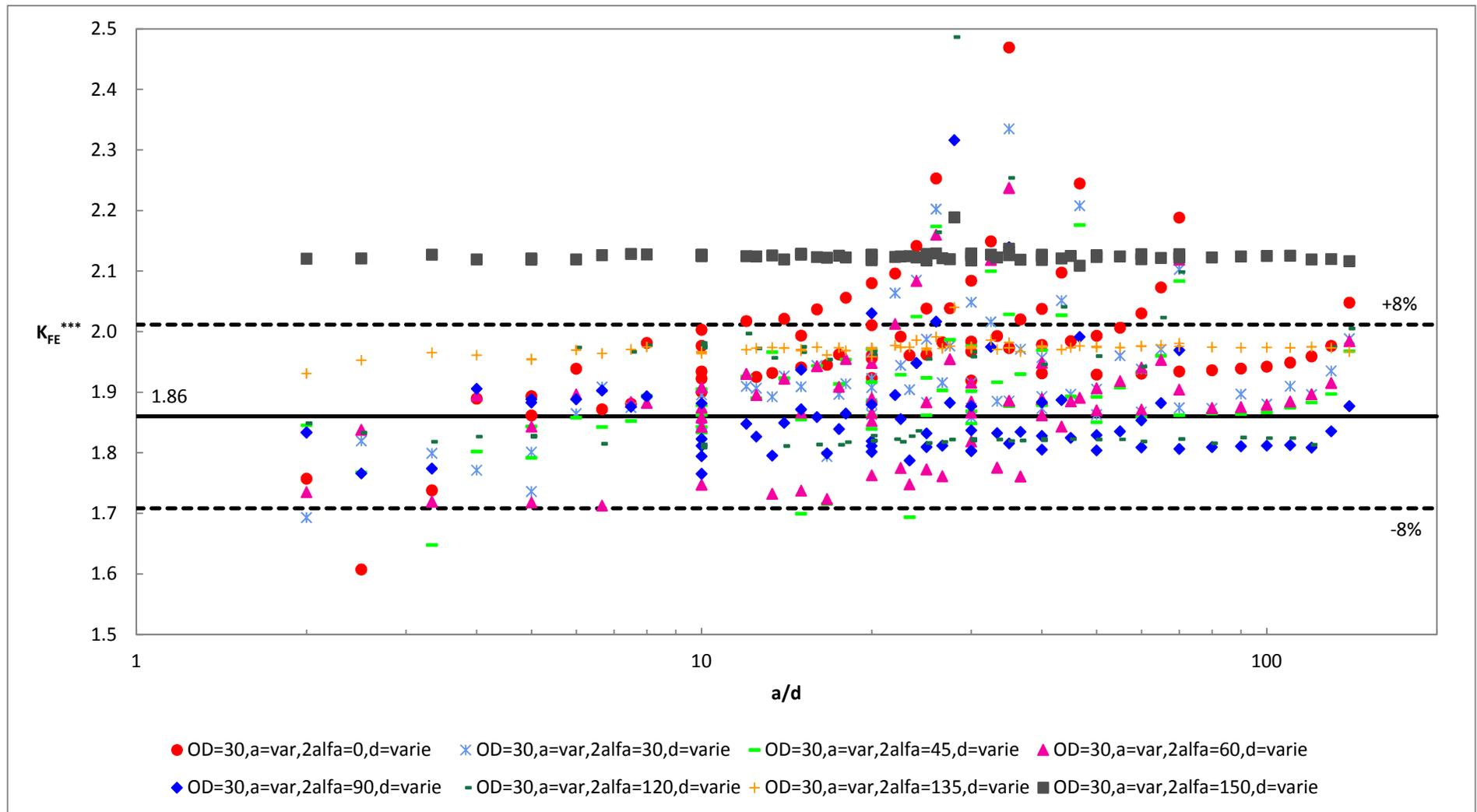


Figura 4.119: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.86; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 8% rispetto al valore calcolato.

Per i motivi già descritti durante la trattazione esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione del parametro a/d si ottengono delle curve che tendono ad uscire dalla banda di convergenza a causa della già menzionata interazione tra i campi di tensione locali. Come già osservato durante l'analisi dei singoli angoli d'apertura dell'intaglio per riportare il metodo a convergenza è utile esprimere il suddetto parametro adimensionale K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , dove si ricorda che con il simbolo x^* s'intende l'estensione del campo locale di tensione calcolata numericamente.

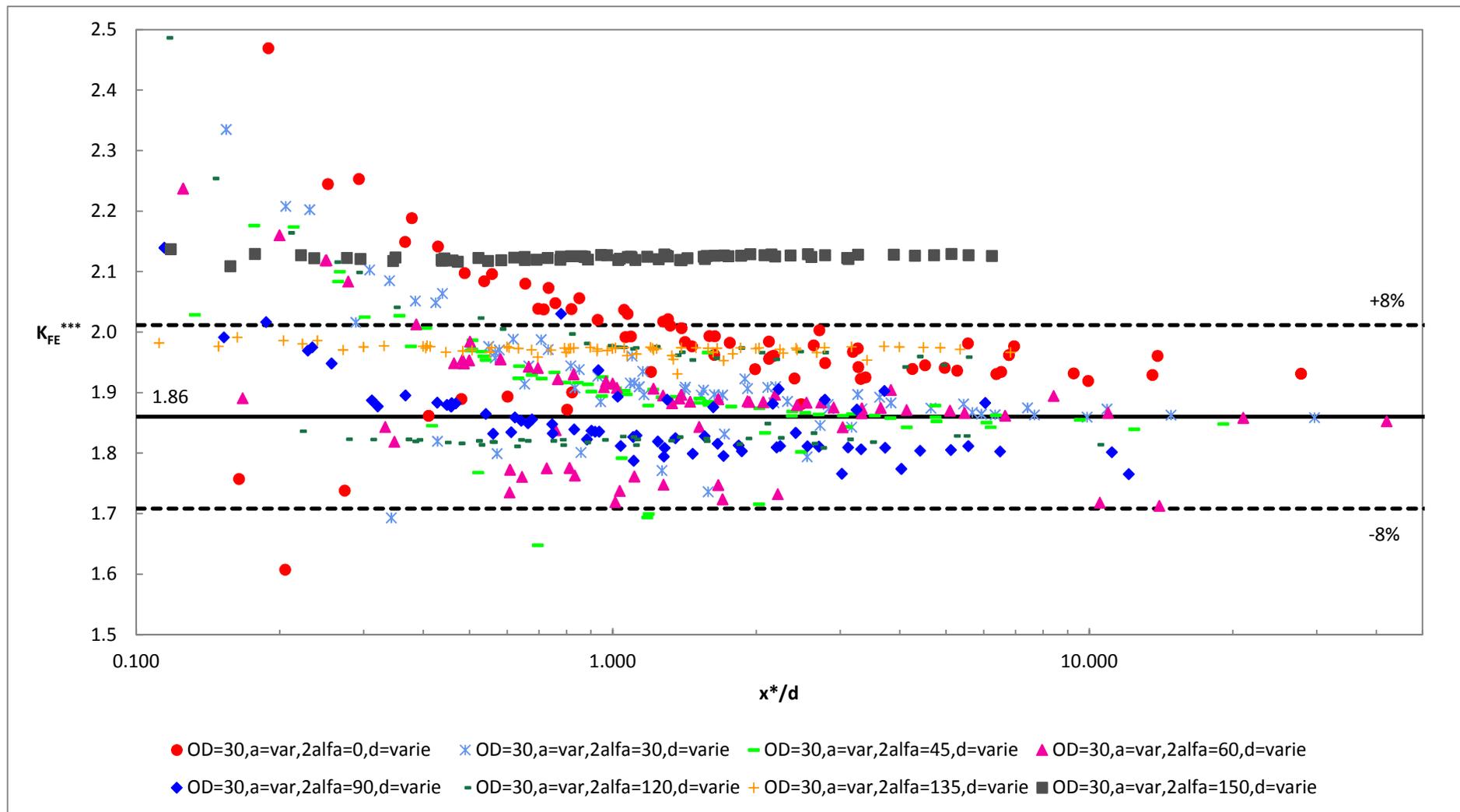


Figura 4.120: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.86; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 8% rispetto al valore calcolato.

Come si osserva dal diagramma precedente, e come si è notato anche dai diagrammi ricavati nel caso delle analisi dei singoli angoli d'apertura, si ha che la nuova definizione per l'espressione di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d permette di far convergere in banda tutti i valori che con la precedente definizione, quella in a/d , uscivano dalla stessa nonostante si trovassero nominalmente a convergenza.

Si osserva però che una serie di punti, quella relativa all'angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150° , non entra mai in banda e si assesta sempre sullo stesso valore, sensibilmente più elevato rispetto a quello di riferimento ricavato da quest'analisi; si deduce quindi che, per questa procedura di applicazione del PSM che non prevede alcun metodo di controllo del layout della mesh nei dintorni del punto di singolarità geometrica, il metodo stesso non è applicabile con successo per l'angolo d'apertura 150° . Certamente, osservando che i risultati calcolati per quest'ultimo caso tendono tutti al valore di K_{FE}^{***} pari a 2.12, si potrebbe pensare di applicare una variante del metodo PSM standard per la quale si utilizza una costante differente quando si analizzano intagli con angolo d'apertura pari a 150° .

Per tutti gli angoli d'apertura inferiori al limite suddetto invece si è confermata la validità del metodo PSM applicato utilizzando solamente una mesh free senza controllo del layout della stessa; si osservi però che, rispetto ai valori riportati in letteratura nel caso di modo III (in [4]), è stato necessario dapprima allargare la banda di dispersione dei risultati, dal 3% della letteratura all'8% del presente elaborato, e successivamente abbassare il valore medio di convergenza portando l'1.93 della letteratura ad un 1.86 (si noti però che in letteratura sono stati analizzati solo gli angoli d'apertura pari a 0° e 135°).

I limiti di convergenza del metodo, espressi in funzione del rapporto tra l'estensione del campo locale di tensione e la global element size della mesh, sono pari a:

$$\frac{x^*}{d} \geq 2 \quad (4.7)$$

Ciò significa che, a prescindere dalle dimensioni geometriche e utilizzando il valore di riferimento e le bande di dispersione proposte, è sempre necessario posizionare almeno due elementi nella zona d'estensione del campo locale di tensione per ottenere delle informazioni corrette da parte del PSM.

Si osserva inoltre che, limitata l'analisi agli angoli d'apertura più comunemente adottati nell'ambito meccanico, che corrispondono agli 0° d'apertura, caso della cricca, e ai 135° , caso dei cordoni di saldatura, si ha in termini di a/d :

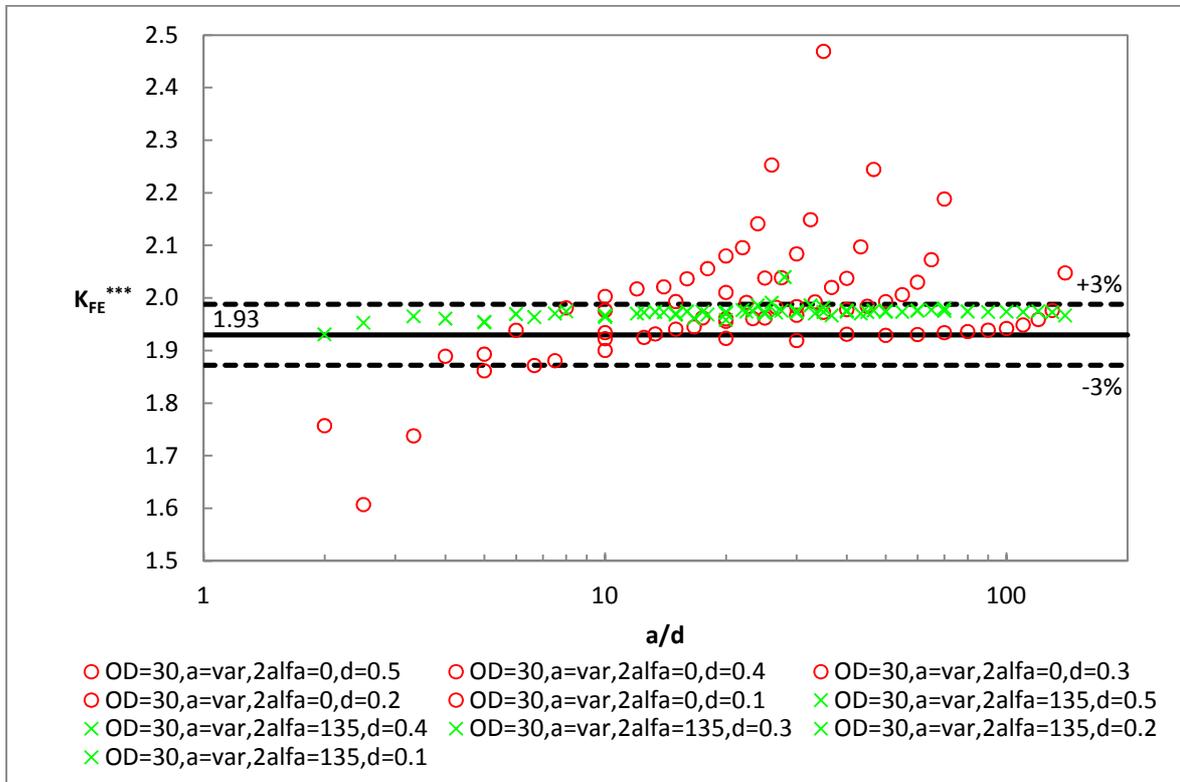


Figura 4.121: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] e preso in riferimento in questo caso è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato. In questo caso sono riportati solo gli angoli d'apertura di 0° e 135° .

Anche limitando le analisi a questi due angoli d'apertura dell'intaglio, si osserva che la precedente definizione del K_{FE}^{***} mostra tutti i limiti annunciati; in questo caso, analizzando i componenti a parità di dimensione media d'elemento e al variare della dimensione dell'intaglio, si hanno ancora una volta delle curve che escono dalla banda d'accettabilità a causa dei motivi già descritti. Questo comportamento è ben visibile nel caso di provino criccato; nel caso d'analisi di una saldatura questo effetto si nota meno ma è comunque presente come conferma l'unica crocetta verde che si vede chiaramente uscire dalla banda d'accettabilità. Ancora una volta diagrammando i medesimi risultati in funzione del parametro x^*/d si ottiene:

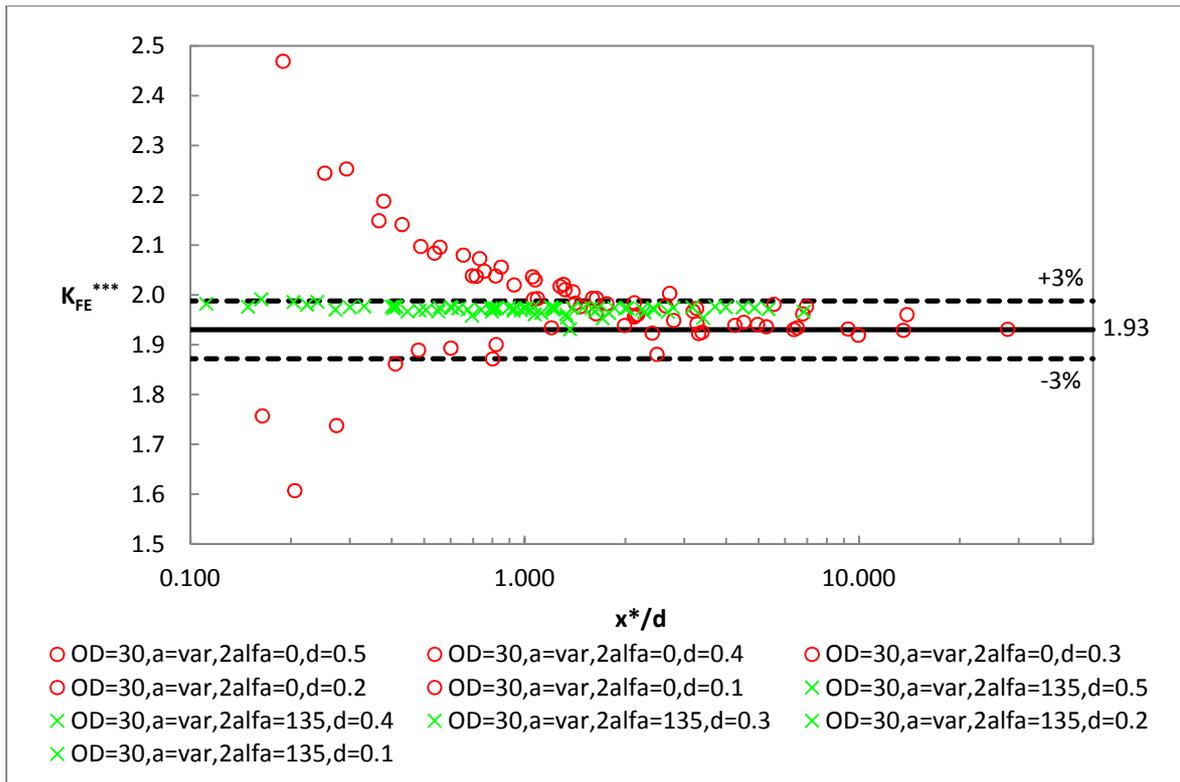


Figura 4.122: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] e preso in riferimento in questo caso è pari a 1.93; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato. In questo caso sono riportati solo gli angoli d'apertura di 0° e 135°

In questo caso si osserva che l'ultimo valore che esce dalla banda d'accettabilità è posizionato per un $x^*/d = 2.7$; si assume quindi un limite di convergenza del metodo pari a:

$$\frac{x^*}{d} \geq 3 \quad (4.8)$$

Il valore medio calcolato è pari a 1.93; grazie a questi risultati è possibile confermare le linee guida riportate in letteratura [4] riferite infatti a provini criccato e giunti saldati.

4.3.5 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e utilizzo dell'algorithm di meshatura free internamente alla stessa

Nel precedente paragrafo, dove si è applicato il metodo del PSM senza alcun metodo di controllo della mesh nell'intorno del punto di singolarità geometrica, si è ricavato un valore di riferimento del K_{FE}^{***} pari a 1.86 con delle bande d'accettabilità dell'8% dello stesso; tali bande comportano una dispersione maggiore di quella aspettata inizialmente. Per cercare di ridurre la loro ampiezza si è quindi cercato un metodo per controllare la mesh nell'intorno del punto di singolarità geometrica; evitando per il momento l'utilizzo di mesh mapped, sono state testate alcune idee per cercare di ottenere il controllo desiderato.

Come primo metodo si è pensato di dividere la geometria con una linea che corrisponde alla bisettrice del semiangolo in modo tale da ottenere una guida per la stesura dei nodi degli elementi; il problema di questo approccio consiste nel fatto che in questo modo si trovano sempre due elementi che condividono il punto di singolarità e, come si osserva dalla figura 1.4, per alcuni angoli d'apertura ciò non è accettabile.

Per evitare queste problematiche si è quindi passati all'utilizzo di un'areola di piccole dimensioni centrata all'apice dell'intaglio; il procedimento di meshatura del provino consiste nel creare la mesh di questa areola per prima e poi generare quella relativa all'area esterna. In questo modo il meshatore adatta il layout della mesh in funzione dell'angolo d'apertura e si riesce a controllare la configurazione della stessa nell'intorno del punto di singolarità.

In termini d'applicazione del metodo in ambito industriale l'ipotesi della creazione di un'areola nell'intorno dell'apice dell'intaglio risulta comunque accettabile; si può infatti pensare di eseguire una prima analisi sul modello completo con una mesh grossolana ed utilizzare i risultati ottenuti per effettuare una seconda analisi con un sottomodello che comprende solo le zone adiacenti all'apice dell'intaglio. Il sottomodello dovrà avere delle dimensioni in termini di numero d'elementi per lato che verranno determinate nel proseguo del lavoro. Risulta quindi definita la corrispondenza tra l'areola centrata all'apice dell'intaglio e il sottomodello utilizzato in applicazioni reali.

La geometria dell'areola in questione è stata ricavata confrontando diverse configurazioni tra di loro ed è quella che permette di ottenere migliori risultati rispetto alle altre; per ottenere il corretto layout della mesh al variare dell'angolo d'apertura dell'intaglio è stato

necessario variare la configurazione dell'areola in funzione di quest'ultimo. Di seguito si riportano delle immagini dove sono rappresentati i layout delle areole e quotate le dimensioni delle stesse.

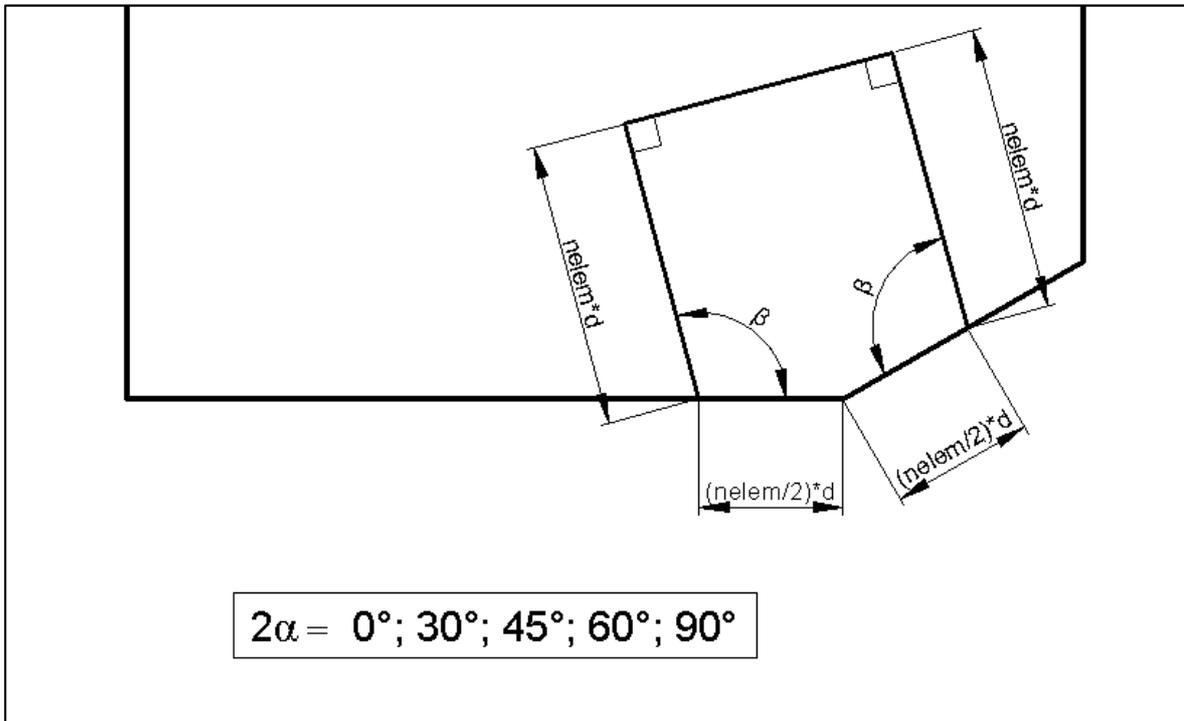


Figura 4.123: Configurazione dell'areola di controllo della mesh utilizzata nei casi dei seguenti angoli d'apertura dell'intaglio: 0°, 30°, 45°, 60°, 90°.

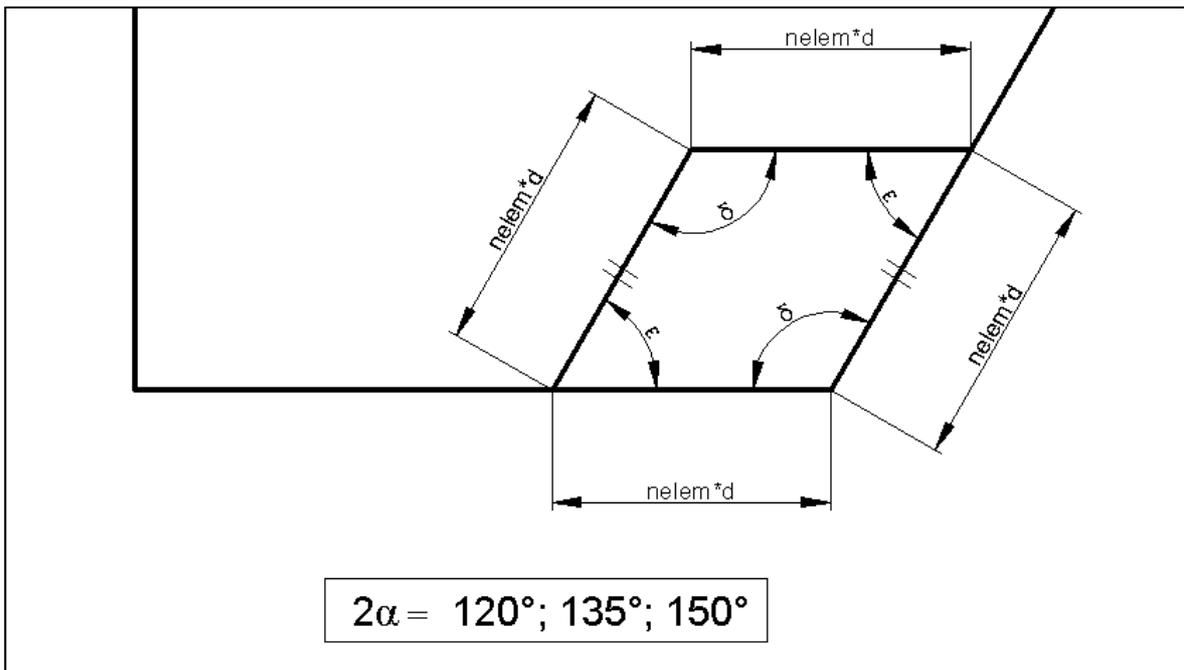


Figura 4.124: Configurazione dell'areola di controllo della mesh utilizzata nei casi dei seguenti angoli d'apertura dell'intaglio: 120°, 135°, 150°.

Di seguito si riporta una descrizione delle variabili espresse all'interno delle immagini:

- $nelem$ è il numero di elementi che sono stesi sul lato dell'areola;
- d è la global element size imposta;
- 2α è l'angolo d'apertura dell'intaglio;
- $\beta = \pi - \frac{(\pi-\alpha)}{2}$;
- $\delta = \pi - \alpha$
- $\varepsilon = \alpha$.

Dalle precedenti immagini si osserva che è possibile ottenere delle aree con un numero d'elementi per lato definito dal valore della variabile $nelem$; per determinare la dimensione migliore dell'areola sono state eseguite numerose analisi e sono stati comparati i risultati ottenuti. Di seguito si riporta quanto ricavato da molteplici analisi:

1. Gli angoli d'apertura più elevati, precisamente 120° , 135° , 150° , non risentono della dimensione dell'areola poiché il K_{FE}^{***} ricavato per ogni analisi presenta degli andamenti pressoché piatti al variare della stessa;
2. Gli angoli 0° , 30° , 45° , presentano una lieve sensibilità alla variazione della dimensione dell'areola; il K_{FE}^{***} oscilla sempre attorno ad un valore medio ben definito, ma presenta valori più vicini a quello espresso in letteratura, pari a 1.93, quando l'areola è formata da un numero pari d'elementi;
3. L'angolo d'apertura di 60° presenta ancora valori del K_{FE}^{***} più vicini a quelli desiderati quando l'areola è costruita con un numero pari d'elementi, ma si hanno delle oscillazioni in funzione della dimensione dell'areola molto marcate rispetto ai casi precedenti;
4. L'angolo di 90° risente sensibilmente della dimensione dell'areola di controllo poiché quest'ultima modifica profondamente il layout della mesh negli intorni del punto di singolarità; nella figura 1.4 è riportata la configurazione desiderata.

Dalla condizione 2. si ricava quindi che il numero d'elementi dell'areola deve essere possibilmente pari; dopo numerose analisi nella quali si è variata di volta in volta la

dimensione dell'areola non è stato possibile trovare una dimensione unica della stessa che permetta di ottenere i layout della mesh desiderati come riportati in figura 1.4 per tutte le geometrie. Per inciso l'angolo d'apertura che presenta maggiori problematiche al variare delle dimensioni dell'areola e della geometria analizzata è il 60° ; esso si trova nella zona intermedia tra i 45° e i 90° e il meshatore, al variare delle dimensioni geometriche del provino, si trova spesso in difficoltà nell'assegnazione del layout degli elementi dell'areola, distorcendo la mesh. Per tutti gli altri angoli d'apertura invece esiste più di una possibilità nell'assegnazione della dimensione dell'areola; nel lavoro si sceglie la dimensione minima della stessa che permette di ottenere buoni risultati, pari a 6×6 elementi. Nel caso invece dei 60° è necessario scegliere una dimensione dell'areola pari a 4×4 elementi, che si è rilevata l'unica che permette di ottenere buoni risultati al variare della geometria del provino testato oppure optare per una mesh mapped 6×6 elementi; si noti inoltre che, come già affermato, i gradi di apertura 120° , 135° e 150° non risentono sensibilmente della dimensione della mesh perciò potrebbero in linea teorica utilizzare a piacimento una delle due dimensioni dell'areola ricavate.

Nella trattazione si sceglie di assumere una dimensione dell'areola di 6 elementi, chiamata standard, per tutti gli angoli d'apertura diversi dai 60° , ottenendo quindi:

$$\text{Se } 2\alpha = [0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ] \rightarrow nelem = 6$$

$$\text{Se } 2\alpha = [60^\circ] \rightarrow nelem = 4$$

Nel caso in cui la dimensione dell'intaglio sia tale che l'areola da 6×6 o 4×4 elementi esce dall'area complessiva del provino il programma automatico Matlab® riduce la dimensione dell'areola stessa fino a che la sua dimensione non è compatibile con quelle geometriche; in questi casi però, che si verificano comunemente per dimensioni globali d'elemento elevate e intagli di piccole o grandi dimensioni, a causa del numero d'elementi dell'areola diverso dall'ottimale si possono ottenere delle mesh con layout diverso da quello desiderato.

A questo punto è necessario segnalare una problematica intrinseca al meshatore di Ansys®; definita l'areola con le dimensioni nominali di figura 4.123 o 4.124 in funzione dell'angolo d'apertura dell'intaglio, a causa di approssimazioni numeriche intrinseche al software le lunghezze dei lati dell'areola effettivamente creata sono diverse dalle nominali. Gli scostamenti dei valori effettivi da quelli nominali sono dell'ordine dei 10^{-6} mm, praticamente trascurabili, ma Ansys® si trova a meshare con elementi di dimensione media

pari a d [mm] un lato dell'areola di dimensione $nelem \cdot d + 10^{-6}$ [mm]; come risultato invece che posizionare $nelem$ elementi sul lato come desiderato esso ne posiziona $nelem + 1$, distorcendo sensibilmente la mesh e comportando una degradazione dei risultati finali.

Per ovviare al problema appena esposto sono state ideate due diverse metodologie di procedere:

1. La prima, più semplice da utilizzare da parte dell'utente che applica il metodo, consiste nell'aumentare di una piccola quantità la global element size imposta. In questo modo, nonostante il lato da meshare sia effettivamente più lungo del valore nominale, il meshatore torna a posizionare sul lato in questione il numero d'elementi desiderato;
2. La seconda, più laboriosa, consiste nel ridurre di una piccola quantità i lati dell'areola creata, in modo tale da evitare i problemi sopra esposti.

Si premette che i risultati ottenuti attraverso i due modi di procedere sono compatibili tra loro. In termini applicativi la prima metodologia risulta più semplice; durante l'utilizzo del metodo se si ottiene una mesh con un layout distorto a causa della creazione di un elemento in più su un lato per i problemi sopra descritti è sufficiente aumentare di una piccola quantità la global element size e ricostruire la mesh. Dopo l'esecuzione di numerose analisi si è ricavato che la quantità percentuale di cui aumentare la global element size rispetto al valore nominale è dello 0.1%; in questo modo, per fare un esempio, se si è costruita l'areola di controllo con dimensioni nominali che prevedono una global element size pari a 0.2 mm sarà necessario imporre, in fase di creazione della mesh, un valore di tale parametro di 0.2002. Si noti quindi che la differenza tra i due valori risulta trascurabile in fase d'analisi dei risultati.

Nel proseguo della trattazione tutti i risultati saranno ottenuti attraverso il primo modo di procedere.

4.3.5.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Il programma automatico utilizzato per svolgere l'intera batteria d'analisi ricalca ogni aspetto descritto nel paragrafo 4.1.2.1; le differenze nel suo utilizzo sono legate al fatto che

si itera anche rispetto all'angolo d'apertura e che si è aggiunta la creazione dell'areola all'apice dell'intaglio.

Si elencano di seguito i vari input da fornire al programma per il suo corretto funzionamento.

1. Riga 17 - Variabile "start". Se posta = 0 il programma crea solamente il file apdl e termina la propria esecuzione, mentre se posta = 1 il programma crea il file apdl, lancia un'esecuzione batch di Ansys® ed esegue il postprocess dei risultati;
2. Riga 23 - Variabile "NSIF". Se posta = 1 il programma esegue l'analisi dell'intaglio attraverso il metodo NSIF, mentre se posta = 0 il programma esegue un'analisi sfruttando il PSM;
3. Riga 7 - Variabile "de". Specifica il diametro esterno del provino in mm;
4. Riga 9 - Variabile "lt". Specifica la lunghezza totale del provino in mm;
5. Riga 10 - Variabile "TAU". Specifica la tensione tangenziale lorda valutata al diametro esterno del provino in MPa;
6. Riga 41 - Variabile "Tabalfa". In questa variabile a più dimensioni s'inseriscono in successione le aperture dell'intaglio 2α (vedere figura 4.43) da testare durante la batteria d'analisi;
7. Riga 44 - Variabile "Tabsize". In questa variabile a più dimensioni s'inseriscono in successione le dimensioni caratteristiche dell'intaglio a (vedere figura 4.43) da testare durante la batteria d'analisi;
8. Riga 47 - Variabile "Tabelem". Questa variabile ha due significati in funzione del valore di "NSIF". Se "NSIF" = 1, e quindi si sta svolgendo un'analisi col metodo NSIF, "Tabelem" è una costante che corrisponde alla global element size della mesh che si userà per ogni analisi svolta nella batteria; se, invece, "NSIF" = 0 e quindi si sta svolgendo un'analisi sfruttando il PSM, "Tabelem" è un vettore che contiene nelle sue celle le varie dimensioni globali di elemento da utilizzare per analisi successive;
9. Riga 39 - Variabile "original_nelem". Questa variabile contiene il numero di elementi scelto per ogni lato dell'areola;

10. Riga 35 - Variabile "tolerance". Questa variabile assume due diversi significati in funzione del programma utilizzato. Se il programma per risolvere il problema già discusso del numero d'elementi per lato aumenta la global element size allora la variabile in questione contiene l'aumento percentuale da assegnare; nel caso in cui il programma diminuisce la lunghezza dei lati dell'areola questa è la diminuzione percentuale assegnata ad ogni lato;
11. Riga 47 - Variabile "free". Questa variabile permette di scegliere la metodologia desiderata per la creazione della mesh; se è = 2 utilizza una mesh free per l'areola, mentre se è =0 sfrutta un approccio mapped.
12. Riga 53 - Variabile "plane". Questa variabile permette di scegliere il tipo d'elemento utilizzato. Se è pari a 25 si utilizzano i PLANE25, se è uguale a 83 i PLANE83.

4.3.5.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

Si riportano di seguito alcuni esempi, riferiti ad una singola dimensione globale d'elemento pari a 0.2 mm, delle mesh ottenute attraverso questo modo di procedere; in questo caso, diversamente da quanto osservato nel precedente paragrafo dove si trattavano mesh totalmente free, si osserva che il layout ottenuto al variare delle grandezze geometriche rimane pressoché invariato.

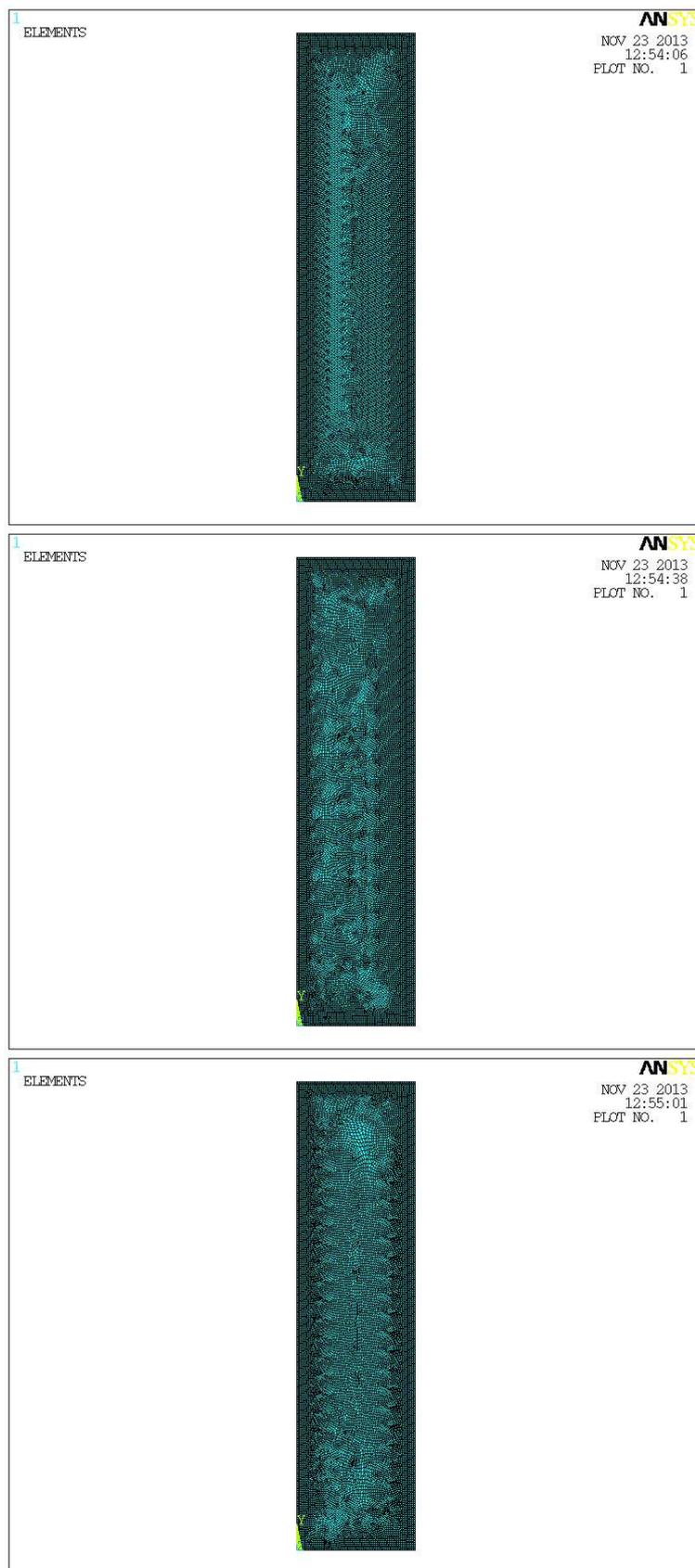


Figura 4.125: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 0^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

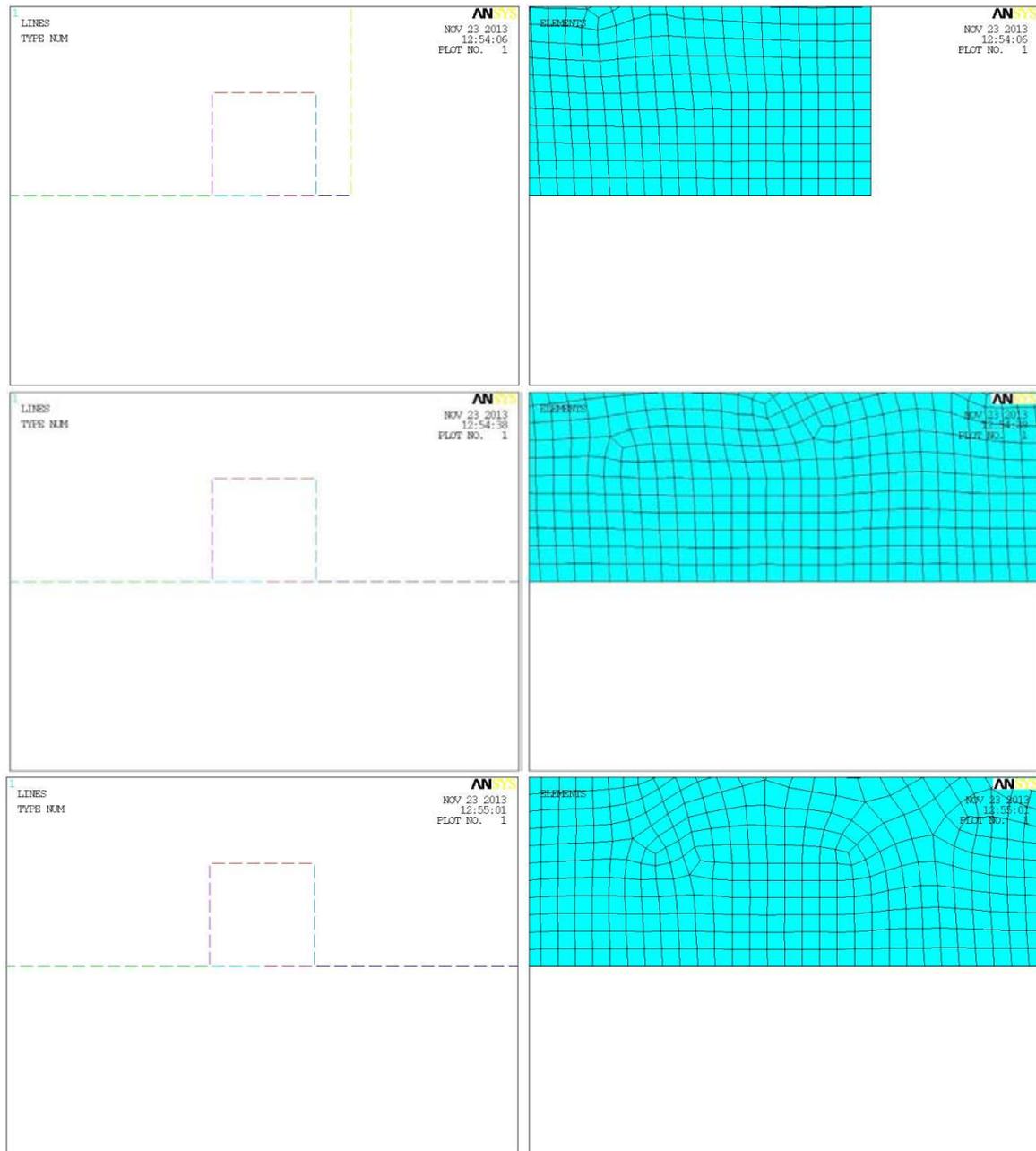


Figura 4.126: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 0^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

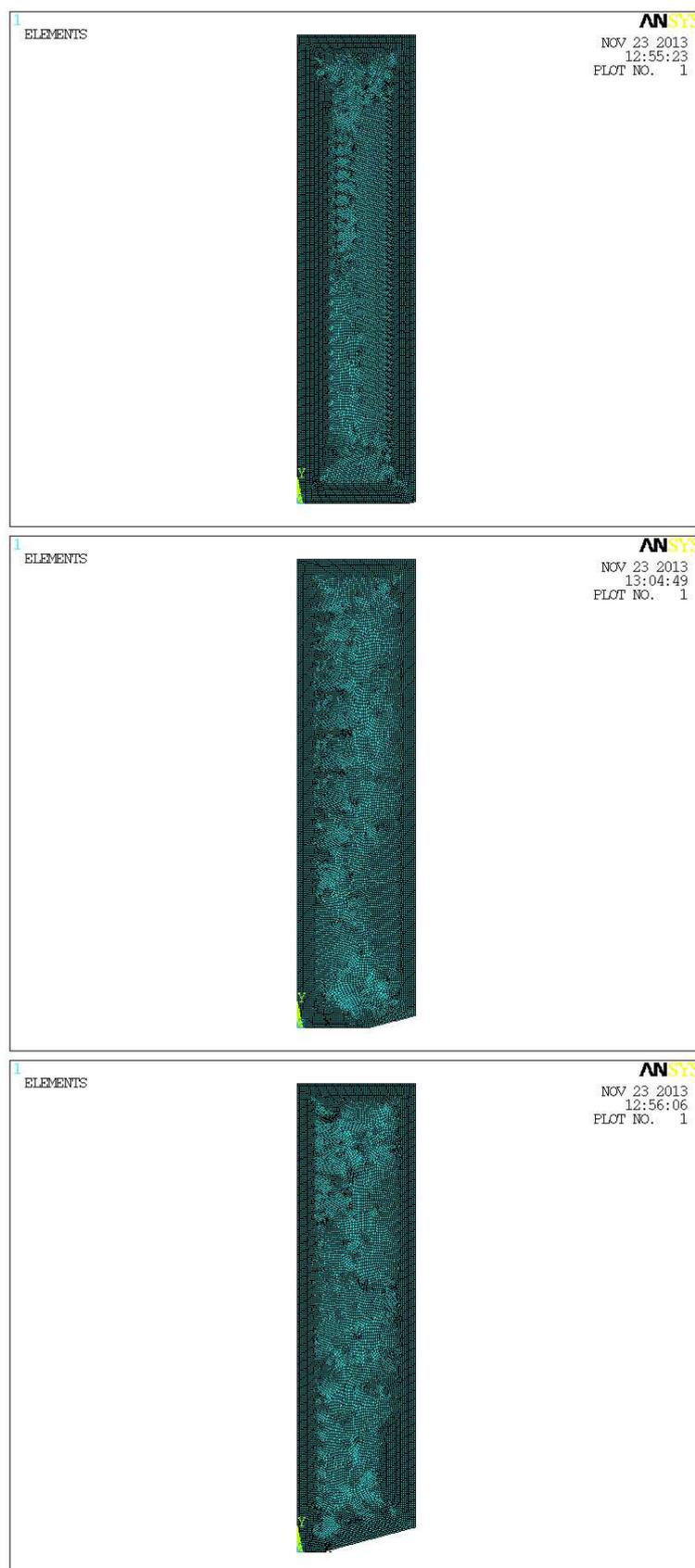


Figura 4.127: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 30^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

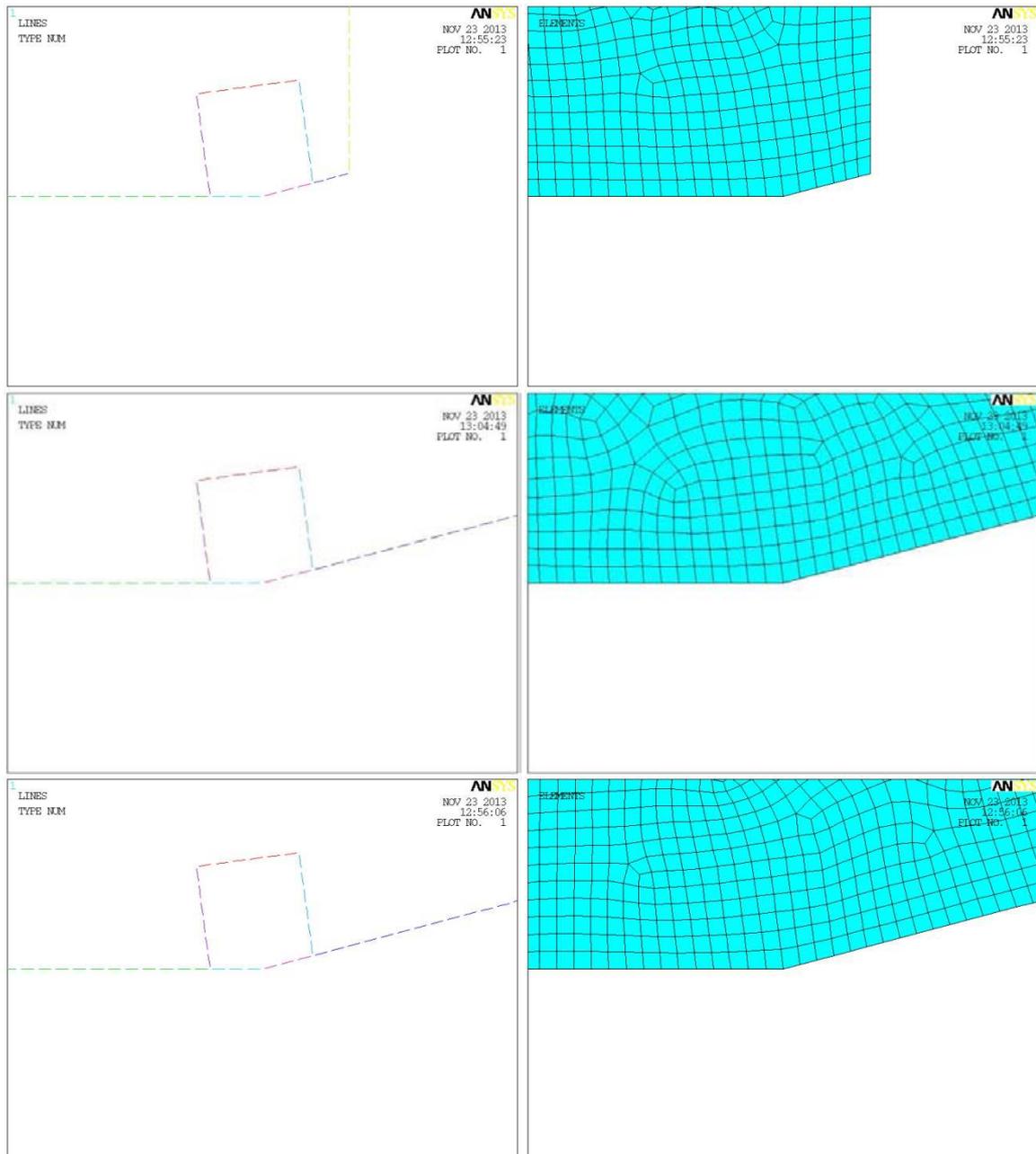


Figura 4.128: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 30^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

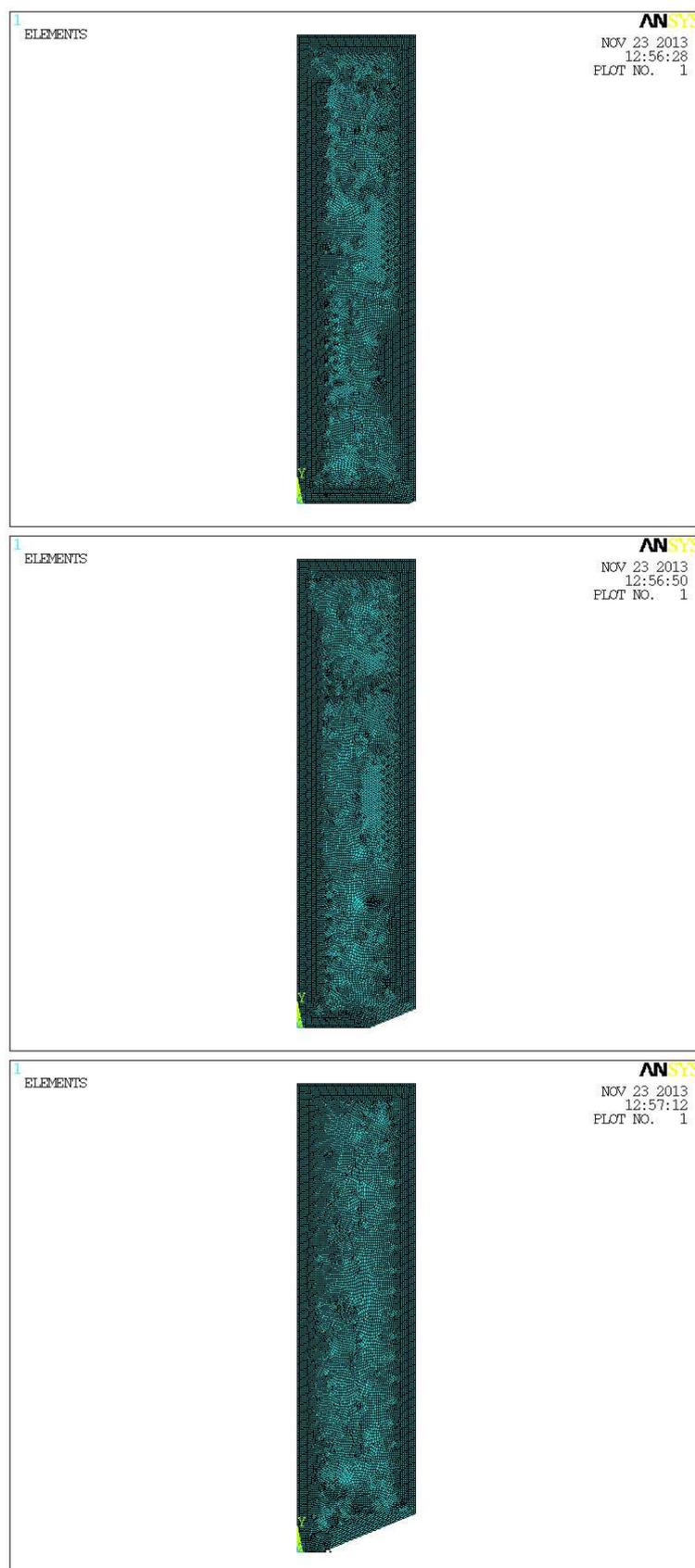


Figura 4.129: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 45^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

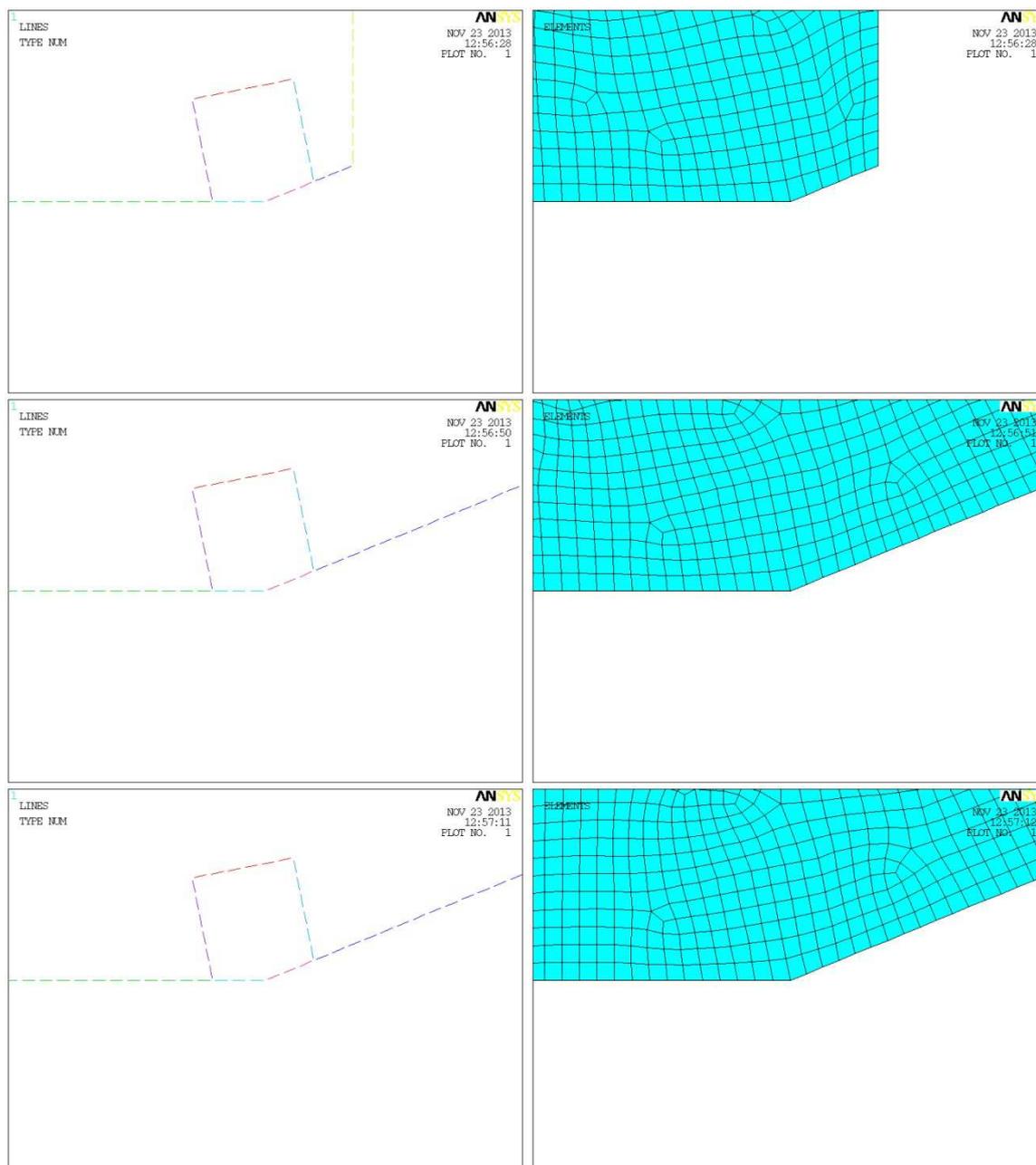


Figura 4.130: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 45^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

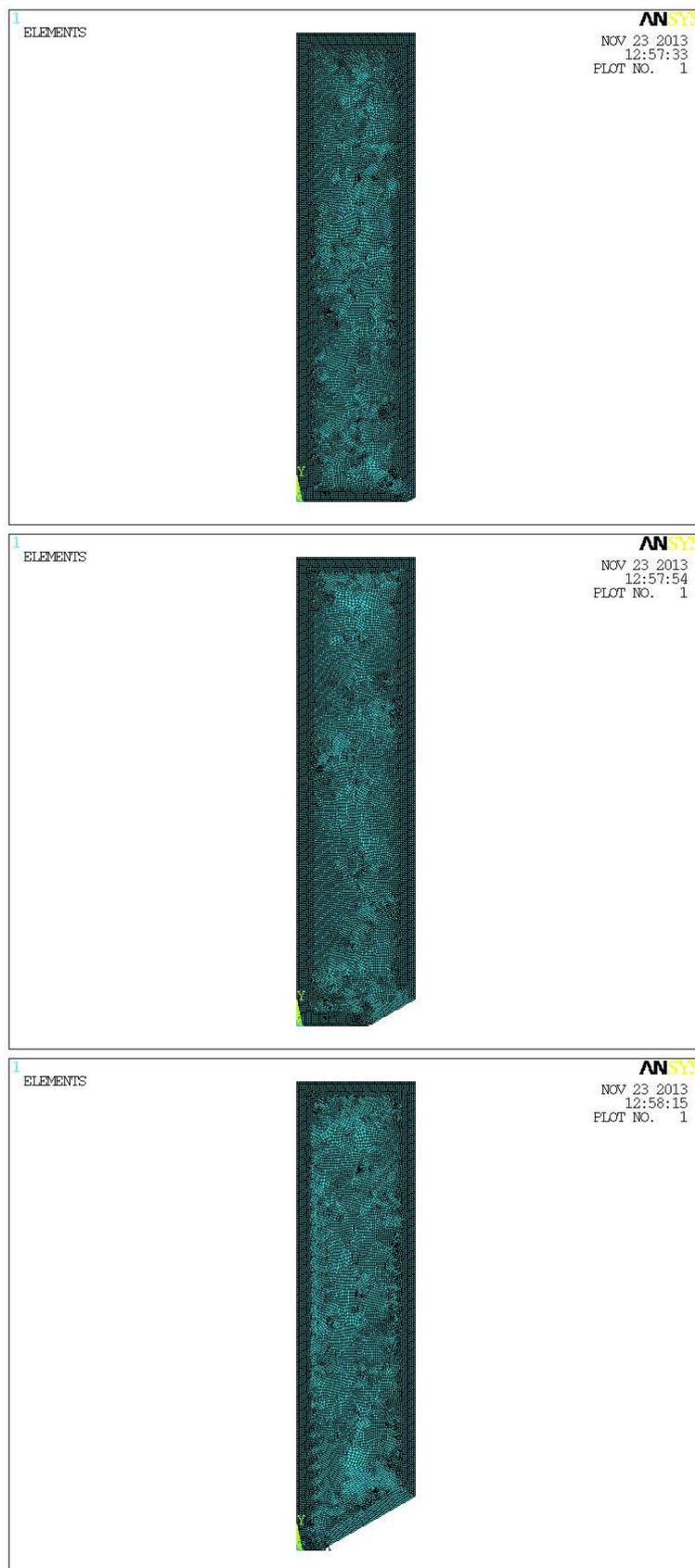


Figura 4.131: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 60^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

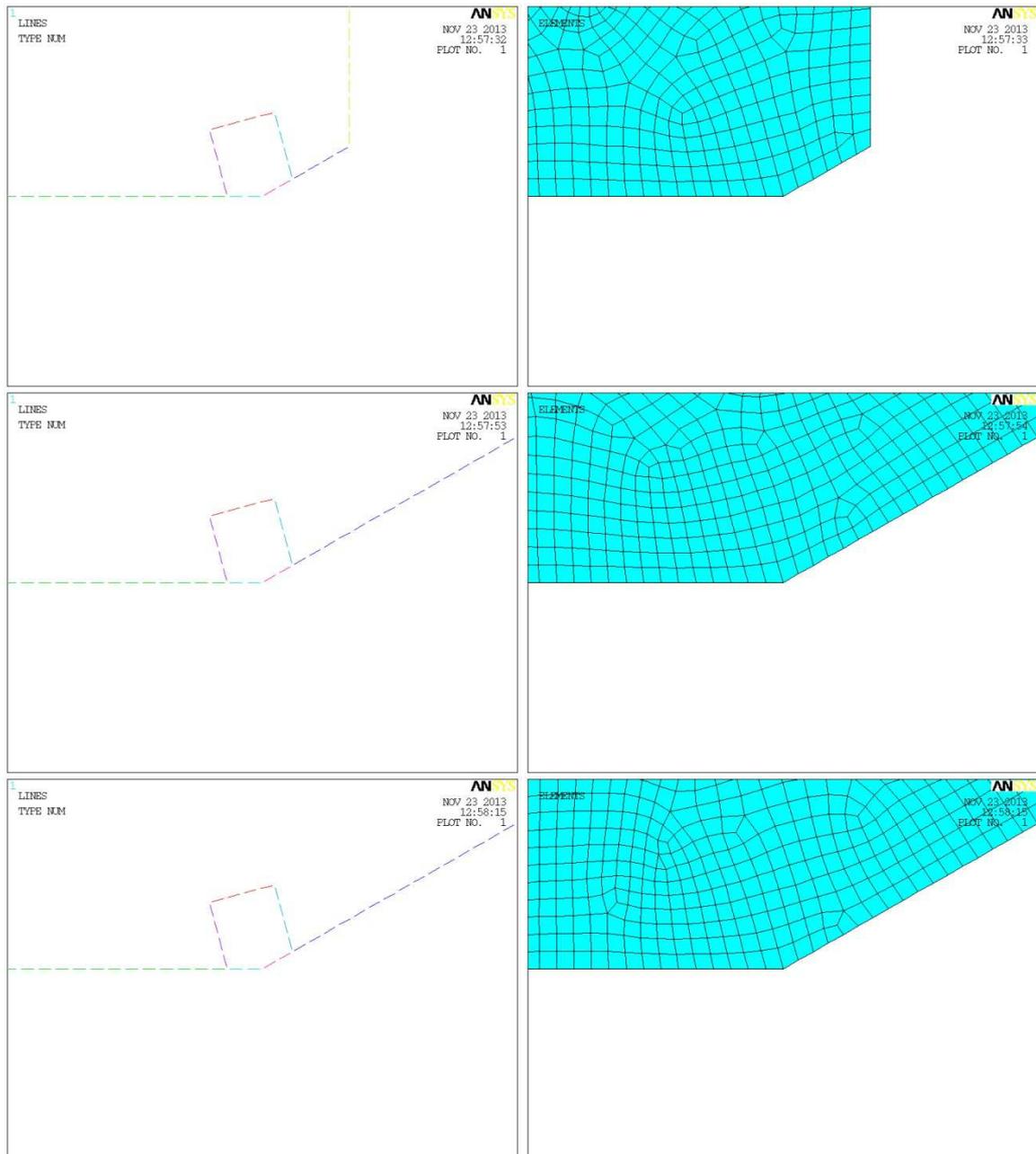


Figura 4.132: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 60^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

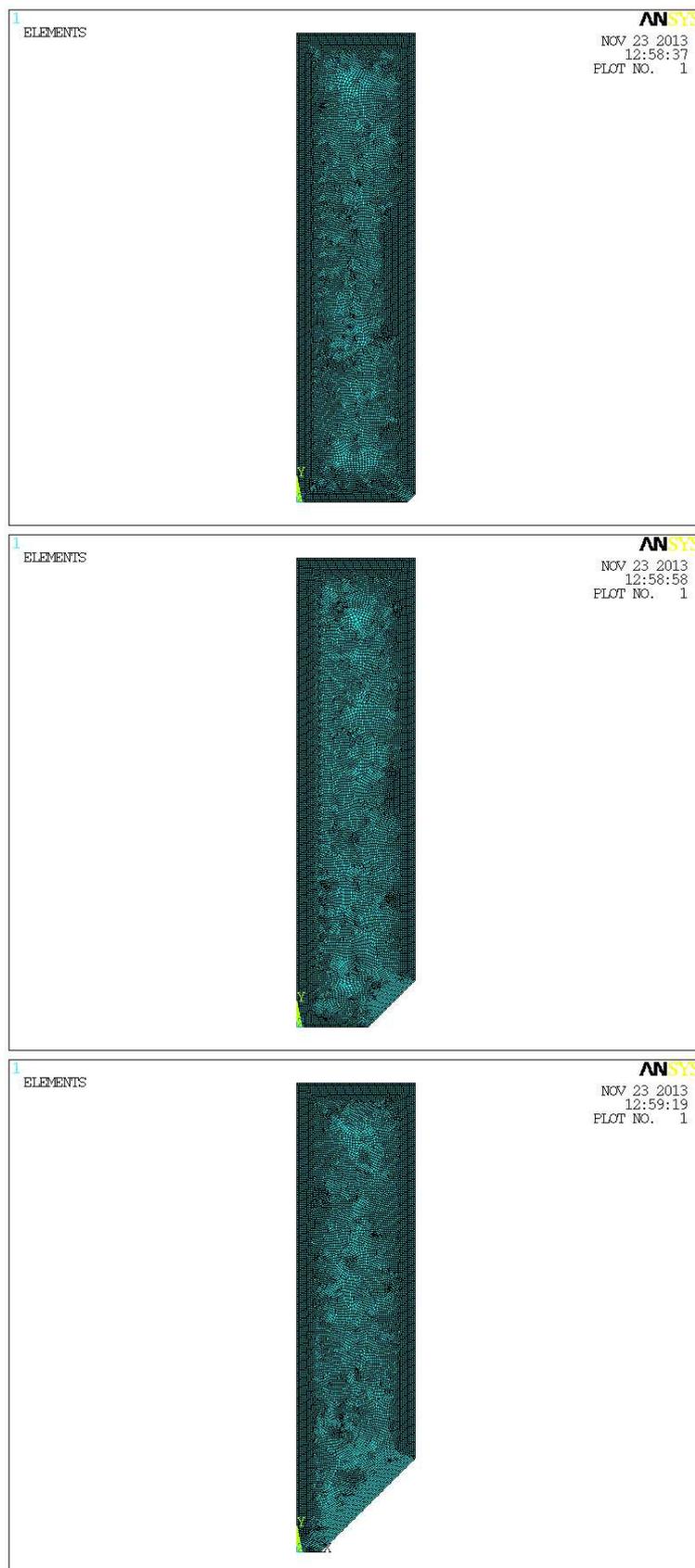


Figura 4.133: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

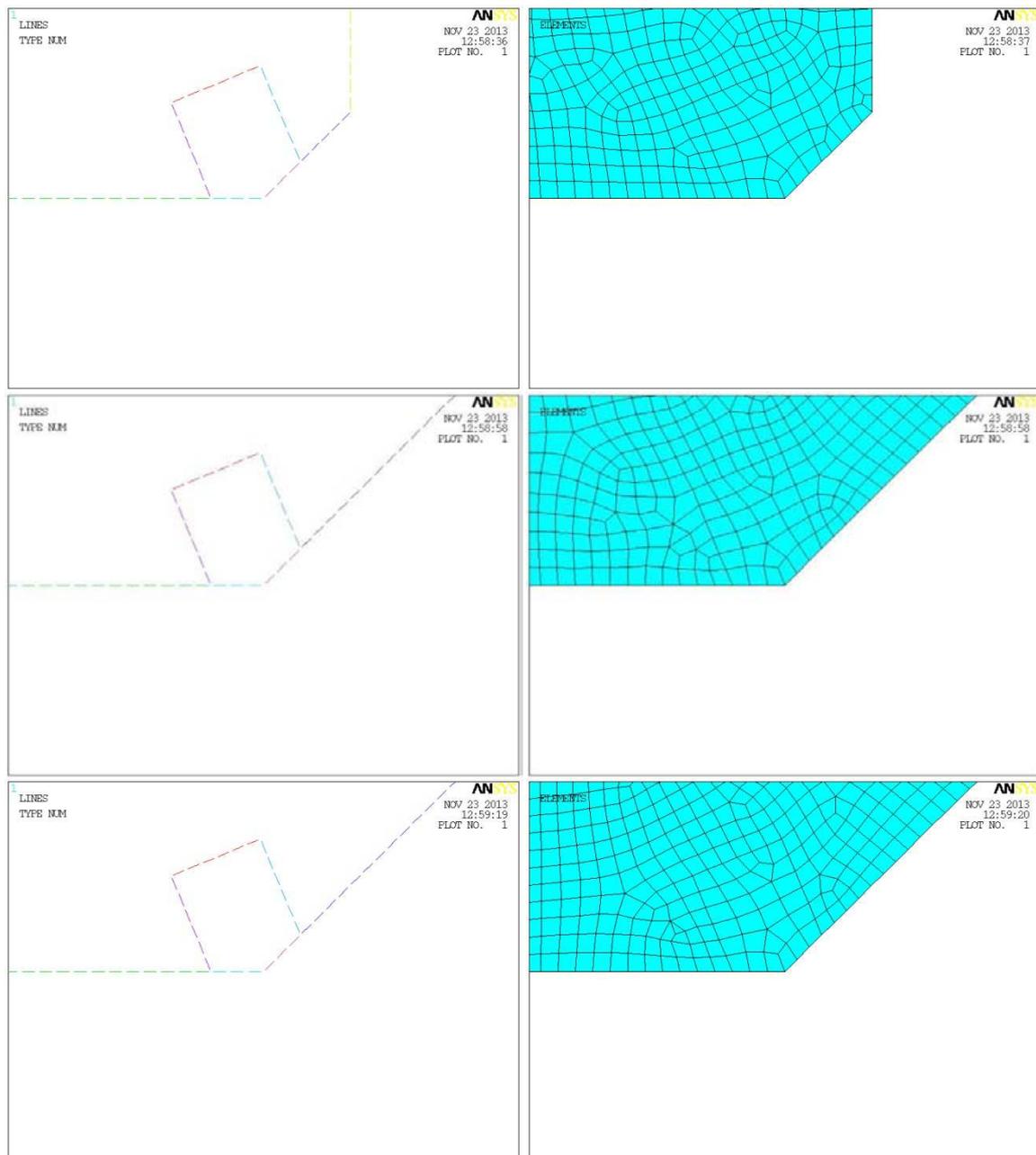


Figura 4.134: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

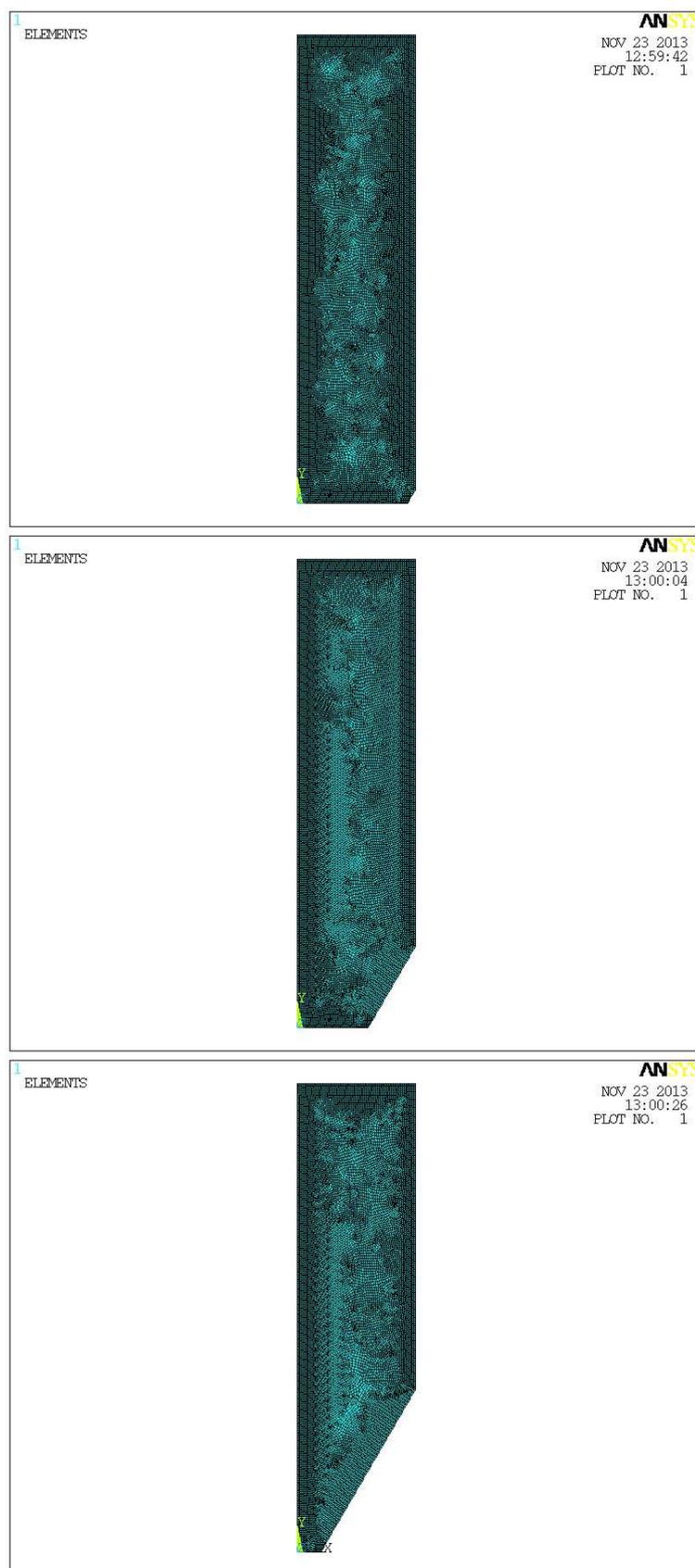


Figura 4.135: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

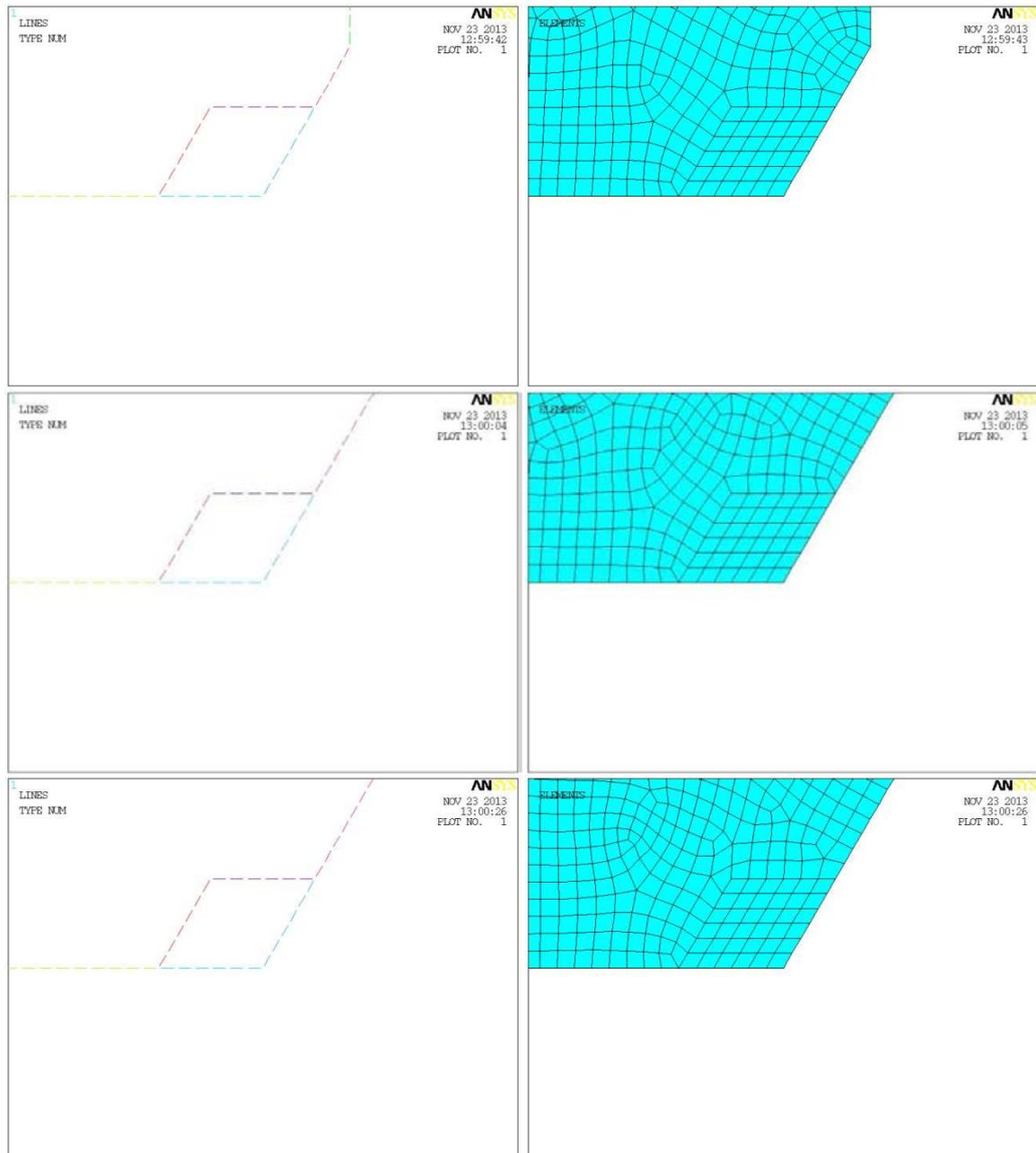


Figura 4.136: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

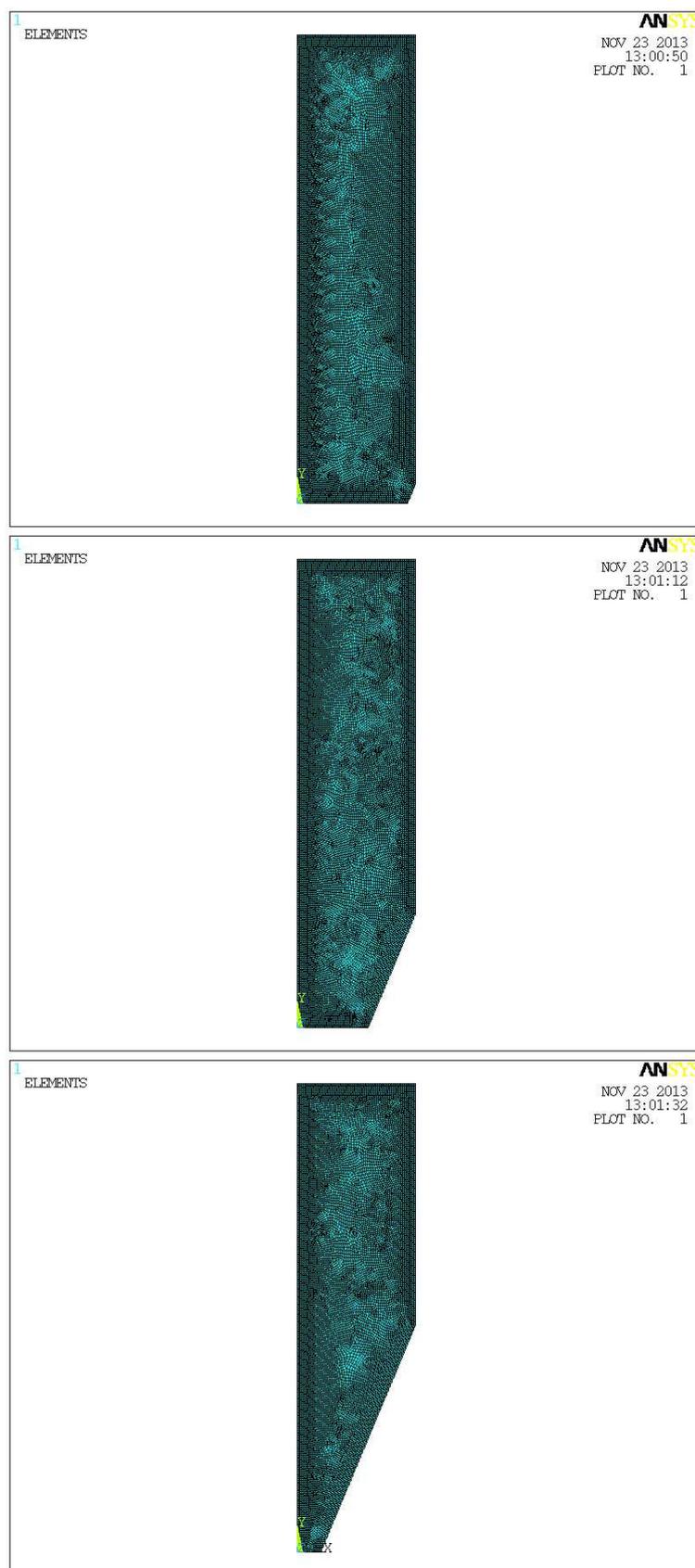


Figura 4.137: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

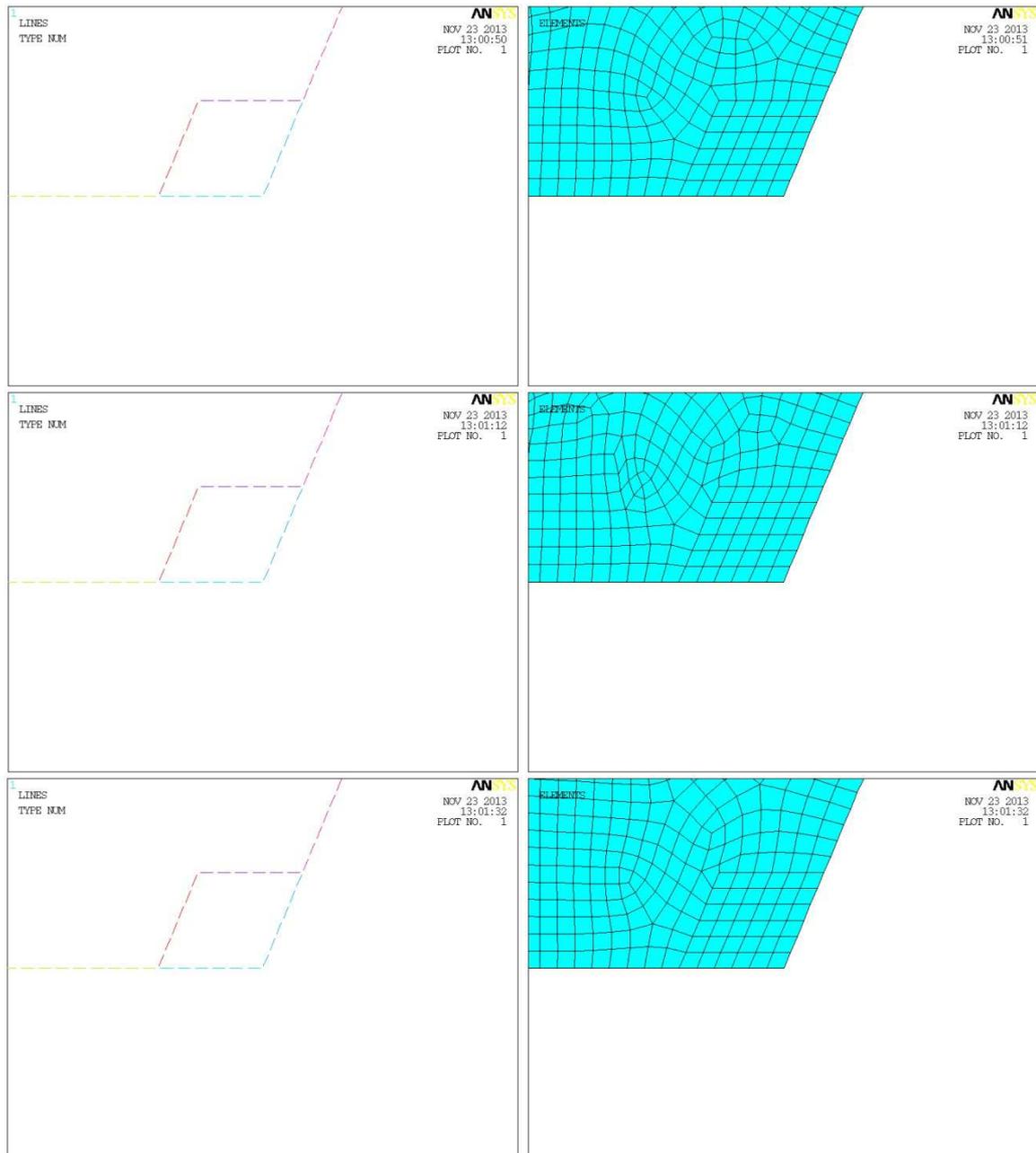


Figura 4.138: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

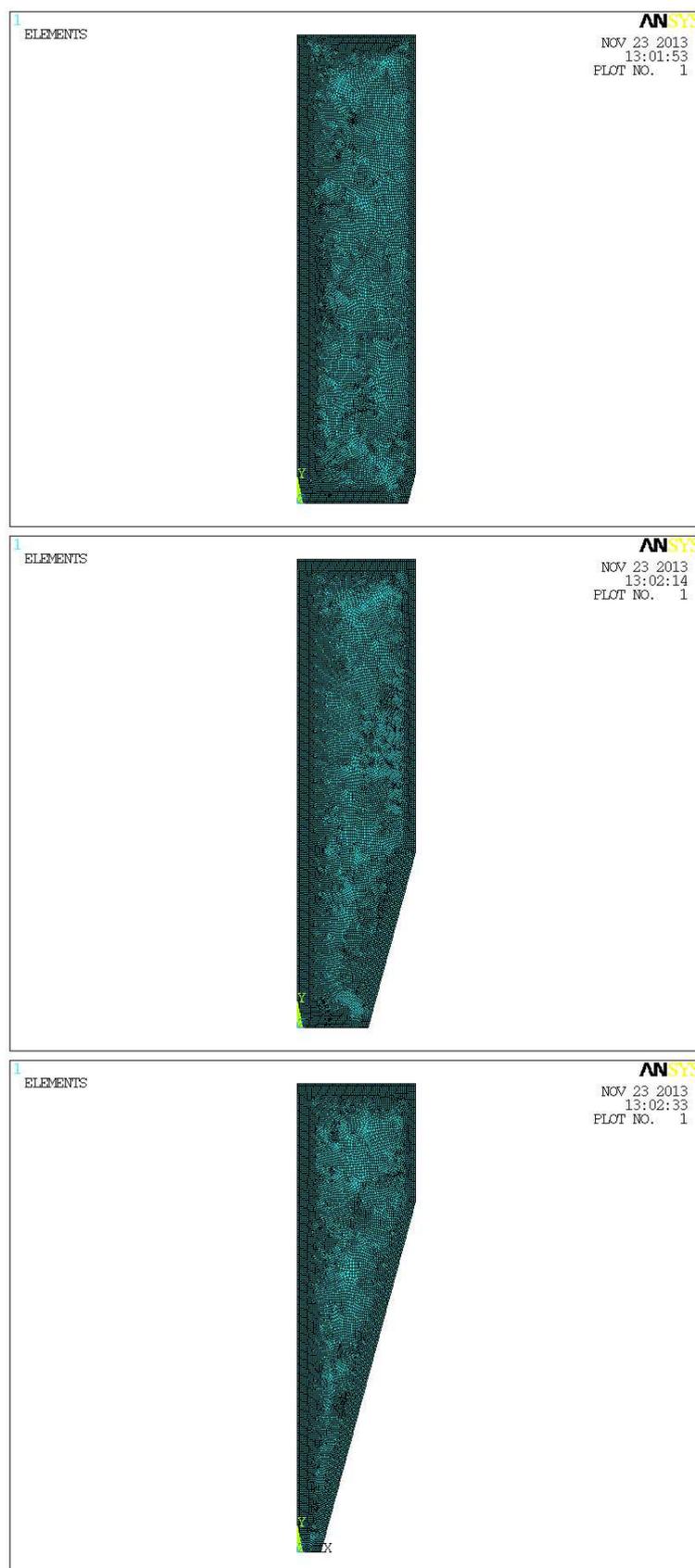


Figura 4.139: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

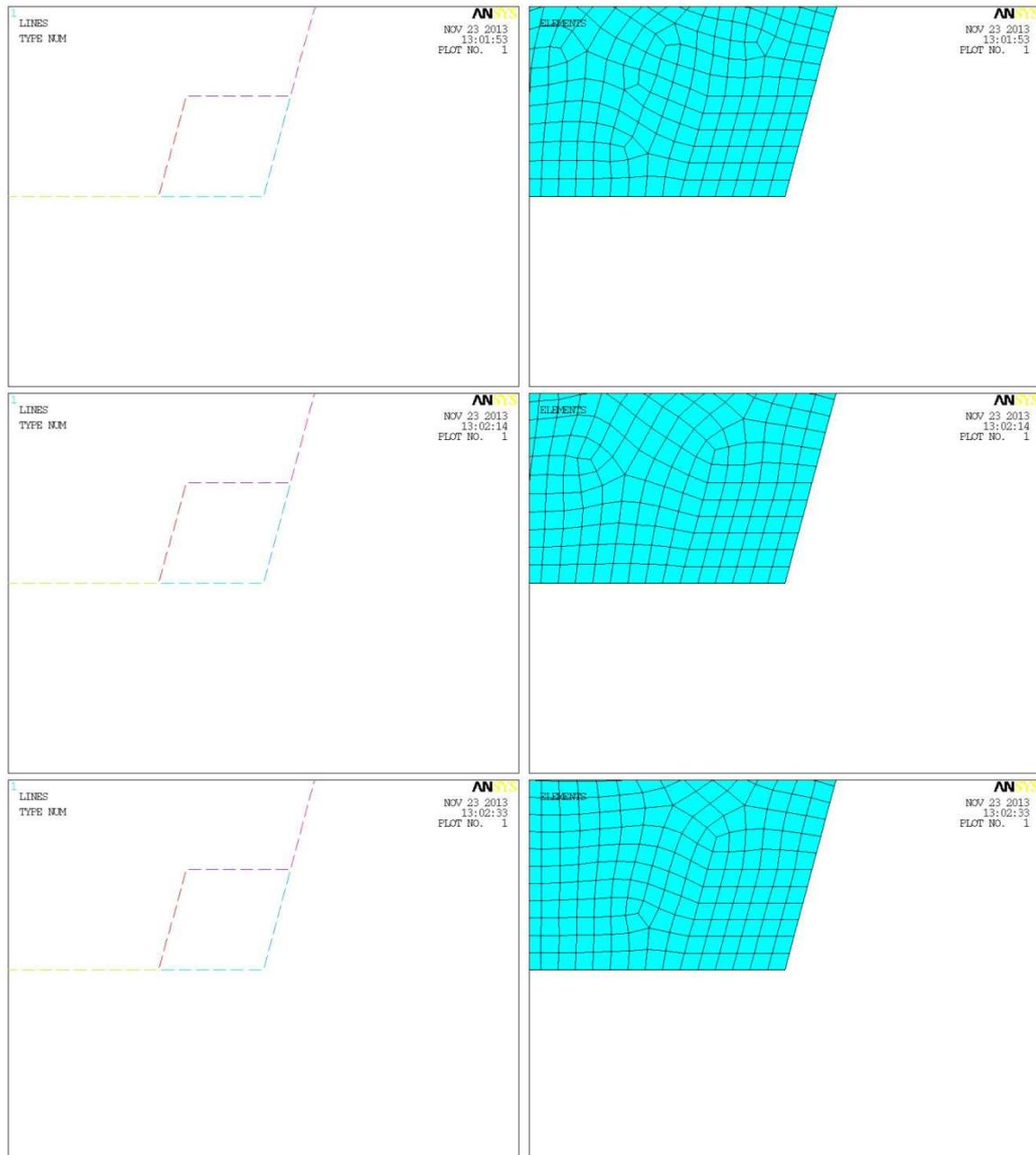


Figura 4.140: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

4.3.5.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

Per quanto riguarda il PSM, l'intera batteria d'analisi pensata nel caso di modo III è realizzata fissando dapprima l'angolo d'apertura dell'intaglio; bloccato questo si è successivamente fissata la global element size utilizzata per la realizzazione della mesh e infine si è iterato sulla dimensione caratteristica dell'intaglio. Terminate quest'ultime si è

variato il valore della global element size e infine si è passati all'angolo d'apertura successivo, ripetendo la procedura.

Si elencano di seguito i parametri presi in esame nel presente lavoro:

- Angoli d'apertura: 0°; 30°; 45°; 60°; 90°; 120°; 135°; 150°.
- Dimensioni globali d'elemento: 0.5 mm; 0.4 mm; 0.3 mm; 0.2 mm; 0.1 mm.
- Dimensioni caratteristiche dell'intaglio: da 1 a 14 mm con passo 1 mm.

L'intera batteria d'analisi espressa in termini del parametro adimensionale "a/d" è riportata nella seguente tabella:

d [mm]	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
a [mm]	a/d				
1	2	2.5	3.333333	5	10
2	4	5	6.666667	10	20
3	6	7.5	10	15	30
4	8	10	13.333333	20	40
5	10	12.5	16.666667	25	50
6	12	15	20	30	60
7	14	17.5	23.333333	35	70
8	16	20	26.666667	40	80
9	18	22.5	30	45	90
10	20	25	33.333333	50	100
11	22	27.5	36.666667	55	110
12	24	30	40	60	120
13	26	32.5	43.333333	65	130
14	28	35	46.666667	70	140

Tabella 4.51: Valori del parametro adimensionale a/d per i vari casi analizzati.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal PSM riassumendo in ogni tabella una singola global element size; si è preferito suddividere i risultati riferiti ad ogni angolo d'apertura dell'intaglio in diversi sottoparagrafi.

In tutte le tabelle riportate si noti che:

- a è la dimensione dell'intaglio;
- d è la dimensione globale d'elemento imposta;

- x^* è l'estensione del campo locale di tensione valuta numericamente come già descritto;
- τ_{peak} è la tensione di picco misurata all'apice dell'intaglio e intesa come una τ_{yz} , dove y è la direzione ortogonale alla bisettrice dell'intaglio e z quella uscente dal piano 2D;
- K_{FE}^{***} è il valore adimensionale calcolato numericamente tramite la (1.6).
- Il numero effettivo di elementi che compongono l'areola è differente da quello nominale, soprattutto per dimensioni d'elemento elevate e piccoli e grandi dimensioni dell'intaglio, a causa del problema di contenimento dell'areola stessa all'interno della geometria di base già descritto in precedenza.

4.3.5.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 0°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.082	0.164	16.444	1.644	1.600	3
2	4	0.241	0.481	21.699	2.170	1.862	6
3	6	0.994	1.989	28.899	2.890	1.906	6
4	8	2.781	5.563	37.632	3.763	1.941	6
5	10	1.357	2.713	48.983	4.898	1.953	6
6	12	0.638	1.276	64.563	6.456	1.967	6
7	14	0.653	1.306	87.075	8.708	1.981	6
8	16	0.528	1.056	121.46	12.146	1.996	6
9	18	0.425	0.851	177.56	17.756	2.013	6
10	20	0.328	0.655	277.16	27.716	2.037	6
11	22	0.279	0.558	475.91	47.591	2.074	6
12	24	0.215	0.430	948.49	94.849	2.135	6
13	26	0.147	0.293	2462.4	246.240	2.260	6
14	28	0.076	0.151	13306	1330.600	2.363	3

Tabella 4.52: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.082	0.205	16.59	1.659	1.773	4
2	5	0.241	0.601	24.348	2.435	1.855	6
3	7.5	0.994	2.486	32.324	3.232	1.905	6
4	10	2.781	6.954	42.202	4.220	1.935	6
5	12.5	1.357	3.391	55.028	5.503	1.944	6
6	15	0.638	1.595	72.637	7.264	1.955	6
7	17.5	0.653	1.633	98.159	9.816	1.965	6
8	20	0.528	1.320	138.07	13.807	1.963	6
9	22.5	0.425	1.063	200.57	20.057	1.993	6
10	25	0.328	0.819	315.95	31.595	1.998	6
11	27.5	0.279	0.697	541.67	54.167	2.037	6
12	30	0.215	0.537	1086.6	108.660	2.084	6
13	32.5	0.147	0.367	2854	285.400	2.180	6
14	35	0.076	0.189	13732	1373.200	2.560	4

Tabella 4.53: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.082	0.274	18.748	1.875	1.812	6
2	6.666666667	0.241	0.802	27.766	2.777	1.879	6
3	10	0.994	3.315	37.206	3.721	1.911	6
4	13.33333333	2.781	9.272	48.873	4.887	1.929	6
5	16.66666667	1.357	4.522	63.886	6.389	1.933	6
6	20	0.638	2.127	84.142	8.414	1.949	6
7	23.33333333	0.653	2.177	114.24	11.424	1.950	6
8	26.66666667	0.528	1.760	159.85	15.985	1.958	6
9	30	0.425	1.418	233.21	23.321	1.979	6
10	33.33333333	0.328	1.092	367.94	36.794	1.981	6
11	36.66666667	0.279	0.930	632.16	63.216	2.015	6
12	40	0.215	0.716	1275.1	127.510	2.050	6
13	43.33333333	0.147	0.489	3425.9	342.590	2.097	6
14	46.66666667	0.076	0.252	17352	1735.200	2.339	6

Tabella 4.54: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.082	0.411	22.629	2.263	1.838	6
2	10	0.241	1.203	33.864	3.386	1.887	6
3	15	0.994	4.972	46.032	4.603	1.892	6
4	20	2.781	13.907	60.073	6.007	1.923	6
5	25	1.357	6.783	78.626	7.863	1.924	6
6	30	0.638	3.191	104.11	10.411	1.929	6
7	35	0.653	3.266	142.21	14.221	1.918	6
8	40	0.528	2.640	197.63	19.763	1.939	6
9	45	0.425	2.126	290.3	29.030	1.947	6
10	50	0.328	1.638	457.07	45.707	1.953	6
11	55	0.279	1.395	793.44	79.344	1.967	6
12	60	0.215	1.074	1607.9	160.790	1.991	6
13	65	0.147	0.733	4334.3	433.430	2.030	6
14	70	0.076	0.379	22832	2283.200	2.177	6

Tabella 4.55: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.082	0.821	31.462	3.146	1.870	6
2	20	0.241	2.406	47.719	4.772	1.893	6
3	30	0.994	9.944	64.744	6.474	1.903	6
4	40	2.781	27.815	85.27	8.527	1.915	6
5	50	1.357	13.565	111.82	11.182	1.913	6
6	60	0.638	6.381	148.24	14.824	1.916	6
7	70	0.653	6.532	201.08	20.108	1.919	6
8	80	0.528	5.281	282.08	28.208	1.922	6
9	90	0.425	4.253	418.45	41.845	1.910	6
10	100	0.328	3.276	655.31	65.531	1.927	6
11	110	0.279	2.789	1150.9	115.090	1.917	6
12	120	0.215	2.149	2328.2	232.820	1.945	6
13	130	0.147	1.466	6348.8	634.880	1.960	6
14	140	0.076	0.757	34675	3467.500	2.027	6

Tabella 4.56: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 0°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

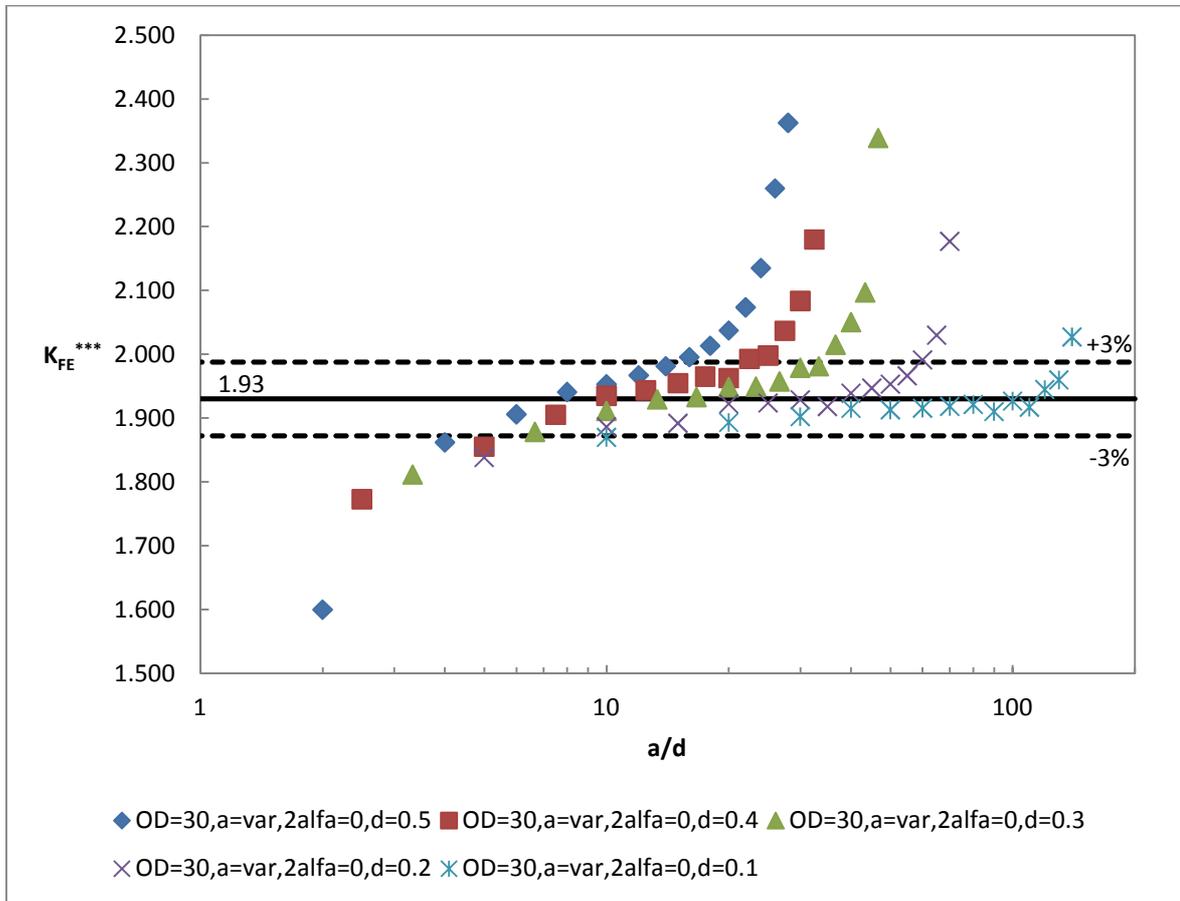


Figura 4.141: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, e in questo caso è coerente con quello di riferimento calcolato numericamente; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Anche in questo caso si riconfermano gli andamenti del K_{FE}^{***} uscenti dalle bande d'accettabilità per i motivi già discussi in precedenza; diagrammando gli stessi risultati in termini di x^*/d si ha quindi:

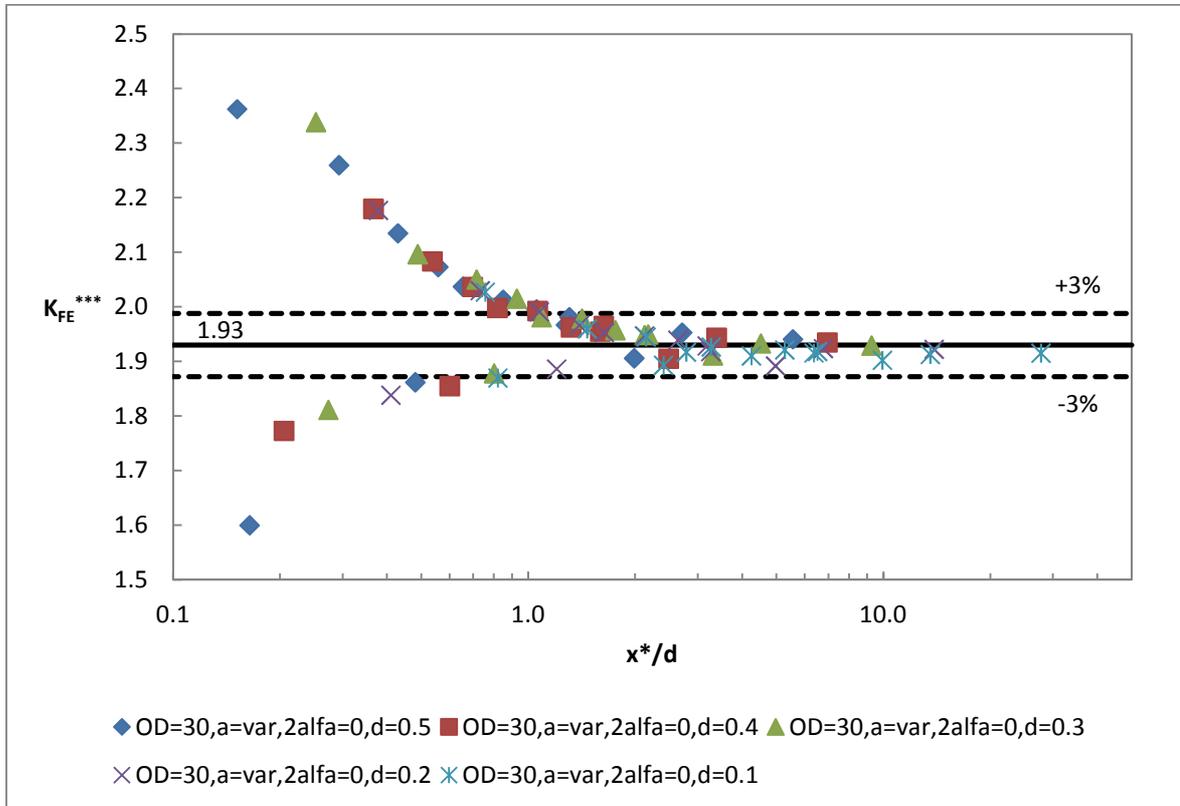


Figura 4.142: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, ed è coerente con quello di riferimento calcolato numericamente; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Da quest'ultimo diagramma si osserva quindi che la convergenza del metodo è ripristinata grazie a questa nuova definizione riguardo il fattore di convergenza.

Il valore di riferimento assunto corrisponde a quello dichiarato in letteratura ed è pari a 1.93; si noti inoltre che in questo caso di controllo del layout della mesh attraverso l'areola si ottiene un limite di convergenza inferiore rispetto a quanto ricavato nel caso senza areola. Con la mesh non controllata infatti era necessario avere un $x^*/d \geq 3$, mentre con l'areola di controllo si ha un limite di:

$$\frac{x^*}{d} \geq 1 \quad (4.9)$$

4.3.5.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 30°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.172	0.343	17.418	1.742	1.669	4
2	4	0.634	1.269	22.044	2.204	1.961	6
3	6	2.968	5.937	29.839	2.984	1.947	6
4	8	1.089	2.179	38.678	3.868	1.971	6
5	10	0.767	1.534	50.334	5.033	1.974	6
6	12	0.568	1.136	66.388	6.639	1.986	6
7	14	0.465	0.930	89.66	8.966	2.001	6
8	16	0.333	0.666	125.67	12.567	2.012	6
9	18	0.327	0.653	179.96	17.996	2.089	6
10	20	0.283	0.566	290.42	29.042	2.058	6
11	22	0.220	0.439	502.46	50.246	2.103	6
12	24	0.170	0.340	1011	101.100	2.169	6
13	26	0.116	0.231	2659.9	265.990	2.312	6
14	28	0.062	0.124	17963	1796.300	1.989	3

Tabella 4.57: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.172	0.429	20.512	2.051	1.568	5
2	5	0.634	1.586	24.947	2.495	1.918	6
3	7.5	2.968	7.421	34.753	3.475	1.850	6
4	10	1.089	2.723	43.142	4.314	1.955	6
5	12.5	0.767	1.918	56.081	5.608	1.961	6
6	15	0.568	1.420	73.984	7.398	1.972	6
7	17.5	0.465	1.163	98.881	9.888	2.008	6
8	20	0.333	0.833	140.47	14.047	1.992	6
9	22.5	0.327	0.817	232.76	23.276	1.788	6
10	25	0.283	0.708	326.19	32.619	2.028	6
11	27.5	0.220	0.549	566.96	56.696	2.062	6
12	30	0.170	0.425	1149	114.900	2.112	6
13	32.5	0.116	0.289	3061.9	306.190	2.223	6
14	35	0.062	0.154	20814	2081.400	1.900	3

Tabella 4.58: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.172	0.572	19.557	1.956	1.875	6
2	6.666666667	0.634	2.114	28.401	2.840	1.920	6
3	10	2.968	9.894	37.89	3.789	1.934	6
4	13.33333333	1.089	3.631	52.245	5.225	1.840	6
5	16.66666667	0.767	2.557	64.391	6.439	1.946	6
6	20	0.568	1.894	85.09	8.509	1.955	6
7	23.33333333	0.465	1.550	121.09	12.109	1.869	6
8	26.66666667	0.333	1.110	161.99	16.199	1.969	6
9	30	0.327	1.089	238.97	23.897	1.985	6
10	33.33333333	0.283	0.943	377.51	37.751	1.997	6
11	36.66666667	0.220	0.732	657.74	65.774	2.026	6
12	40	0.170	0.567	1344	134.400	2.058	6
13	43.33333333	0.116	0.385	3628.7	362.870	2.138	6
14	46.66666667	0.062	0.206	24338	2433.800	1.852	5

Tabella 4.59: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.172	0.858	23.271	2.327	1.894	6
2	10	0.634	3.172	34.196	3.420	1.918	6
3	15	2.968	14.841	47.586	4.759	1.852	6
4	20	1.089	5.446	66.125	6.613	1.748	6
5	25	0.767	3.836	81.027	8.103	1.860	6
6	30	0.568	2.841	108.31	10.831	1.846	6
7	35	0.465	2.326	139.98	13.998	1.944	6
8	40	0.333	1.666	196.9	19.690	1.947	6
9	45	0.327	1.633	290.71	29.071	1.962	6
10	50	0.283	1.415	460.94	46.094	1.967	6
11	55	0.220	1.098	807.49	80.749	1.984	6
12	60	0.170	0.850	1658.2	165.820	2.005	6
13	65	0.116	0.578	4253.8	425.380	2.193	6
14	70	0.062	0.309	24495	2449.500	2.212	6

Tabella 4.60: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.172	1.715	31.967	3.197	1.890	6
2	20	0.634	6.343	46.898	4.690	1.916	6
3	30	2.968	29.683	63.487	6.349	1.902	6
4	40	1.089	10.893	83.036	8.304	1.908	6
5	50	0.767	7.672	104.82	10.482	1.970	6
6	60	0.568	5.681	150.45	15.045	1.821	6
7	70	0.465	4.651	204.54	20.454	1.823	6
8	80	0.333	3.331	272.79	27.279	1.926	6
9	90	0.327	3.266	395.33	39.533	1.977	6
10	100	0.283	2.830	641.44	64.144	1.937	6
11	110	0.220	2.196	1128	112.800	1.947	6
12	120	0.170	1.701	2331.3	233.130	1.955	6
13	130	0.116	1.156	6460.7	646.070	1.978	6
14	140	0.062	0.618	36289	3628.900	2.046	6

Tabella 4.61: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 30°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

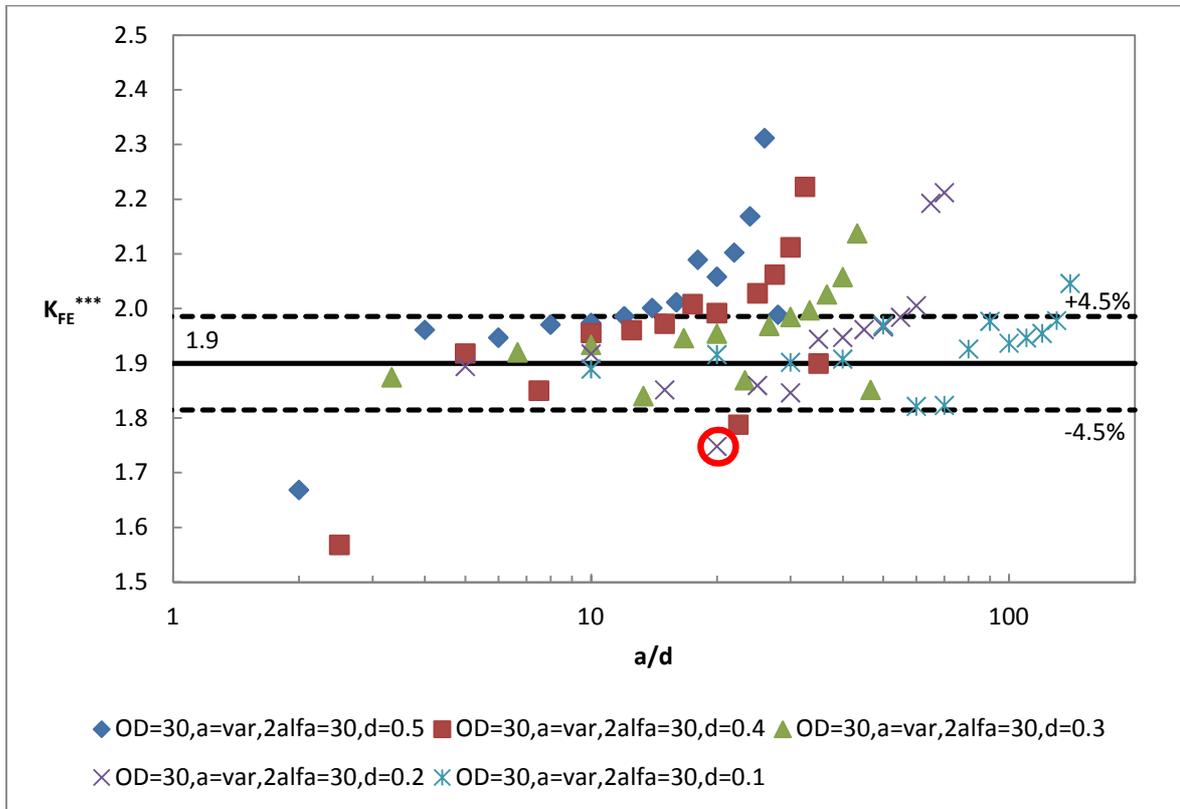


Figura 4.143: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.9; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4.5% rispetto al valore calcolato.

Valgono ancora le considerazioni svolte in precedenza; esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d si ottiene:

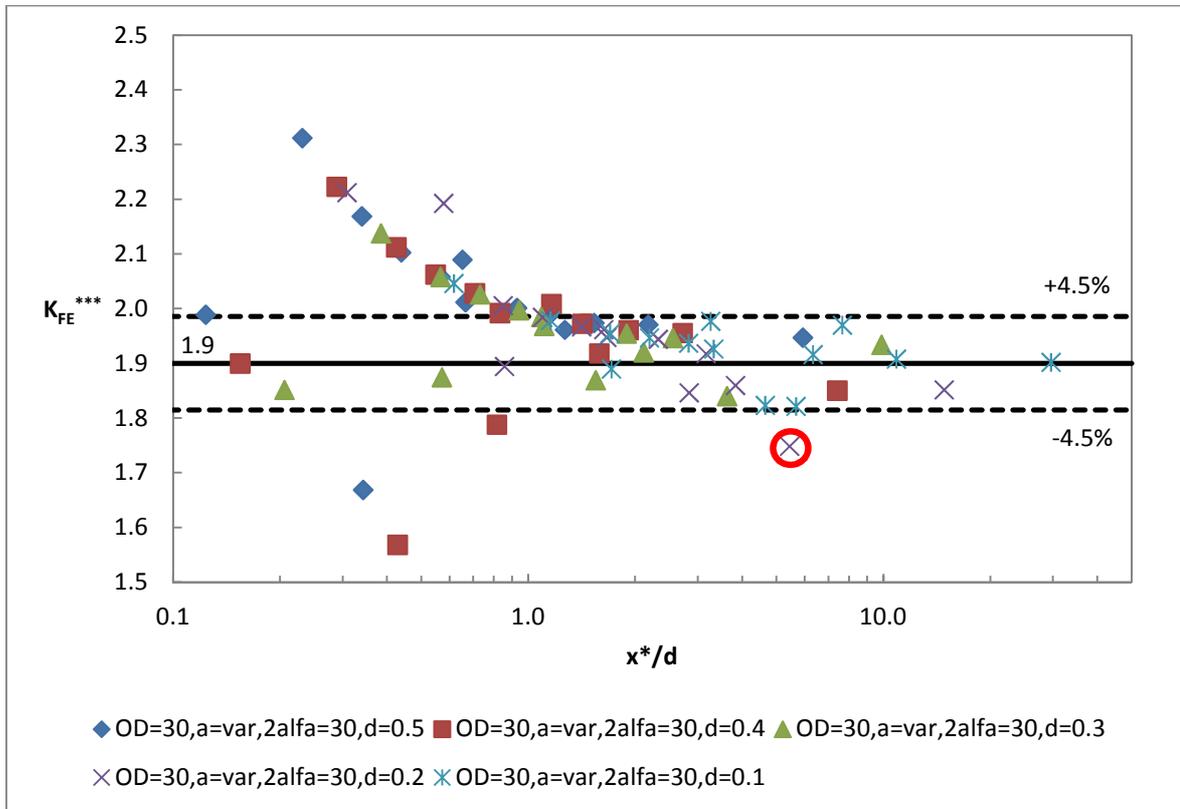


Figura 4.144: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.9; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4.5% rispetto al valore calcolato.

In questo caso è però necessario sottolineare che un punto, segnalato in rosso nelle figure 4.143 e 4.144, nonostante si trovi a convergenza in termini di x^*/d fuoriesce dalla banda d'accettabilità utilizzata; questo perché anche mediante la costruzione dell'areola da 6 elementi esso presenta una layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità diverso dall'ottimale ricercato.

Di seguito si riporta un'immagine della mesh in esame:

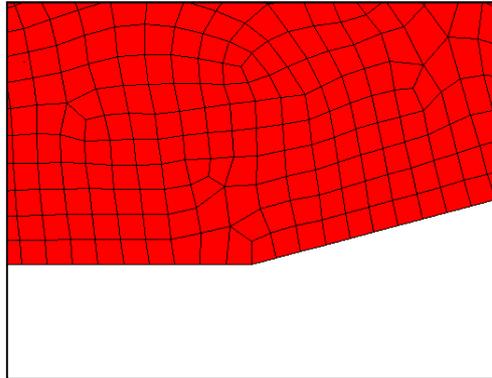


Figura 4.145: Immagine della mesh eccessivamente distorta rispetto alla configurazione desiderata. Nei diagrammi del K_{FE}^{***} il risultato relativo a questa mesh è indicato in rosso.

Il punto suddetto è quindi eliminato dall'analisi dei risultati.

Si osserva quindi che è possibile definire un valore di riferimento pari a 1.9; assumendo delle bande di convergenza di ampiezza pari al 4.5% dello stesso tutti i dati rientrano in tali bande a partire da un:

$$\frac{x^*}{d} \geq 1.3 \quad (4.10)$$

Si osserva quindi che, a meno del punto eliminato dall'analisi dei risultati evidenziato in figura, la convergenza è ripristinata grazie a questo cambiamento nella definizione del criterio di convergenza.

Confrontando quanto ottenuto in questa sede nel caso d'angolo d'apertura di 30° con quanto ottenuto con l'ausilio di una mesh non controllata si osserva che:

- il valore medio di convergenza è aumentato e risulta più vicino a quello suggerito in letteratura [4] pari a 1.93;
- Il limite di convergenza in x^*/d è sceso da 3 a 1.3;
- Le bande di dispersione sono accresciute dal 3% al 4.5%.

4.3.5.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 45°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.209	0.417	16.314	1.631	1.851	4
2	4	1.242	2.483	22.754	2.275	1.949	6
3	6	1.911	3.822	29.966	2.997	1.983	6
4	8	0.475	0.950	38.763	3.876	1.998	6
5	10	0.608	1.216	50.348	5.035	2.007	6
6	12	0.476	0.952	67.513	6.751	1.990	6
7	14	0.355	0.709	89.943	8.994	2.037	6
8	16	0.318	0.636	126.35	12.635	2.049	6
9	18	0.270	0.541	186.19	18.619	2.067	6
10	20	0.253	0.507	292.82	29.282	2.103	6
11	22	0.203	0.406	510.79	51.079	2.139	6
12	24	0.151	0.302	1053.9	105.390	2.168	6
13	26	0.107	0.214	2727.3	272.730	2.366	5
14	28	0.053	0.106	12517	1251.700	3.071	2

Tabella 4.62: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.209	0.522	17.145	1.715	1.938	5
2	5	1.242	3.104	25.005	2.501	1.952	6
3	7.5	1.911	4.778	33.026	3.303	1.979	6
4	10	0.475	1.188	42.814	4.281	1.991	6
5	12.5	0.608	1.520	55.678	5.568	1.997	6
6	15	0.476	1.190	73.554	7.355	2.010	6
7	17.5	0.355	0.887	99.707	9.971	2.022	6
8	20	0.318	0.795	140.49	14.049	2.028	6
9	22.5	0.270	0.676	207.01	20.701	2.045	6
10	25	0.253	0.634	327.47	32.747	2.069	6
11	27.5	0.203	0.508	583.39	58.339	2.061	6
12	30	0.151	0.377	1166.5	116.650	2.155	6
13	32.5	0.107	0.268	3132.9	313.290	2.267	6
14	35	0.053	0.133	17289	1728.900	2.446	3

Tabella 4.63: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.209	0.696	19.742	1.974	1.904	6
2	6.666666667	1.242	4.139	29.668	2.967	1.861	6
3	10	1.911	6.371	37.53	3.753	1.970	6
4	13.33333333	0.475	1.583	48.83	4.883	1.974	6
5	16.66666667	0.608	2.027	63.45	6.345	1.982	6
6	20	0.476	1.586	85.1	8.510	1.965	6
7	23.33333333	0.355	1.182	114.17	11.417	1.997	6
8	26.66666667	0.318	1.060	162.65	16.265	1.981	6
9	30	0.270	0.902	237.33	23.733	2.018	6
10	33.33333333	0.253	0.845	376.45	37.645	2.036	6
11	36.66666667	0.203	0.677	669.59	66.959	2.031	6
12	40	0.151	0.503	1375.7	137.570	2.067	6
13	43.33333333	0.107	0.357	3704	370.400	2.169	6
14	46.66666667	0.053	0.177	19780	1978.000	2.419	4

Tabella 4.64: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.209	1.043	23.334	2.333	1.917	6
2	10	1.242	6.208	33.776	3.378	1.944	6
3	15	1.911	9.556	44.861	4.486	1.961	6
4	20	0.475	2.375	58.341	5.834	1.966	6
5	25	0.608	3.041	76.06	7.606	1.967	6
6	30	0.476	2.379	100.71	10.071	1.975	6
7	35	0.355	1.773	137.17	13.717	1.978	6
8	40	0.318	1.590	192.99	19.299	1.987	6
9	45	0.270	1.352	286.19	28.619	1.991	6
10	50	0.253	1.267	456.19	45.619	1.999	6
11	55	0.203	1.015	801.61	80.161	2.018	6
12	60	0.151	0.754	1661.5	166.150	2.036	6
13	65	0.107	0.535	4850.5	485.050	1.970	6
14	70	0.053	0.265	25063	2506.300	2.271	6

Tabella 4.65: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.209	2.087	31.222	3.122	1.928	6
2	20	1.242	12.416	45.63	4.563	1.937	6
3	30	1.911	19.112	64.196	6.420	1.845	6
4	40	0.475	4.750	79.027	7.903	1.954	6
5	50	0.608	6.082	108.05	10.805	1.864	6
6	60	0.476	4.759	136.93	13.693	1.955	6
7	70	0.355	3.546	186.08	18.608	1.962	6
8	80	0.318	3.179	263.31	26.331	1.960	6
9	90	0.270	2.705	391.2	39.120	1.961	6
10	100	0.253	2.534	622.59	62.259	1.971	6
11	110	0.203	2.030	1116.2	111.620	1.951	6
12	120	0.151	1.508	2291.5	229.150	1.987	6
13	130	0.107	1.070	6423.5	642.350	2.003	6
14	140	0.053	0.531	36675	3667.500	2.089	6

Tabella 4.66: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 45°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

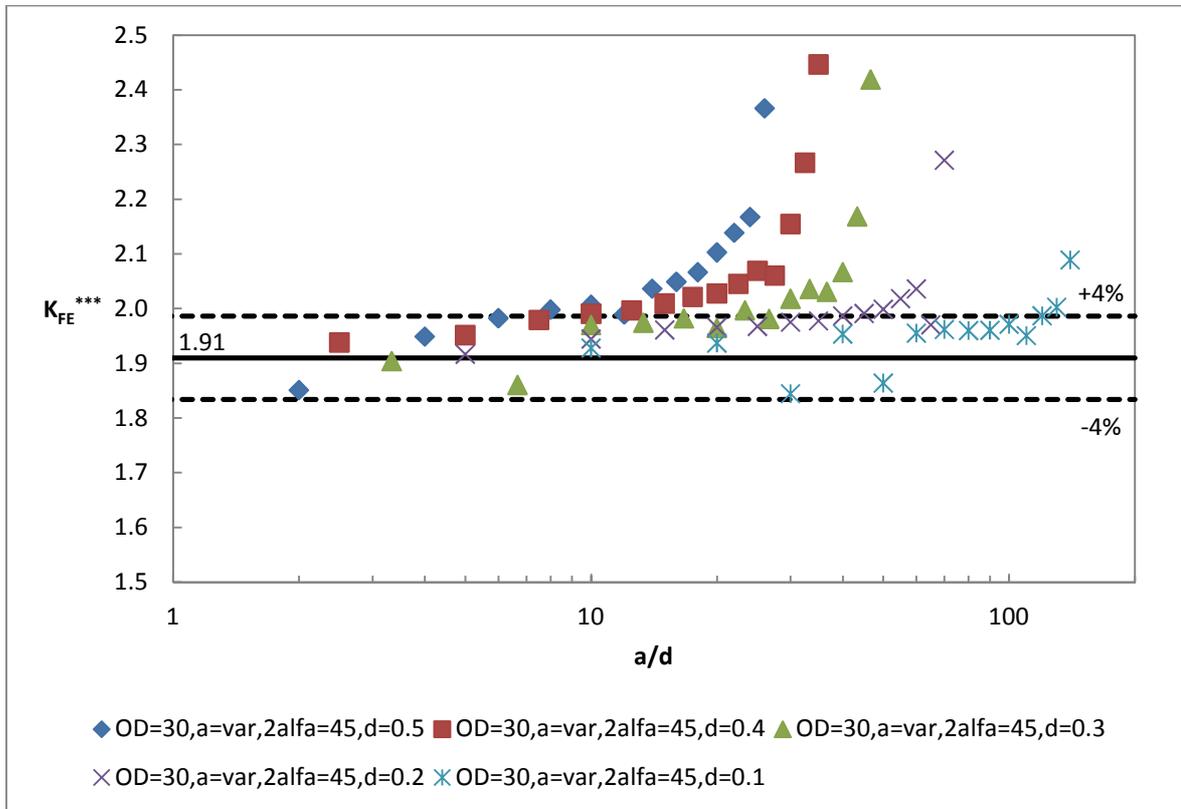


Figura 4.146: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d si ha:

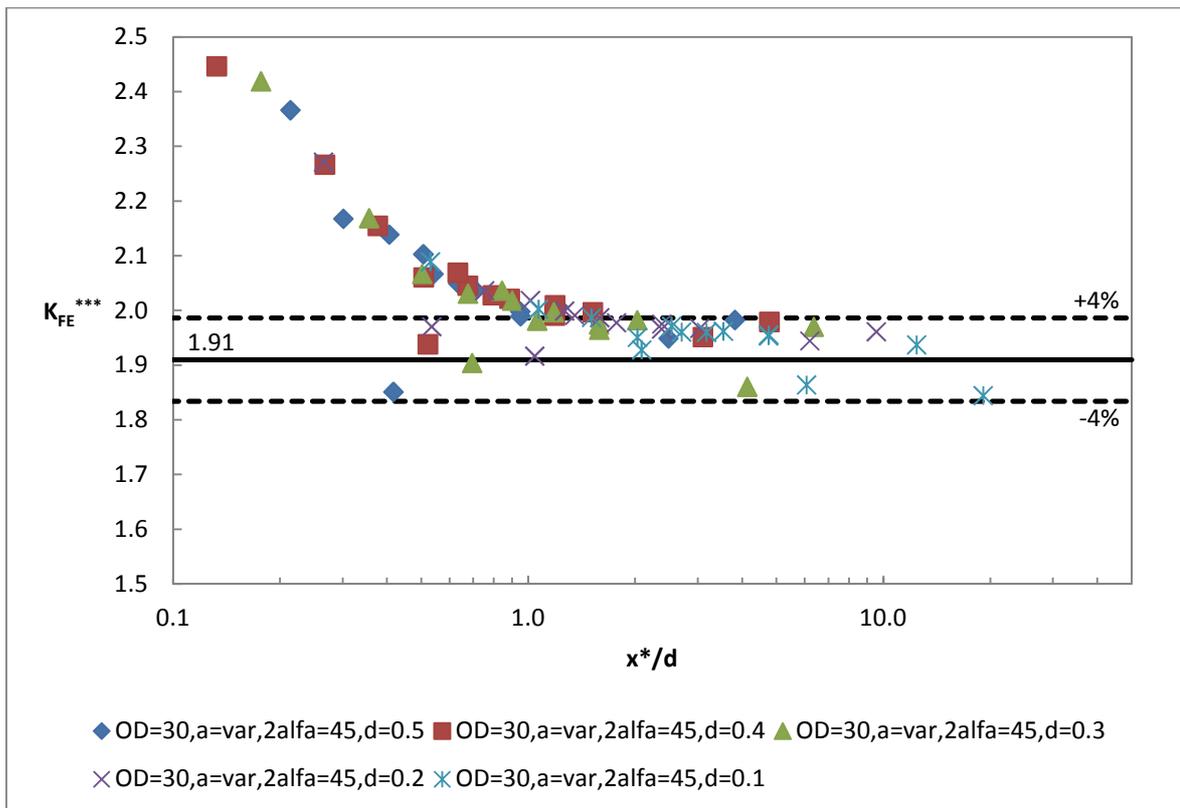


Figura 4.147: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è assunto un valore di riferimento pari a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4% rispetto al valore calcolato.

Ancora una volta la convergenza del metodo è ripristinata grazie alla nuova definizione; in questo caso essa è assicurata per valori di $x^*/d \geq 1.7$ circa, previo l'utilizzo di un valore di riferimento pari a 1.91 e delle bande d'accettabilità di ampiezza pari al 4% dello stesso.

Si osserva inoltre che:

- Il valore di riferimento assunto è più vicino a quello proposto in letteratura [4], pari a 1.93, rispetto a quello ottenuto dalle analisi con mesh non controllata;
- Le bande di convergenza sono diminuite in ampiezza rispetto a quanto ricavato nel caso di mesh non controllata, passando dal 7% al 4%;
- Anche il valore limite di convergenza del parametro x^*/d è diminuito rispetto al caso di mesh non controllata.

4.3.5.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 60°

Nel caso di angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°, come premesso, l'utilizzo del metodo di controllo con areola di 6x6 elementi non fornisce buoni risultati a causa del fatto che, per questo specifico angolo d'apertura, questa dimensione dell'areola non permette di ottenere il layout della mesh desiderato. Si è infatti ricavato che l'unica dimensione accettabile è una 4x4, ma che purtroppo quest'ultima non è adatta per tutti gli altri angoli d'apertura.

Si riportano ugualmente i risultati ottenuti nel caso d'areola 6x6 elementi per dimostrare quanto affermato, salvo poi riportare anche i dati relativi all'utilizzo di un'areola di 4x4 elementi.

In questo caso quindi l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.304	0.607	16.601	1.660	1.906	4
2	4	4.208	8.416	23.014	2.301	1.987	6
3	6	1.095	2.190	30.323	3.032	1.998	6
4	8	0.666	1.332	36.077	3.608	2.177	6
5	10	0.510	1.020	50.765	5.077	2.020	6
6	12	0.414	0.828	66.723	6.672	2.042	6
7	14	0.383	0.767	83.556	8.356	2.222	6
8	16	0.333	0.666	117.87	11.787	2.234	6
9	18	0.291	0.581	173.63	17.363	2.262	6
10	20	0.243	0.487	272.98	27.298	2.313	6
11	22	0.193	0.387	479.61	47.961	2.351	6
12	24	0.139	0.279	974.58	97.458	2.444	6
13	26	0.100	0.200	2973.9	297.390	2.295	5
14	28	0.050	0.100	13237	1323.700	3.119	2

Tabella 4.67: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.304	0.759	20.644	2.064	1.676	5
2	5	4.208	10.520	23.537	2.354	2.124	6
3	7.5	1.095	2.738	30.793	3.079	2.151	6
4	10	0.666	1.665	39.728	3.973	2.161	6
5	12.5	0.510	1.275	51.557	5.156	2.175	6
6	15	0.414	1.034	73.924	7.392	2.015	6
7	17.5	0.383	0.959	92.401	9.240	2.197	6
8	20	0.333	0.833	130.12	13.012	2.212	6
9	22.5	0.291	0.727	192.73	19.273	2.228	6
10	25	0.243	0.609	306	30.600	2.256	6
11	27.5	0.193	0.484	536.54	53.654	2.298	6
12	30	0.139	0.348	1208.4	120.840	2.155	6
13	32.5	0.100	0.250	2962.2	296.220	2.520	6
14	35	0.050	0.125	22038	2203.800	2.048	3

Tabella 4.68: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.304	1.012	18.773	1.877	2.068	6
2	6.666666667	4.208	14.027	32.494	3.249	1.726	6
3	10	1.095	3.650	42.864	4.286	1.734	6
4	13.33333333	0.666	2.220	44.895	4.490	2.146	6
5	16.66666667	0.510	1.700	72.331	7.233	1.739	6
6	20	0.414	1.379	77.434	7.743	2.158	6
7	23.33333333	0.383	1.278	130.43	13.043	1.746	6
8	26.66666667	0.333	1.110	184.42	18.442	1.751	6
9	30	0.291	0.969	274.47	27.447	1.756	6
10	33.33333333	0.243	0.812	438.53	43.853	1.766	6
11	36.66666667	0.193	0.645	776.71	77.671	1.781	6
12	40	0.139	0.464	1271.8	127.180	2.298	6
13	43.33333333	0.100	0.333	3483.4	348.340	2.404	6
14	46.66666667	0.050	0.167	20748	2074.800	2.441	4

Tabella 4.69: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.304	1.518	23.534	2.353	1.940	6
2	10	4.208	21.041	31.208	3.121	2.114	6
3	15	1.095	5.475	41.089	4.109	2.127	6
4	20	0.666	3.329	53.388	5.339	2.122	6
5	25	0.510	2.550	69.232	6.923	2.137	6
6	30	0.414	2.069	91.658	9.166	2.144	6
7	35	0.383	1.917	124.75	12.475	2.147	6
8	40	0.333	1.665	176.32	17.632	2.154	6
9	45	0.291	1.454	262.31	26.231	2.160	6
10	50	0.243	1.217	418.87	41.887	2.175	6
11	55	0.193	0.967	741.44	74.144	2.194	6
12	60	0.139	0.696	1542.9	154.290	2.228	6
13	65	0.100	0.500	4293.6	429.360	2.294	6
14	70	0.050	0.251	26506	2650.600	2.247	6

Tabella 4.70: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.304	3.037	28.832	2.883	2.089	6
2	20	4.208	42.081	41.319	4.132	2.106	6
3	30	1.095	10.950	54.545	5.455	2.114	6
4	40	0.666	6.659	70.738	7.074	2.113	6
5	50	0.510	5.100	99.569	9.957	1.961	6
6	60	0.414	4.138	122.66	12.266	2.114	6
7	70	0.383	3.834	166.52	16.652	2.122	6
8	80	0.333	3.330	235.79	23.579	2.126	6
9	90	0.291	2.907	351.58	35.158	2.127	6
10	100	0.243	2.435	606.84	60.684	1.981	6
11	110	0.193	1.935	1001.5	100.150	2.143	6
12	120	0.139	1.393	2099.3	209.930	2.160	6
13	130	0.100	0.999	5931.8	593.180	2.191	6
14	140	0.050	0.502	34496	3449.600	2.278	6

Tabella 4.71: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

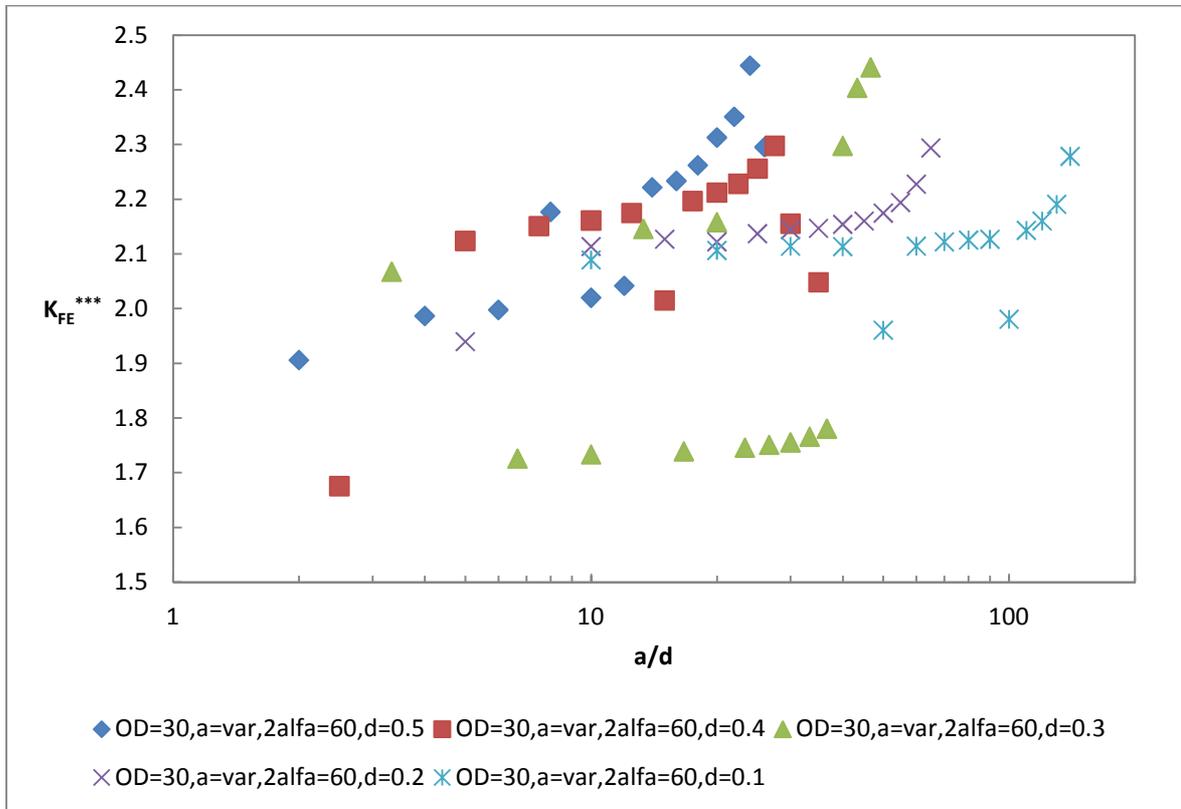


Figura 4.148: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; in questo caso non è stato possibile determinare il valore di riferimento numerico e le bande d'accettabilità data l'elevata dispersione dei risultati.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d si ha:

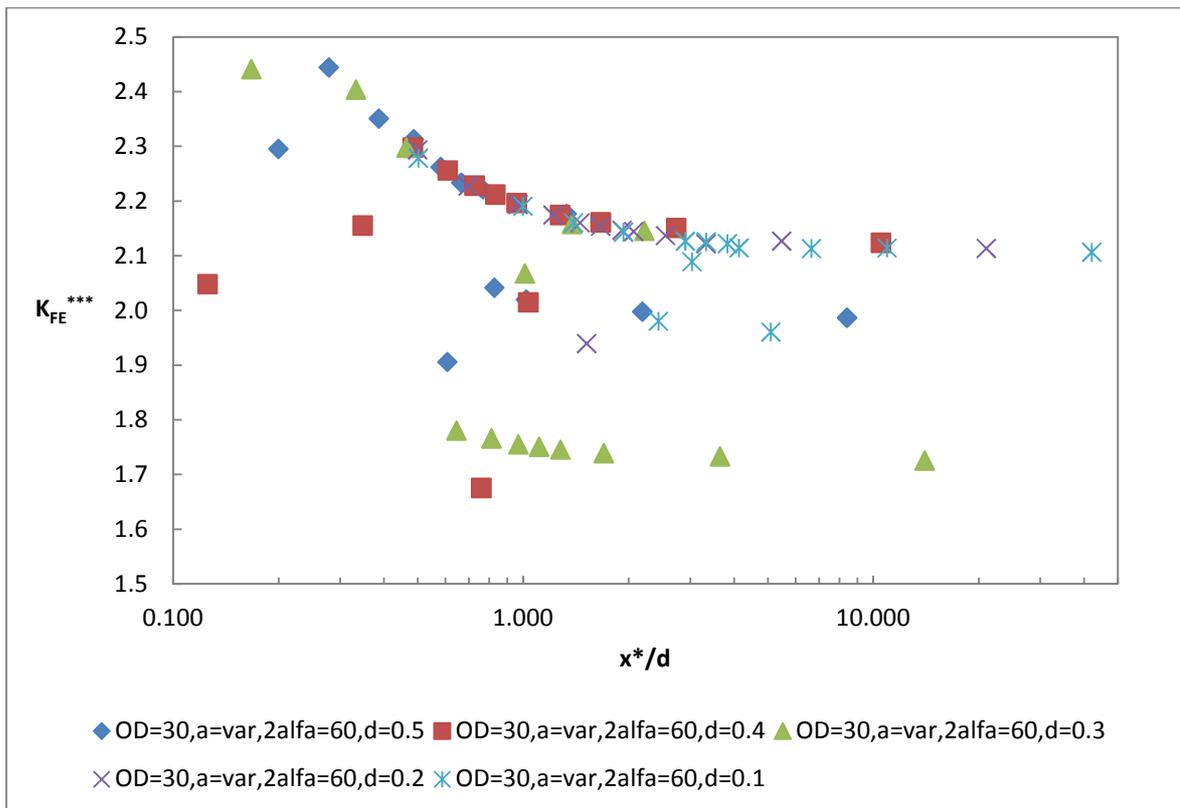


Figura 4.149: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93; in questo caso non è stato possibile determinare il valore di riferimento numerico e le bande d'accettabilità data l'elevata dispersione dei risultati.

Si osserva perciò che in questo caso l'utilizzo dell'areola da 6x6 elementi non fornisce risultati coerenti con quanto atteso; ciò è imputabile al fatto che con questa dimensione l'areola guida il meshatore in maniera errata nella creazione della mesh.

Tutto è confermato dal layout delle mesh ottenute in generale mediante questo approccio:

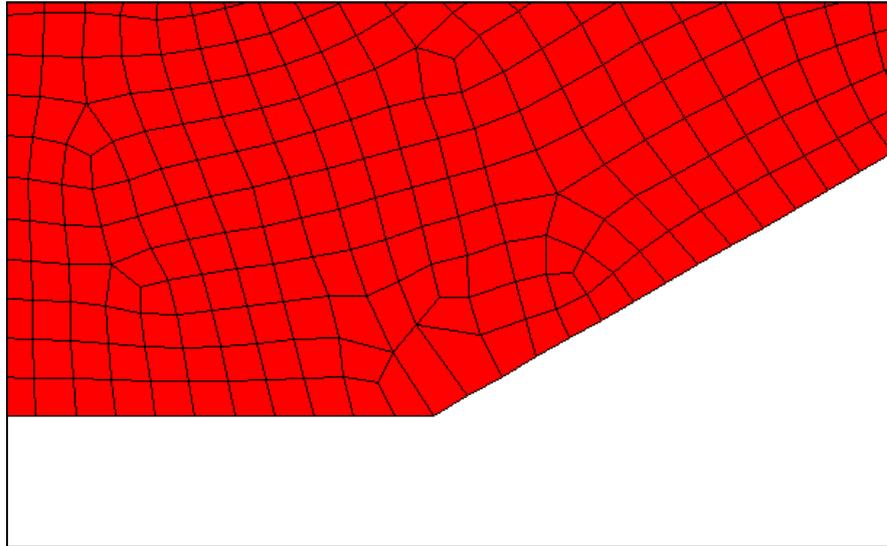


Figura 4.150: Immagine di una mesh ottenuta applicando il PSM tramite l'utilizzo di un'areola 6x6 elementi nel caso d'angolo d'apertura pari a 60°.

Come premesso questo layout non è compatibile con quello desiderato; piccole variazioni sulla dimensione d'elemento o dell'areola non provocano alcuna modifica sulla mesh in esame. Per questo motivo sono state analizzate altre dimensioni dell'areola, sensibilmente differenti, con lo scopo di trovare quella che possa fornire un layout di mesh più aderente possibile a quello desiderato.

Si tratta ora il caso d'areola di 4x4 elementi che, come premesso, permette di ottenere risultati coerenti con quelli attesi poiché ripristina il layout della mesh desiderato.

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 4x4 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.304	0.607	16.602	1.660	1.906	4
2	4	4.208	8.416	23.296	2.330	1.963	4
3	6	1.095	2.190	30.537	3.054	1.984	4
4	8	0.666	1.332	39.502	3.950	1.988	4
5	10	0.510	1.020	51.286	5.129	2.000	4
6	12	0.414	0.828	67.594	6.759	2.015	4
7	14	0.383	0.767	91.694	9.169	2.025	4
8	16	0.333	0.666	128.76	12.876	2.045	4
9	18	0.291	0.581	190.59	19.059	2.061	4
10	20	0.243	0.487	302.32	30.232	2.088	4
11	22	0.193	0.387	530.74	53.074	2.124	4
12	24	0.139	0.279	1081.3	108.130	2.203	4
13	26	0.100	0.200	2909	290.900	2.347	4
14	28	0.050	0.100	13236	1323.600	3.119	2

Tabella 4.72: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.304	0.759	18.125	1.813	1.909	4
2	5	4.208	10.520	25.489	2.549	1.961	4
3	7.5	1.095	2.738	33.55	3.355	1.974	4
4	10	0.666	1.665	43.471	4.347	1.975	4
5	12.5	0.510	1.275	56.37	5.637	1.989	4
6	15	0.414	1.034	74.689	7.469	1.994	4
7	17.5	0.383	0.959	101.38	10.138	2.002	4
8	20	0.333	0.833	142.79	14.279	2.016	4
9	22.5	0.291	0.727	211.75	21.175	2.028	4
10	25	0.243	0.609	336.74	33.674	2.050	4
11	27.5	0.193	0.484	594.81	59.481	2.073	4
12	30	0.139	0.348	1220.6	122.060	2.134	4
13	32.5	0.100	0.250	3313.2	331.320	2.253	4
14	35	0.050	0.125	22036	2203.600	2.049	3

Tabella 4.73: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.304	1.012	20.236	2.024	1.918	4
2	6.666666667	4.208	14.027	28.764	2.876	1.950	4
3	10	1.095	3.650	37.885	3.789	1.962	4
4	13.33333333	0.666	2.220	49.186	4.919	1.959	4
5	16.66666667	0.510	1.700	63.734	6.373	1.974	4
6	20	0.414	1.379	84.137	8.414	1.986	4
7	23.33333333	0.383	1.278	115.23	11.523	1.976	4
8	26.66666667	0.333	1.110	161.57	16.157	1.999	4
9	30	0.291	0.969	240.08	24.008	2.007	4
10	33.33333333	0.243	0.812	382.79	38.279	2.023	4
11	36.66666667	0.193	0.645	675.6	67.560	2.047	4
12	40	0.139	0.464	1399.9	139.990	2.088	4
13	43.33333333	0.100	0.333	3858.3	385.830	2.170	4
14	46.66666667	0.050	0.167	20716	2071.600	2.445	4

Tabella 4.74: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.304	1.518	23.724	2.372	1.924	4
2	10	4.208	21.041	34.058	3.406	1.937	4
3	15	1.095	5.475	44.739	4.474	1.953	4
4	20	0.666	3.329	58.224	5.822	1.946	4
5	25	0.510	2.550	75.34	7.534	1.964	4
6	30	0.414	2.069	100.23	10.023	1.961	4
7	35	0.383	1.917	136.04	13.604	1.969	4
8	40	0.333	1.665	193.42	19.342	1.964	4
9	45	0.291	1.454	287.97	28.797	1.968	4
10	50	0.243	1.217	459.44	45.944	1.983	4
11	55	0.193	0.967	812.88	81.288	2.001	4
12	60	0.139	0.696	1694.9	169.490	2.028	4
13	65	0.100	0.500	4737.5	473.750	2.079	4
14	70	0.050	0.251	26506	2650.600	2.247	4

Tabella 4.75: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.304	3.037	31.268	3.127	1.926	4
2	20	4.208	42.081	44.875	4.488	1.940	4
3	30	1.095	10.950	59.36	5.936	1.943	4
4	40	0.666	6.659	77.159	7.716	1.937	4
5	50	0.510	5.100	100.58	10.058	1.941	4
6	60	0.414	4.138	133.7	13.370	1.940	4
7	70	0.383	3.834	182.28	18.228	1.939	4
8	80	0.333	3.330	257.56	25.756	1.946	4
9	90	0.291	2.907	384.18	38.418	1.946	4
10	100	0.243	2.435	615.75	61.575	1.952	4
11	110	0.193	1.935	1095.8	109.580	1.959	4
12	120	0.139	1.393	2295.5	229.550	1.976	4
13	130	0.100	0.999	6529.2	652.920	1.990	4
14	140	0.050	0.502	37869	3786.900	2.075	4

Tabella 4.76: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 60°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

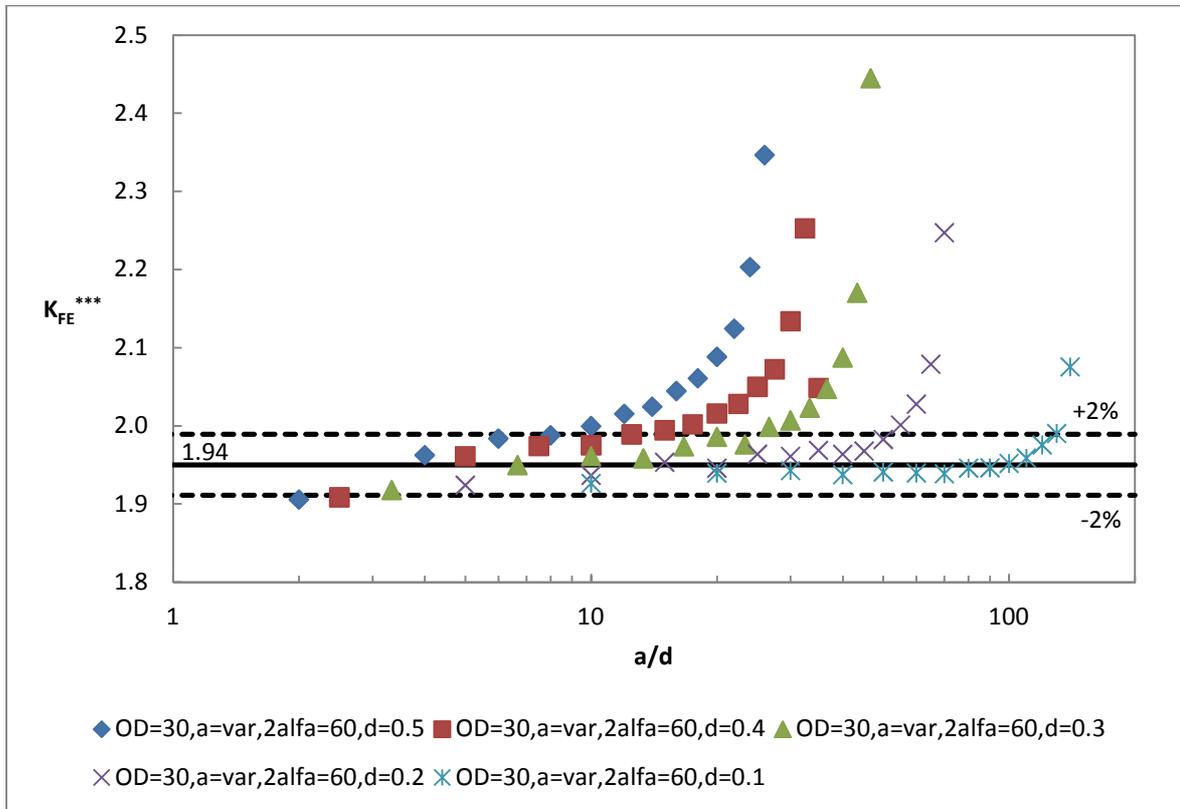


Figura 4.151: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 1.95; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Si noti come i risultati assumono valori che si discostano poco dalla curva ideale attesa.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d si ha:

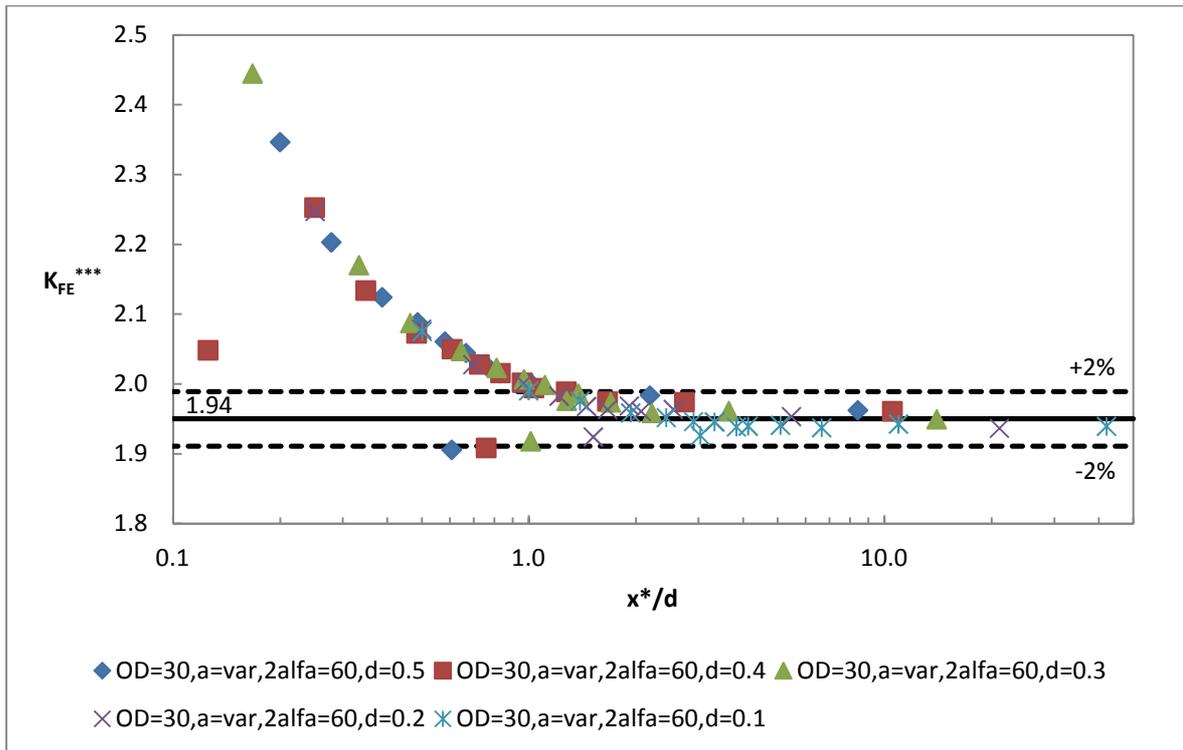


Figura 4.152: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento di 1.95; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Si osserva quindi che anche in questo caso la convergenza del metodo è ristabilita grazie a questo nuovo criterio di convergenza in x^*/d , previa l'accettazione di:

- Un valore di riferimento pari a 1.94;
- Delle bande di dispersione di ampiezza pari al 2% del valore di riferimento.

Le differenze riscontrate nel caso di mesh controllata con areola rispetto al caso di mesh non controllata sono:

- Il valore di riferimento calcolato in questo caso, pari a 1.94, è più aderente a quello espresso in letteratura [4] che è pari a 1.93;
- Le bande di dispersione hanno ampiezza del 2% del valore di riferimento, inferiore a quanto riscontrato nel caso con mesh non controllata dove si aveva un 6%;
- Il limite di convergenza in x^*/d rimane pressoché simile e in questo caso è pari a 1.5.

4.3.5.3.5 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	1.210	2.420	18.923	1.892	1.808	5
2	4	1.115	2.230	24.877	2.488	1.912	6
3	6	0.650	1.300	32.286	3.229	1.915	6
4	8	0.512	1.024	41.424	4.142	1.923	6
5	10	0.442	0.883	53.732	5.373	1.928	6
6	12	0.373	0.746	71.397	7.140	1.934	6
7	14	0.332	0.664	97.282	9.728	1.944	6
8	16	0.312	0.623	125.28	12.528	2.159	6
9	18	0.271	0.541	207.54	20.754	1.964	6
10	20	0.224	0.449	334.36	33.436	1.981	6
11	22	0.184	0.367	611.87	61.187	1.959	6
12	24	0.129	0.257	1286.7	128.670	2.009	6
13	26	0.094	0.187	2422.9	242.290	3.138	4
14	28	0.046	0.092	14842	1484.200	3.244	2

Tabella 4.77: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	1.210	3.025	19.542	1.954	1.886	6
2	5	1.115	2.787	26.896	2.690	1.905	6
3	7.5	0.650	1.625	34.951	3.495	1.905	6
4	10	0.512	1.281	45.017	4.502	1.906	6
5	12.5	0.442	1.104	58.365	5.837	1.912	6
6	15	0.373	0.933	77.584	7.758	1.917	6
7	17.5	0.332	0.830	105.85	10.585	1.925	6
8	20	0.312	0.779	150.57	15.057	1.935	6
9	22.5	0.271	0.677	226.32	22.632	1.941	6
10	25	0.224	0.561	364.32	36.432	1.958	6
11	27.5	0.184	0.459	652.49	65.249	1.979	6
12	30	0.129	0.321	1376.6	137.660	2.022	6
13	32.5	0.094	0.234	3396.9	339.690	2.411	5
14	35	0.046	0.115	17590	1759.000	2.949	2

Tabella 4.78: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	1.210	4.033	21.542	2.154	1.883	6
2	6.666666667	1.115	3.716	29.888	2.989	1.887	6
3	10	0.650	2.167	38.654	3.865	1.896	6
4	13.33333333	0.512	1.707	49.72	4.972	1.900	6
5	16.66666667	0.442	1.472	64.629	6.463	1.901	6
6	20	0.373	1.243	85.797	8.580	1.908	6
7	23.33333333	0.332	1.106	117.27	11.727	1.912	6
8	26.66666667	0.312	1.039	167.17	16.717	1.918	6
9	30	0.271	0.902	251.13	25.113	1.925	6
10	33.33333333	0.224	0.748	406.36	40.636	1.932	6
11	36.66666667	0.184	0.612	727.48	72.748	1.953	6
12	40	0.129	0.428	1547.9	154.790	1.980	6
13	43.33333333	0.094	0.312	4421.4	442.140	2.039	6
14	46.66666667	0.046	0.153	17376	1737.600	3.286	3

Tabella 4.79: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	1.210	6.050	24.762	2.476	1.875	6
2	10	1.115	5.574	31.305	3.131	2.062	6
3	15	0.650	3.250	44.46	4.446	1.887	6
4	20	0.512	2.561	57.225	5.723	1.890	6
5	25	0.442	2.208	74.336	7.434	1.892	6
6	30	0.373	1.865	99.053	9.905	1.892	6
7	35	0.332	1.660	135.4	13.540	1.896	6
8	40	0.312	1.558	192.62	19.262	1.905	6
9	45	0.271	1.354	290.95	29.095	1.902	6
10	50	0.224	1.122	470.36	47.036	1.911	6
11	55	0.184	0.918	847.65	84.765	1.919	6
12	60	0.129	0.643	1810.7	181.070	1.937	6
13	65	0.094	0.468	5232.2	523.220	1.972	6
14	70	0.046	0.229	32835	3283.500	1.990	5

Tabella 4.80: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	1.210	39.706	31.281	3.128	1.870	6
2	20	1.115	56.286	39.706	3.971	2.049	6
3	30	0.650	72.494	56.286	5.629	1.878	6
4	40	0.512	94.348	72.494	7.249	1.879	6
5	50	0.442	125.17	94.348	9.435	1.878	6
6	60	0.373	174.53	125.17	12.517	1.886	6
7	70	0.332	245.76	174.53	17.453	1.853	6
8	80	0.312	369.63	245.76	24.576	1.882	6
9	90	0.271	599.91	369.63	36.963	1.886	6
10	100	0.224	1082.9	599.91	59.991	1.888	6
11	110	0.184	2327.8	1082.9	108.290	1.892	6
12	120	0.129	6781.5	2327.8	232.780	1.899	6
13	130	0.094	41857	6781.5	678.150	1.917	6
14	140	0.046	0.458	41857	4185.700	1.967	6

Tabella 4.81: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

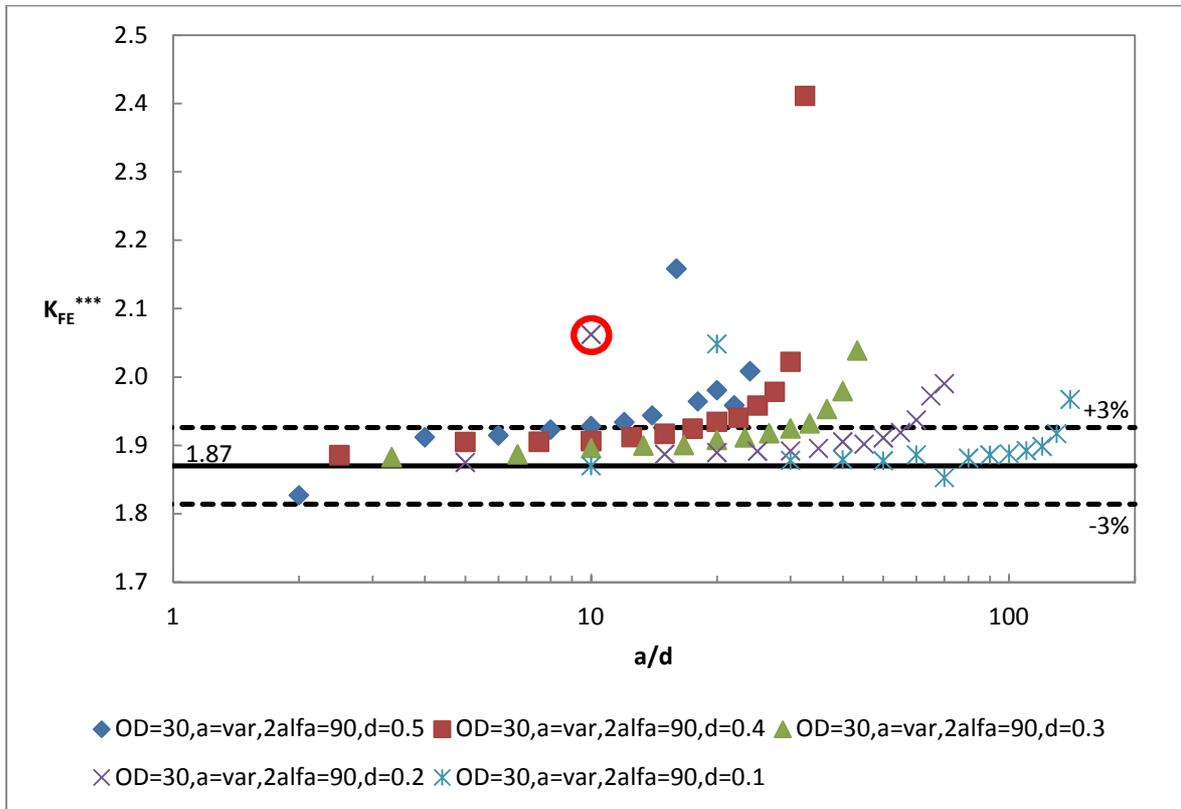


Figura 4.153: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.87; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo i risultati in termini di x^*/d si ottiene quindi:

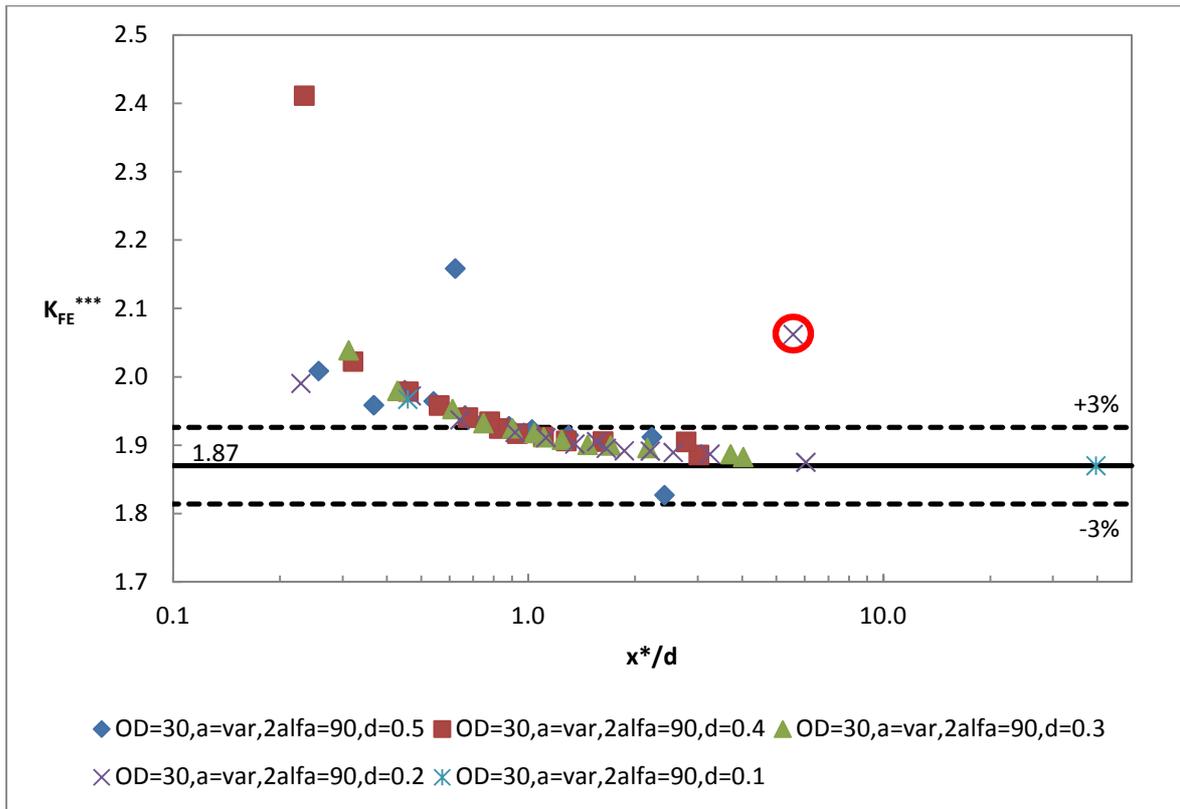


Figura 4.154: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.87; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Anche in questo caso è stato segnalato col colore rosso in entrambe le figure un punto che, nonostante si trovi a convergenza in termini di x^*/d , presenta una mesh non compatibile con le linee guida dettate (vedere figura 1.4). Di seguito si riporta l'immagine della mesh.

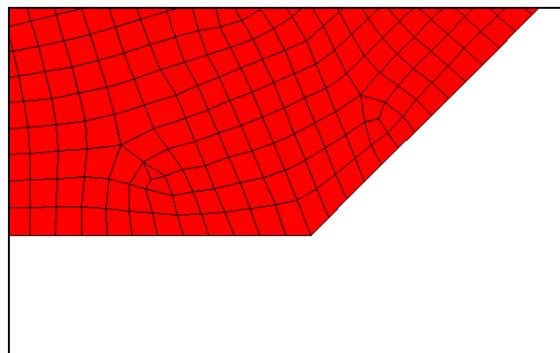


Figura 4.155: Immagine della mesh eccessivamente distorta rispetto alla configurazione desiderata. Nei diagrammi del K_{FE}^{***} il risultato relativo a questa mesh è indicato in rosso.

Eliminato quindi quest'unico valore che, nonostante la presenza dell'areola, presenta un layout della mesh non desiderato, si osserva che il metodo converge nuovamente se utilizzato in termini di x^*/d .

Come confronto rispetto al caso d'utilizzo di una mesh free si osserva che.

- Il metodo converge ad un valore di riferimento superiore, pari a 1.87, rispetto al caso di mesh non controllata dove si osservava un 1.825;
- Le bande d'accettabilità presentano un'ampiezza pari al 3%, sensibilmente inferiore al 4.5% ricavato nel caso non controllato;
- La convergenza è assicurata per un $x^*/d \geq 1$ all'incirca in entrambi i casi; si noti comunque che questo limite nel caso di mesh non controllata è raggiunto grazie all'ausilio di bande di dispersione più ampie.

4.3.5.3.6 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	1.044	2.088	19.479	1.948	1.884	3
2	4	0.547	1.094	25.848	2.585	1.880	6
3	6	0.553	1.106	33.001	3.300	1.848	6
4	8	0.490	0.979	42.273	4.227	1.848	6
5	10	0.436	0.873	55.089	5.509	1.849	6
6	12	0.406	0.813	73.639	7.364	1.845	6
7	14	0.312	0.623	101.77	10.177	1.881	6
8	16	0.263	0.525	146.8	14.680	1.883	6
9	18	0.223	0.446	224	22.400	1.887	6
10	20	0.191	0.381	369.08	36.908	1.890	6
11	22	0.156	0.311	679.49	67.949	1.896	6
12	24	0.111	0.221	1489.8	148.980	1.904	5
13	26	0.105	0.209	4480.2	448.020	1.882	3
14	28	0.058	0.116	30272	3027.200	1.856	1

Tabella 4.82: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	1.044	2.611	20.625	2.063	1.881	4
2	5	0.547	1.368	27.354	2.735	1.878	6
3	7.5	0.553	1.382	34.92	3.492	1.846	6
4	10	0.490	1.224	44.737	4.474	1.847	6
5	12.5	0.436	1.091	58.303	5.830	1.847	6
6	15	0.406	1.016	77.949	7.795	1.843	6
7	17.5	0.312	0.779	107.74	10.774	1.879	6
8	20	0.263	0.656	155.45	15.545	1.880	6
9	22.5	0.223	0.557	237.29	23.729	1.884	6
10	25	0.191	0.477	391.18	39.118	1.886	6
11	27.5	0.156	0.389	720.85	72.085	1.890	6
12	30	0.111	0.277	1583.2	158.320	1.894	6
13	32.5	0.105	0.261	4778.1	477.810	1.866	4
14	35	0.058	0.145	30964	3096.400	1.919	2

Tabella 4.83: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	1.044	3.481	22.191	2.219	1.879	6
2	6.666666667	0.547	1.824	29.416	2.942	1.877	6
3	10	0.553	1.843	37.55	3.755	1.845	6
4	13.33333333	0.490	1.632	48.108	4.811	1.845	6
5	16.66666667	0.436	1.455	62.702	6.270	1.845	6
6	20	0.406	1.355	83.848	8.385	1.841	6
7	23.33333333	0.312	1.039	115.91	11.591	1.876	6
8	26.66666667	0.263	0.875	167.28	16.728	1.877	6
9	30	0.223	0.743	255.42	25.542	1.881	6
10	33.33333333	0.191	0.636	421.25	42.125	1.882	6
11	36.66666667	0.156	0.518	776.9	77.690	1.884	6
12	40	0.111	0.369	1708.6	170.860	1.886	6
13	43.33333333	0.105	0.349	5174.2	517.420	1.851	6
14	46.66666667	0.058	0.194	33998	3399.800	1.878	3

Tabella 4.84: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	1.044	5.221	24.585	2.459	1.877	6
2	10	0.547	2.736	32.574	3.257	1.876	6
3	15	0.553	2.764	41.584	4.158	1.844	6
4	20	0.490	2.448	53.276	5.328	1.844	6
5	25	0.436	2.182	69.445	6.945	1.844	6
6	30	0.406	2.032	92.866	9.287	1.840	6
7	35	0.312	1.558	128.41	12.841	1.874	6
8	40	0.263	1.313	185.36	18.536	1.875	6
9	45	0.223	1.114	283.12	28.312	1.878	6
10	50	0.191	0.953	467.17	46.717	1.878	6
11	55	0.156	0.778	862.05	86.205	1.879	6
12	60	0.111	0.554	1898.3	189.830	1.879	6
13	65	0.105	0.523	5766.4	576.640	1.839	6
14	70	0.058	0.291	38253	3825.300	1.847	4

Tabella 4.85: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	1.044	10.442	29.26	2.926	1.875	6
2	20	0.547	5.471	38.758	3.876	1.874	6
3	30	0.553	5.528	49.475	4.948	1.843	6
4	40	0.490	4.896	63.389	6.339	1.843	6
5	50	0.436	4.364	82.638	8.264	1.843	6
6	60	0.406	4.064	110.51	11.051	1.838	6
7	70	0.312	3.116	152.83	15.283	1.873	6
8	80	0.263	2.625	220.64	22.064	1.873	6
9	90	0.223	2.229	337.07	33.707	1.876	6
10	100	0.191	1.907	556.41	55.641	1.875	6
11	110	0.156	1.555	1027.4	102.740	1.875	6
12	120	0.111	1.107	2264.8	226.480	1.873	6
13	130	0.105	1.046	6896.3	689.630	1.828	6
14	140	0.058	0.581	46131	4613.100	1.821	6

Tabella 4.86: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

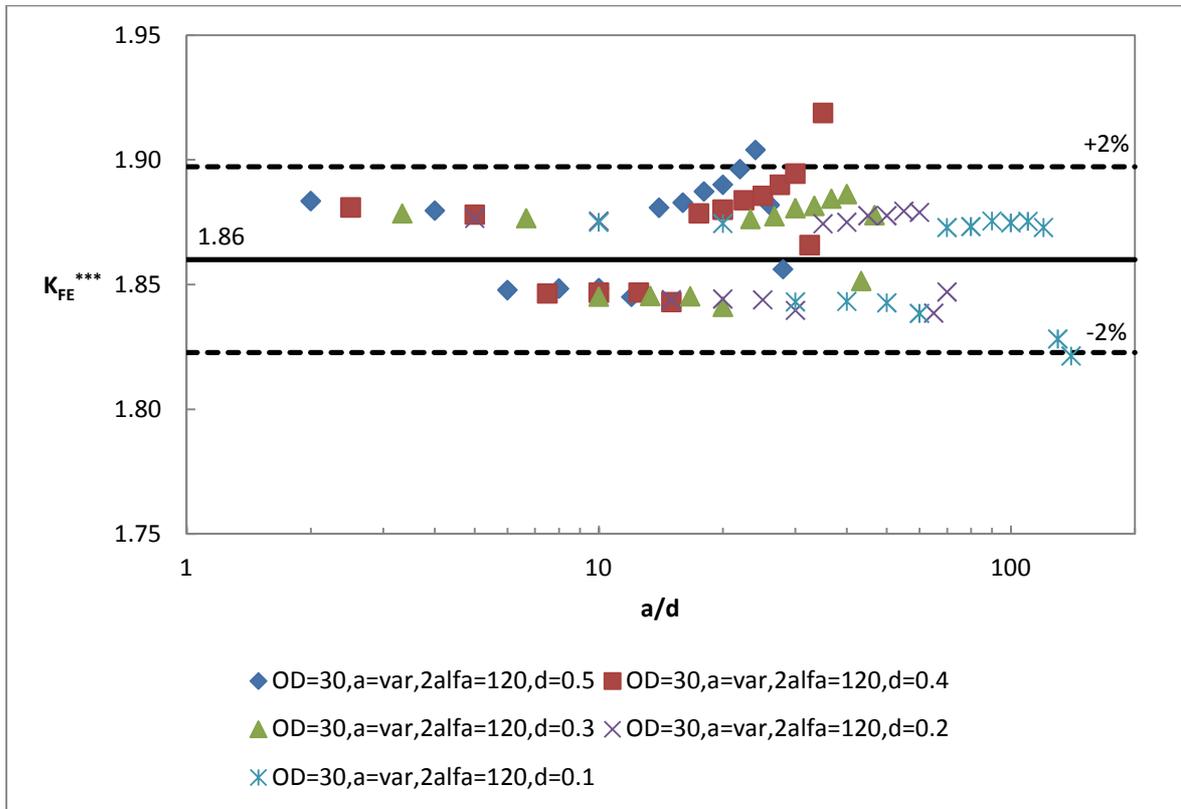


Figura 4.156: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.86; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo i risultati in termini di x^*/d si ottiene quindi:

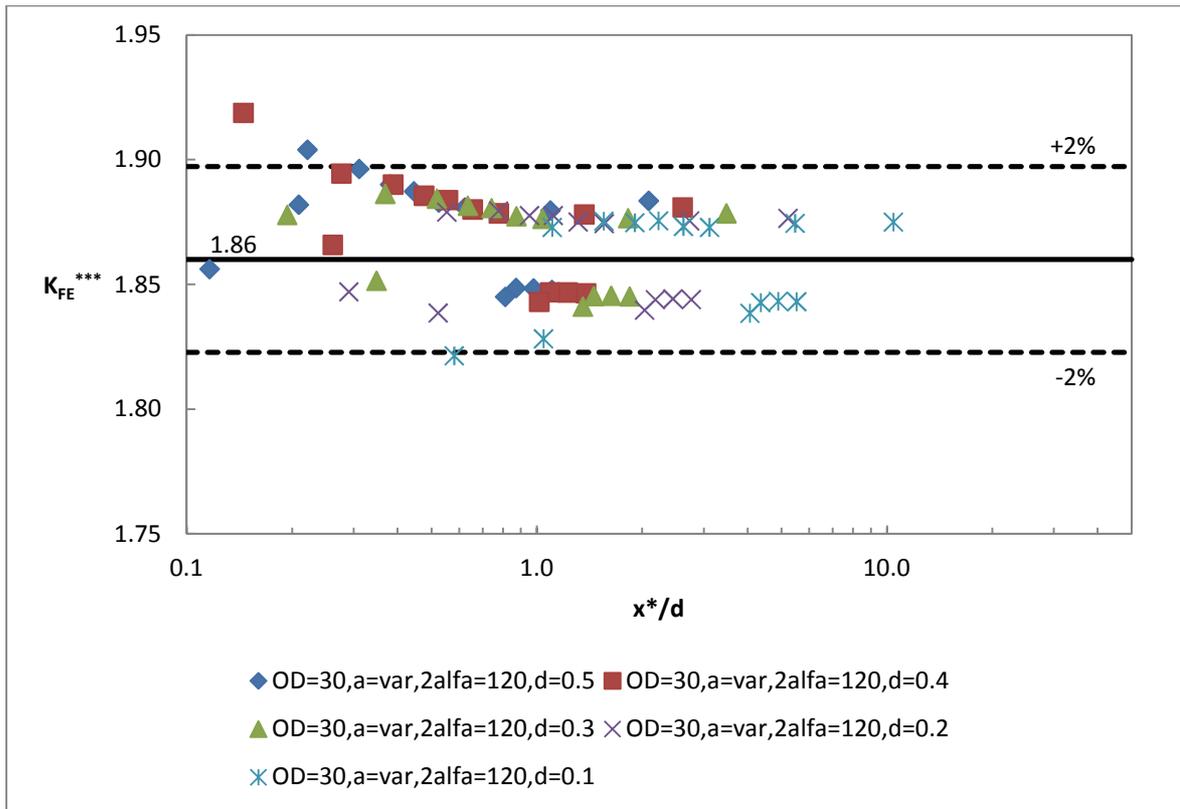


Figura 4.157: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.86; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Anche in questo caso si è ristabilita la convergenza del metodo grazie a questo nuovo criterio; il valore di riferimento ricavato è pari a 1.86 e le bande d'accettabilità hanno ampiezza pari al 2% dello stesso. Le differenze rispetto al caso di utilizzo di una mesh non controllata sono.

- Valore di riferimento più lontano da quello suggerito in letteratura [4] rispetto a quanto ricavato mediante l'utilizzo di una mesh non controllata, dove si aveva un 1.89;
- Ampiezza delle bande d'accettabilità inferiore poiché nel caso di mesh non controllata si ha un 5% del valore di riferimento,

- Valore di convergenza in termini di x^*/d comparabile e assunto pari ad 1; si osservi però che nel caso non controllato questo valore è possibile solamente grazie all'ausilio di bande di convergenza molto più ampie rispetto al caso in esame.

4.3.5.3.7 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.683	1.367	18.408	1.841	1.997	5
2	4	0.536	1.072	23.816	2.382	1.995	6
3	6	0.487	0.974	30.18	3.018	1.995	6
4	8	0.449	0.897	38.641	3.864	1.995	6
5	10	0.399	0.799	50.5	5.050	1.995	6
6	12	0.371	0.742	67.83	6.783	1.996	6
7	14	0.317	0.634	94.306	9.431	1.996	6
8	16	0.278	0.557	137	13.700	1.997	6
9	18	0.242	0.485	210.79	21.079	1.997	6
10	20	0.203	0.405	350.86	35.086	2.000	6
11	22	0.166	0.331	654.25	65.425	2.002	6
12	24	0.120	0.240	1459.2	145.920	2.011	5
13	26	0.081	0.163	4502	450.200	2.026	3
14	28	0.045	0.089	30607	3060.700	2.069	1

Tabella 4.87: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.683	1.709	19.259	1.926	1.996	6
2	5	0.536	1.340	24.909	2.491	1.994	6
3	7.5	0.487	1.217	31.566	3.157	1.995	6
4	10	0.449	1.121	40.413	4.041	1.995	6
5	12.5	0.399	0.998	52.827	5.283	1.994	6
6	15	0.371	0.927	70.956	7.096	1.996	6
7	17.5	0.317	0.792	98.666	9.867	1.995	6
8	20	0.278	0.696	143.35	14.335	1.996	6
9	22.5	0.242	0.606	220.63	22.063	1.995	6
10	25	0.203	0.507	367.34	36.734	1.997	6
11	27.5	0.166	0.414	685.26	68.526	1.999	6
12	30	0.120	0.300	1529.9	152.990	2.005	6
13	32.5	0.081	0.204	4734.8	473.480	2.014	4
14	35	0.045	0.112	32926	3292.600	2.011	2

Tabella 4.88: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.683	2.278	20.409	2.041	1.995	6
2	6.666666667	0.536	1.786	26.391	2.639	1.994	6
3	10	0.487	1.623	33.439	3.344	1.994	6
4	13.33333333	0.449	1.495	42.819	4.282	1.994	6
5	16.66666667	0.399	1.331	55.968	5.597	1.994	6
6	20	0.371	1.236	75.188	7.519	1.995	6
7	23.33333333	0.317	1.056	104.56	10.456	1.994	6
8	26.66666667	0.278	0.928	151.93	15.193	1.995	6
9	30	0.242	0.808	233.88	23.388	1.994	6
10	33.33333333	0.203	0.675	389.49	38.949	1.995	6
11	36.66666667	0.166	0.552	726.97	72.697	1.996	6
12	40	0.120	0.400	1624.3	162.430	2.000	6
13	43.33333333	0.081	0.272	5037.2	503.720	2.006	6
14	46.66666667	0.045	0.149	34560	3456.000	2.030	3

Tabella 4.89: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.683	3.417	22.141	2.214	1.994	6
2	10	0.536	2.680	28.626	2.863	1.993	6
3	15	0.487	2.435	36.268	3.627	1.994	6
4	20	0.449	2.243	46.438	4.644	1.994	6
5	25	0.399	1.996	60.704	6.070	1.994	6
6	30	0.371	1.854	81.55	8.155	1.995	6
7	35	0.317	1.585	113.42	11.342	1.993	6
8	40	0.278	1.392	164.83	16.483	1.994	6
9	45	0.242	1.211	253.77	25.377	1.993	6
10	50	0.203	1.013	422.72	42.272	1.994	6
11	55	0.166	0.828	789.3	78.930	1.994	6
12	60	0.120	0.600	1765.1	176.510	1.996	6
13	65	0.081	0.407	5482.2	548.220	1.999	6
14	70	0.045	0.223	37878	3787.800	2.008	4

Tabella 4.90: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.683	6.835	25.44	2.544	1.994	6
2	20	0.536	5.359	32.882	3.288	1.993	6
3	30	0.487	4.869	41.663	4.166	1.994	6
4	40	0.449	4.486	53.351	5.335	1.994	6
5	50	0.399	3.993	69.729	6.973	1.994	6
6	60	0.371	3.709	93.679	9.368	1.995	6
7	70	0.317	3.169	130.3	13.030	1.993	6
8	80	0.278	2.784	189.37	18.937	1.994	6
9	90	0.242	2.423	291.55	29.155	1.992	6
10	100	0.203	2.026	485.75	48.575	1.993	6
11	110	0.166	1.656	907.29	90.729	1.992	6
12	120	0.120	1.200	2030.2	203.020	1.994	6
13	130	0.081	0.815	6314	631.400	1.993	6
14	140	0.045	0.447	43859	4385.900	1.992	6

Tabella 4.91: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

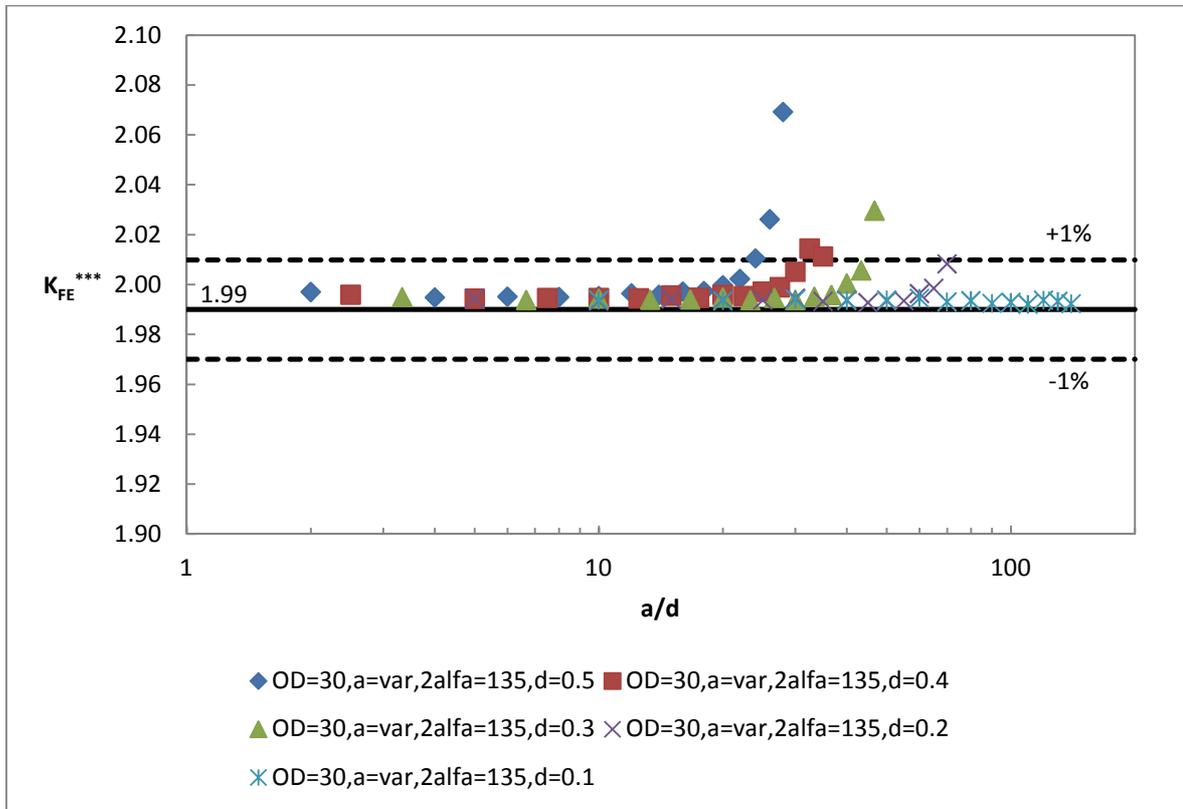


Figura 4.158: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.99; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

In termini di x^*/d si ha invece:

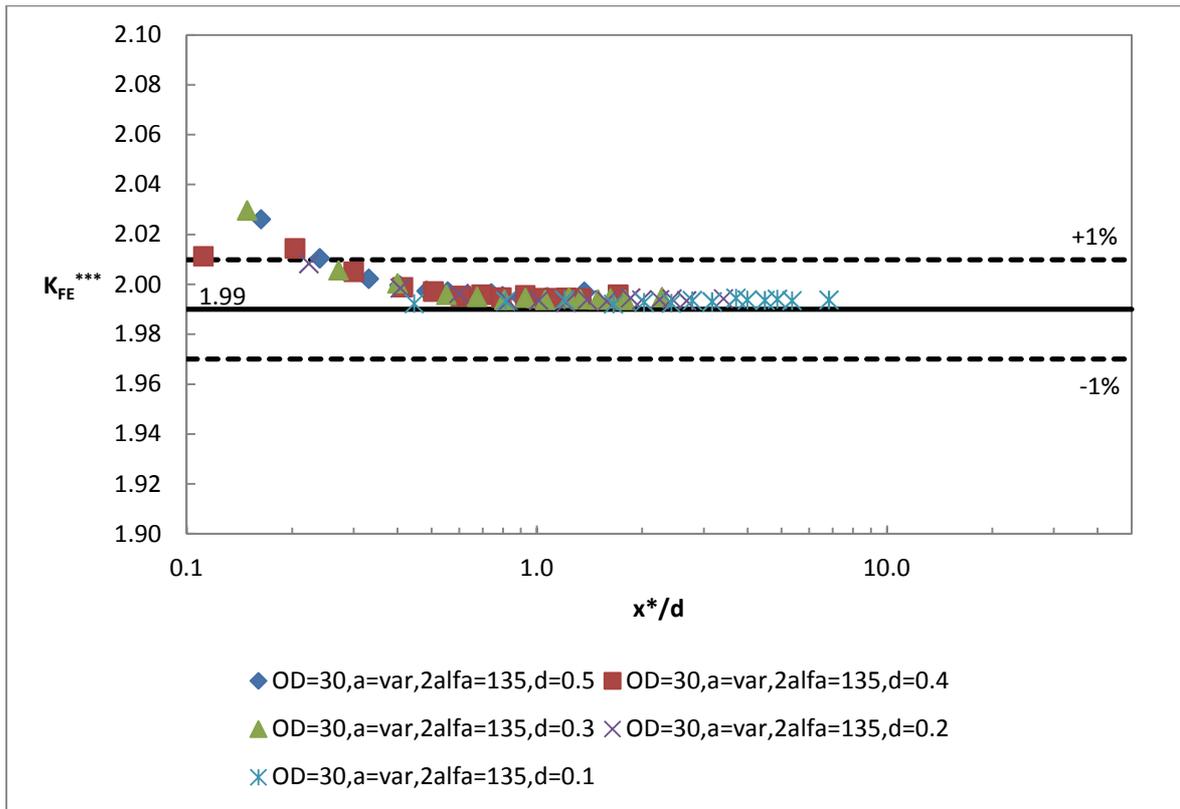


Figura 4.159: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.99; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Si osserva perciò che l'utilizzo dell'areola per il controllo della mesh ha innalzato il valore di riferimento di convergenza, che passa dall'1.97 ricavato per mesh non controllata ad un 1.99, ma presenta anche una banda di dispersione ancora più stretta e di ampiezza pari all'1% del valore di riferimento calcolato (rispetto al 2% nel caso di mesh non controllata). Anche con l'ausilio dell'areola si osserva comunque un'ottima stabilità del metodo per quest'angolo d'apertura, cosa molto gradita poiché, come già affermato varie volte, il caso di saldatura si modella in generale con un intaglio di apertura pari a 135° .

Si osserva inoltre che il parametro limite di convergenza x^*/d risulta ben inferiore all'unità; si assume in questo caso un valore minimo di 0.3, coerente con quanto ricavato nel caso di mesh non controllata.

4.3.5.3.8 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.625	1.249	16.862	1.686	2.137	6
2	4	0.558	1.116	21.312	2.131	2.136	6
3	6	0.514	1.027	26.89	2.689	2.136	6
4	8	0.472	0.945	34.507	3.451	2.135	6
5	10	0.431	0.861	45.315	4.532	2.135	6
6	12	0.389	0.778	61.232	6.123	2.136	6
7	14	0.327	0.654	85.722	8.572	2.135	6
8	16	0.310	0.621	125.53	12.553	2.132	6
9	18	0.261	0.522	194.97	19.497	2.133	6
10	20	0.219	0.438	328.13	32.813	2.134	6
11	22	0.175	0.350	620.41	62.041	2.136	6
12	24	0.138	0.277	1409.5	140.950	2.133	5
13	26	0.089	0.177	4470.8	447.080	2.145	3
14	28	0.047	0.095	31587	3158.700	2.194	1

Tabella 4.92: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.625	1.561	17.41	1.741	2.137	6
2	5	0.558	1.395	21.999	2.200	2.136	6
3	7.5	0.514	1.284	27.763	2.776	2.136	6
4	10	0.472	1.181	35.62	3.562	2.136	6
5	12.5	0.431	1.076	46.782	4.678	2.135	6
6	15	0.389	0.972	63.211	6.321	2.136	6
7	17.5	0.327	0.818	88.509	8.851	2.135	6
8	20	0.310	0.776	129.59	12.959	2.132	6
9	22.5	0.261	0.653	201.32	20.132	2.133	6
10	25	0.219	0.548	338.87	33.887	2.133	6
11	27.5	0.175	0.437	640.87	64.087	2.135	6
12	30	0.138	0.346	1456.8	145.680	2.131	6
13	32.5	0.089	0.222	4628.5	462.850	2.139	4
14	35	0.047	0.118	33182	3318.200	2.156	2

Tabella 4.93: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.625	2.082	18.138	1.814	2.137	6
2	6.666666667	0.558	1.859	22.92	2.292	2.136	6
3	10	0.514	1.712	28.926	2.893	2.136	6
4	13.33333333	0.472	1.574	37.106	3.711	2.136	6
5	16.66666667	0.431	1.435	48.727	4.873	2.136	6
6	20	0.389	1.297	65.862	6.586	2.136	6
7	23.33333333	0.327	1.090	92.194	9.219	2.135	6
8	26.66666667	0.310	1.035	135.03	13.503	2.132	6
9	30	0.261	0.871	209.77	20.977	2.133	6
10	33.33333333	0.219	0.730	353.17	35.317	2.132	6
11	36.66666667	0.175	0.583	668.05	66.805	2.134	6
12	40	0.138	0.461	1519.2	151.920	2.129	6
13	43.33333333	0.089	0.296	4832.4	483.240	2.134	6
14	46.66666667	0.047	0.158	34753	3475.300	2.145	3

Tabella 4.94: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.625	3.123	19.219	1.922	2.137	6
2	10	0.558	2.789	24.287	2.429	2.136	6
3	15	0.514	2.568	30.642	3.064	2.136	6
4	20	0.472	2.362	39.32	3.932	2.136	6
5	25	0.431	2.153	51.632	5.163	2.136	6
6	30	0.389	1.945	69.771	6.977	2.136	6
7	35	0.327	1.635	97.69	9.769	2.135	6
8	40	0.310	1.552	143.07	14.307	2.132	6
9	45	0.261	1.306	222.27	22.227	2.133	6
10	50	0.219	1.095	374.2	37.420	2.133	6
11	55	0.175	0.875	708	70.800	2.133	6
12	60	0.138	0.692	1610.6	161.060	2.128	6
13	65	0.089	0.443	5127	512.700	2.132	6
14	70	0.047	0.236	37030	3703.000	2.133	4

Tabella 4.95: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.625	6.245	21.219	2.122	2.137	6
2	20	0.558	5.578	26.809	2.681	2.137	6
3	30	0.514	5.135	33.822	3.382	2.137	6
4	40	0.472	4.723	43.397	4.340	2.137	6
5	50	0.431	4.305	56.99	5.699	2.137	6
6	60	0.389	3.890	77.011	7.701	2.137	6
7	70	0.327	3.270	107.82	10.782	2.136	6
8	80	0.310	3.104	157.91	15.791	2.133	6
9	90	0.261	2.612	245.31	24.531	2.134	6
10	100	0.219	2.191	413.05	41.305	2.133	6
11	110	0.175	1.749	781.51	78.151	2.134	6
12	120	0.138	1.384	1778.1	177.810	2.128	6
13	130	0.089	0.887	5663.8	566.380	2.131	6
14	140	0.047	0.473	41016	4101.600	2.126	6

Tabella 4.96: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

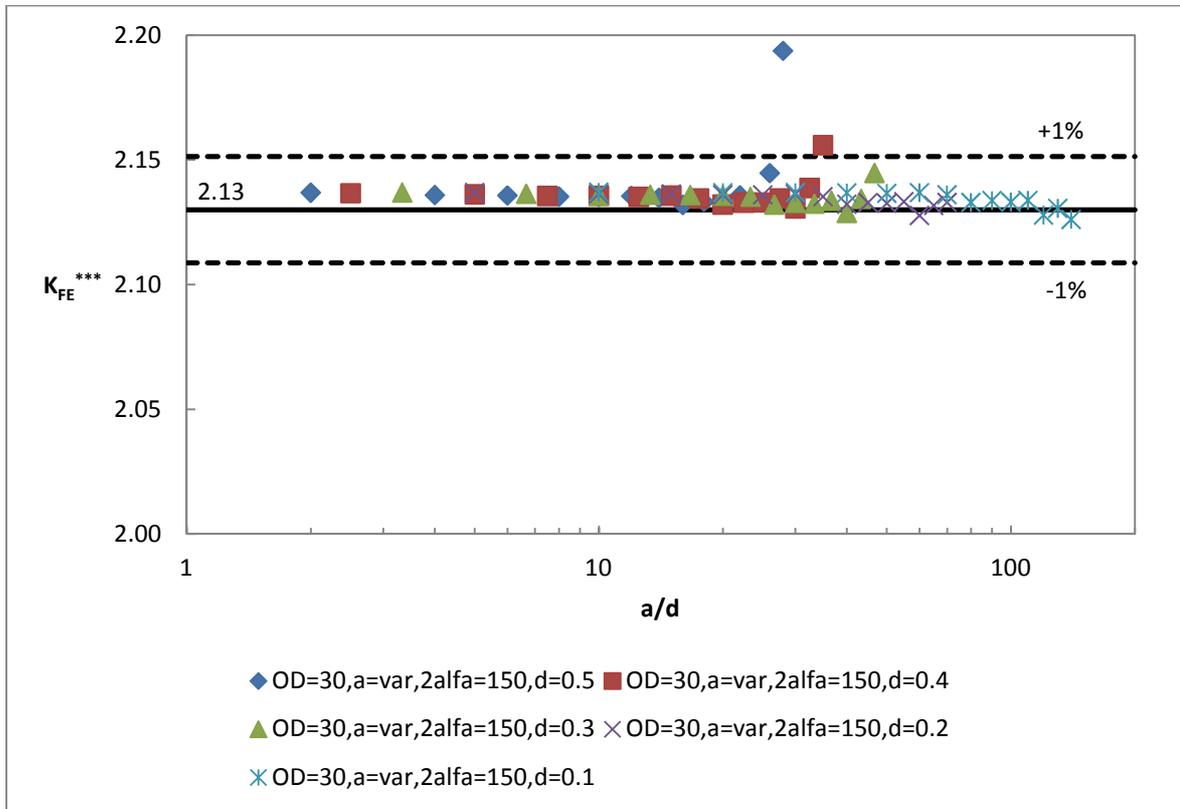


Figura 4.160: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 2.13; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

In termini di x^*/d si ottiene invece:

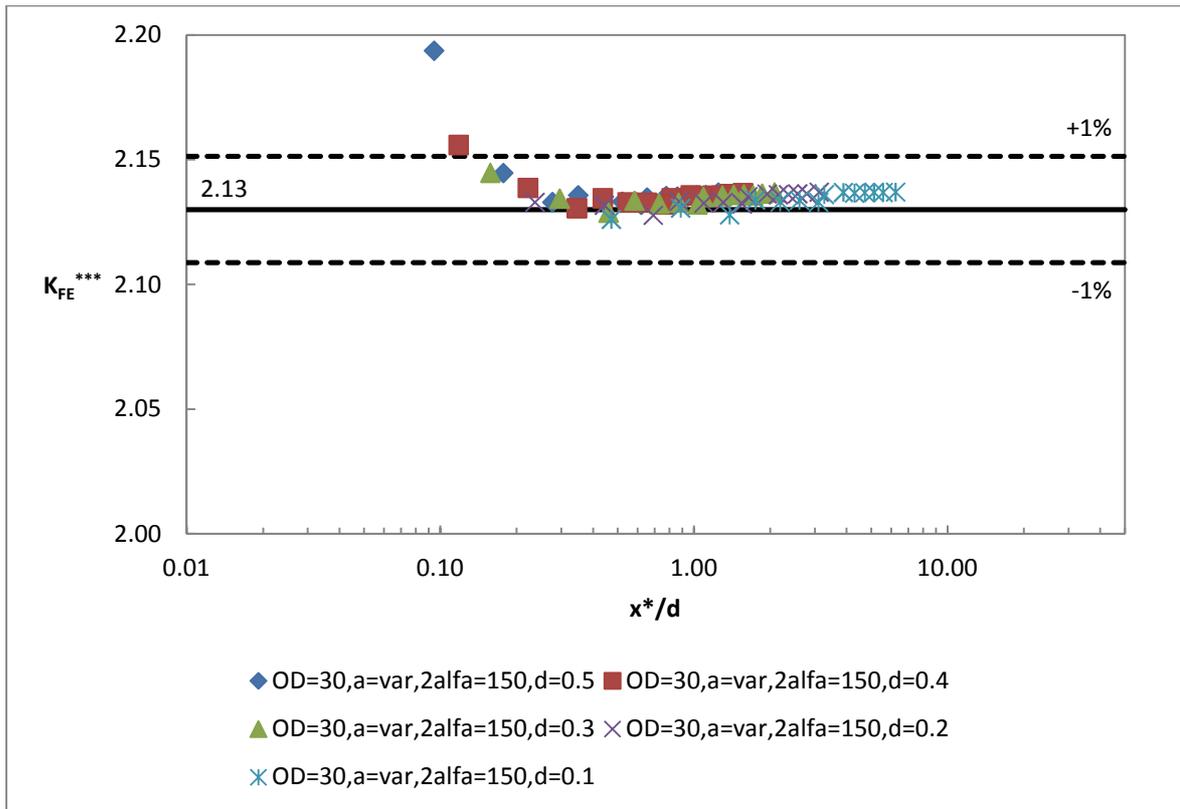


Figura 4.161: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore di riferimento ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 2.13; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Si osserva quindi che utilizzando la definizione in x^*/d si è ripristinata la convergenza del metodo anche in questo caso ma che si ottiene, come nel caso di mesh non controllata, un valore di riferimento calcolato (pari a 2.13) molto lontano rispetto a quelli ricavati per tutti gli altri angoli d'apertura. La dispersione è ancora molto bassa e pari all'1% del valore di riferimento, mentre nel caso non controllato si è assunto un 2% di quest'ultimo. Anche in questo caso, come in quello di mesh non controllata, il metodo converge per x^*/d molto inferiori all'unità e pari a circa 0.13.

4.3.5.4 - Riassunto dei risultati ottenuti

In conclusione, dopo aver determinato per ogni caso il valore di riferimento e la banda d'accettabilità mediante l'applicazione del PSM con mesh controllata tramite l'utilizzo di un'areola centrata all'apice dell'intaglio, si vuole riassumere tutti i risultati in alcuni diagrammi dove si esprime il K_{FE}^{***} prima in funzione di a/d e poi di x^*/d .

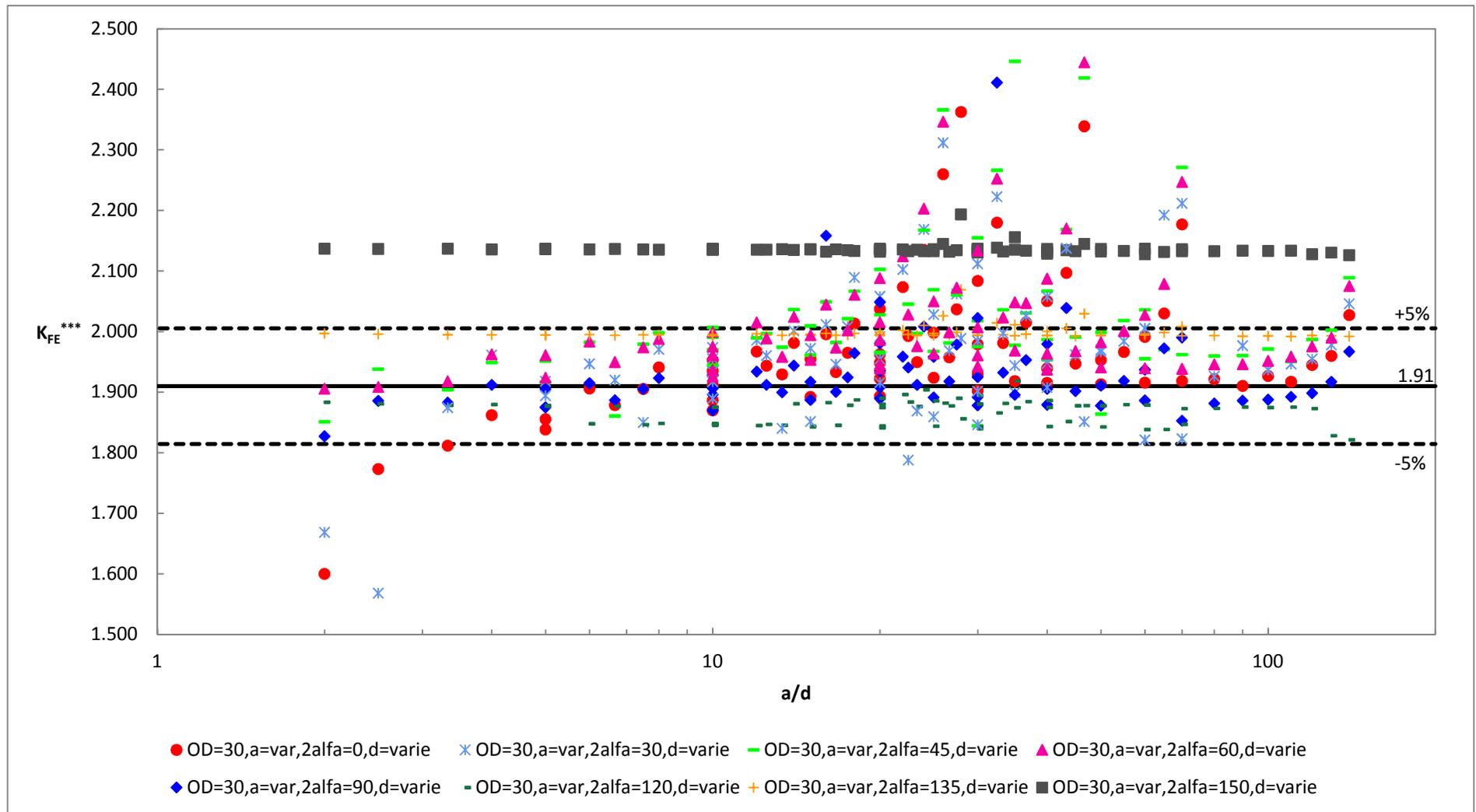


Figura 4.162: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

Si noti che con un singolo simbolo si sono indicate tutte le curve relative a diverse dimensioni globali d'elemento di un singolo angolo d'apertura.

Per i motivi già descritti durante la trattazione esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione del parametro a/d si ottengono delle curve che tendono ad uscire dalla banda di convergenza a causa della già menzionata interazione tra i campi di tensione locali. Come già osservato durante l'analisi dei singoli angoli d'apertura dell'intaglio per riportare il metodo a convergenza è utile esprimere il suddetto parametro adimensionale K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , dove si ricorda che con il simbolo x^* si intende l'estensione del campo locale di tensione calcolata numericamente.

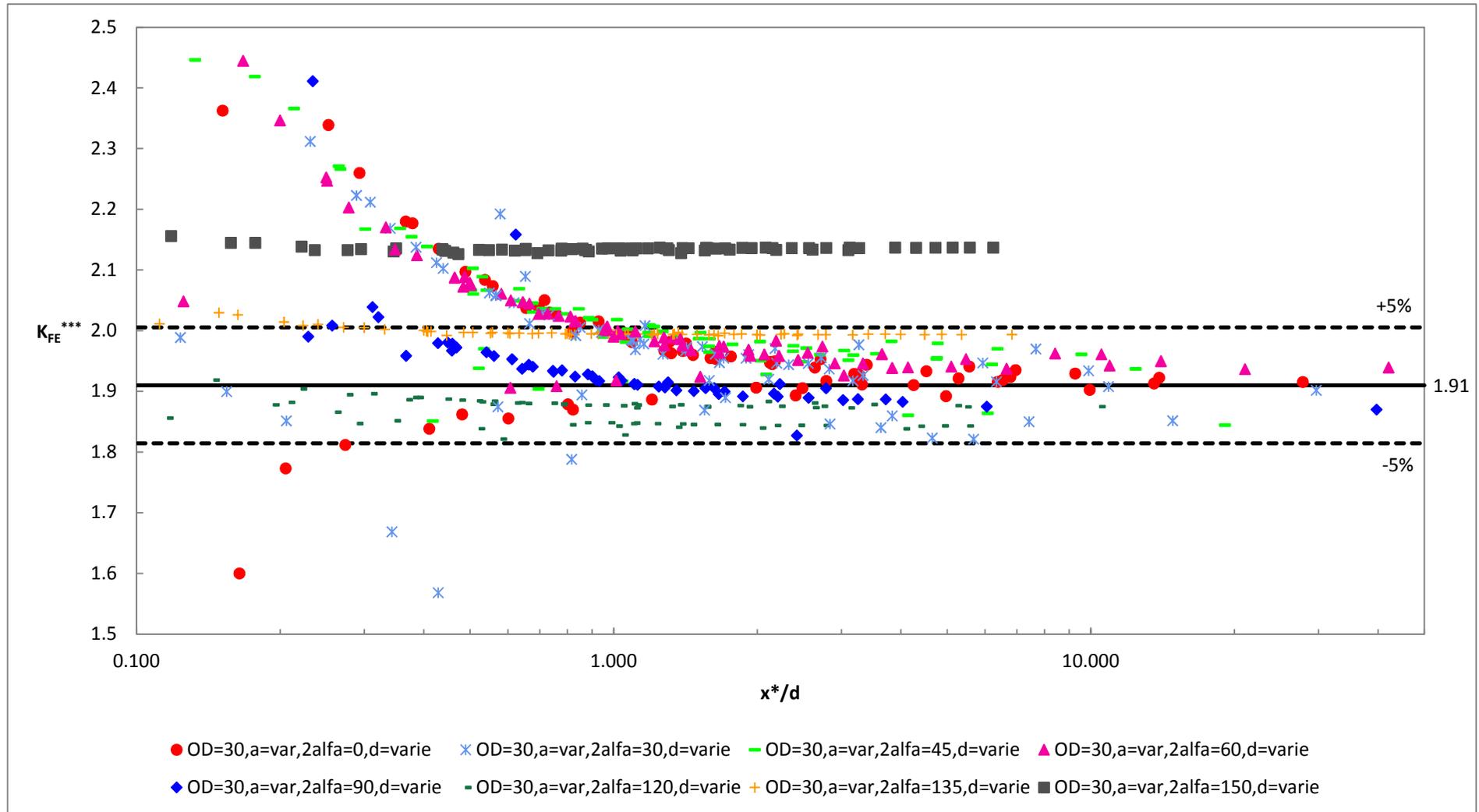


Figura 4.163: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

La nuova definizione per l'espressione di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d permette di far convergere in banda tutti i valori che con la precedente definizione, quella in a/d , uscivano anche per valori di quest'ultimo parametro adimensionale molto alti e nominalmente a convergenza.

L'utilizzo dell'areola per il controllo della mesh nell'intorno del punto di singolarità ha consentito di aumentare il valore di riferimento a 1.91, molto vicino al valore fissato in letteratura [4] pari a 1.93, e di diminuire l'ampiezza delle bande di dispersione dei risultati attorno al valore di riferimento al 5% di quest'ultimo. Per contro l'utilizzo dell'areola comporta un tempo d'applicazione del metodo maggiore che nel caso d'utilizzo di una mesh non controllata.

Si noti che i risultati riportati nel caso d'angolo d'apertura di 60° si riferiscono ad un'areola di 4×4 elementi poiché, come si può osservare nel paragrafo dedicato a questa apertura, un'areola da 6×6 elementi non fornisce un layout della mesh accettabile; un'alternativa per uniformare la mesh anche nel caso 6×6 elementi potrebbe essere l'utilizzo di una tipologia di mapped, che verrà trattata nel paragrafo successivo.

Si osserva inoltre che anche in questo caso, come in quello d'uso della mesh senza areola, tutti i risultati relativi all'angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150° cadono fuori dalla banda d'accettabilità; ancora una volta si può suggerire, nel caso in cui si abbia a che fare con un intaglio di questa apertura, di cambiare la costante utilizzata durante l'uso del metodo. Risulta però necessario sottolineare che i risultati del presente lavoro permettono di eseguire questa operazione solo per i 150° .

I limiti di convergenza del metodo, espressi in funzione del rapporto tra l'estensione del campo locale di tensione e la global element size della mesh, sono pari a:

$$\frac{x^*}{d} \geq 1.3 \quad (4.11)$$

Si osserva quindi che un ulteriore vantaggio dell'utilizzo dell'areola per il controllo della mesh nell'intorno del punto di singolarità è quello di diminuire il limite del parametro adimensionale di convergenza, che nel caso d'utilizzo di mesh non ontrollata risultava pari a 2.

Anche in questo caso è possibile restringere la banda d'accettabilità e avvicinare il valore medio di convergenza a quello suggerito in letteratura [4] nel caso in cui si considerino solo gli angoli d'apertura di 0° e 135° , cioè quelli più utilizzati nella pratica. Poiché questo è già stato dimostrato nel caso di mesh free senza areola di controllo si faccia riferimento a quanto già trattato nel paragrafo 4.3.4.4; le differenze col caso attuale con areola di controllo della mesh sono trascurabili.

4.3.6 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e algoritmo di meshatura mapped all'interno della stessa

Nel paragrafo precedente nel quale si applica il PSM utilizzando un'areola centrata all'apice dell'intaglio per il controllo della mesh nell'intorno dello stesso si è osservato che in due casi, su un totale di 560, la mesh ottenuta non è conforme a quanto definito dalla letteratura in [7] nonostante entrambi i casi si trovino a convergenza anche in termini di x^*/d . Per cercare di uniformare maggiormente le mesh ottenute attraverso l'applicazione del metodo si è quindi sperimentato l'utilizzo dell'algoritmo di meshatura mapped internamente all'areola già definita precedentemente; si noti che in questo caso non tutti i layout delle mesh ottenuti al variare delle grandezze geometriche saranno coerenti con quanto richiesto dalla letteratura [7], ma si riesce a uniformare gli stessi poiché per un singolo grado d'apertura e l'utilizzo di mesh mapped si otterranno sempre layout uguali.

Per le configurazioni dell'areola adottate al variare dell'angolo d'apertura dell'intaglio si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 4.3.5; il numero d'elementi per il quale si è costruita l'areola ricalca quanto ricavato nello stesso paragrafo, ma in questo caso si è utilizzata un'areola 6x6 anche nel caso a 60° . Si faccia attenzione che nel caso d'angolo d'apertura inferiore o uguale a 90° si utilizza un'areola a 5 lati; per utilizzare la metodologia di meshatura mapped è stato necessario concatenare tra loro le due linee inferiori dell'areola.

Anche in questo caso, a causa del fatto che non si assegna alcuna suddivisione alle linee di contorno dell'areola, è necessario applicare una delle due procedure descritte nel paragrafo 4.3.5 per evitare che l'algoritmo automatico assegni un numero errato d'elementi ai lati a causa degli errori numerici e quindi possa fallire la meshatura di tipo mapped; si è scelto ancora una volta di aumentare leggermente la global element size assegnata poiché lo si ritiene il metodo più rapido in fase applicativa. Si noti ancora una volta che l'aumento

sufficiente è dello 0.1% rispetto al valore nominale, e risulta completamente trascurabile in fase d'analisi dei risultati.

4.3.6.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Il programma automatico utilizzato in questo caso è lo stesso già descritto nel paragrafo 4.3.5.1; le uniche differenze riguardano la variabile "free" che è posta uguale a 0 per utilizzare una mesh mapped internamente all'areola.

4.3.6.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

Si riportano di seguito alcuni esempi, riferiti ad una singola dimensione globale d'elemento pari a 0.2 mm, delle mesh ottenute attraverso questo modo di procedere.

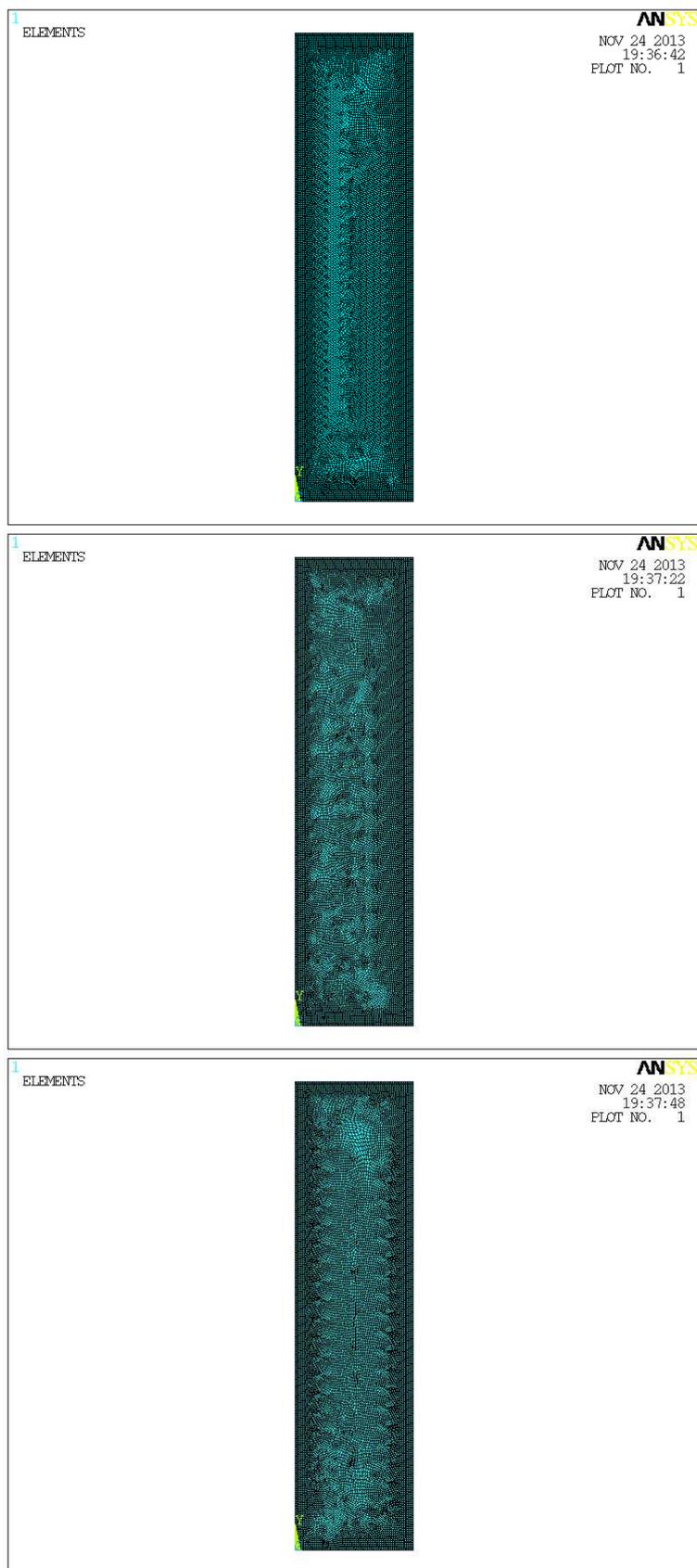


Figura 4.164: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 0^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

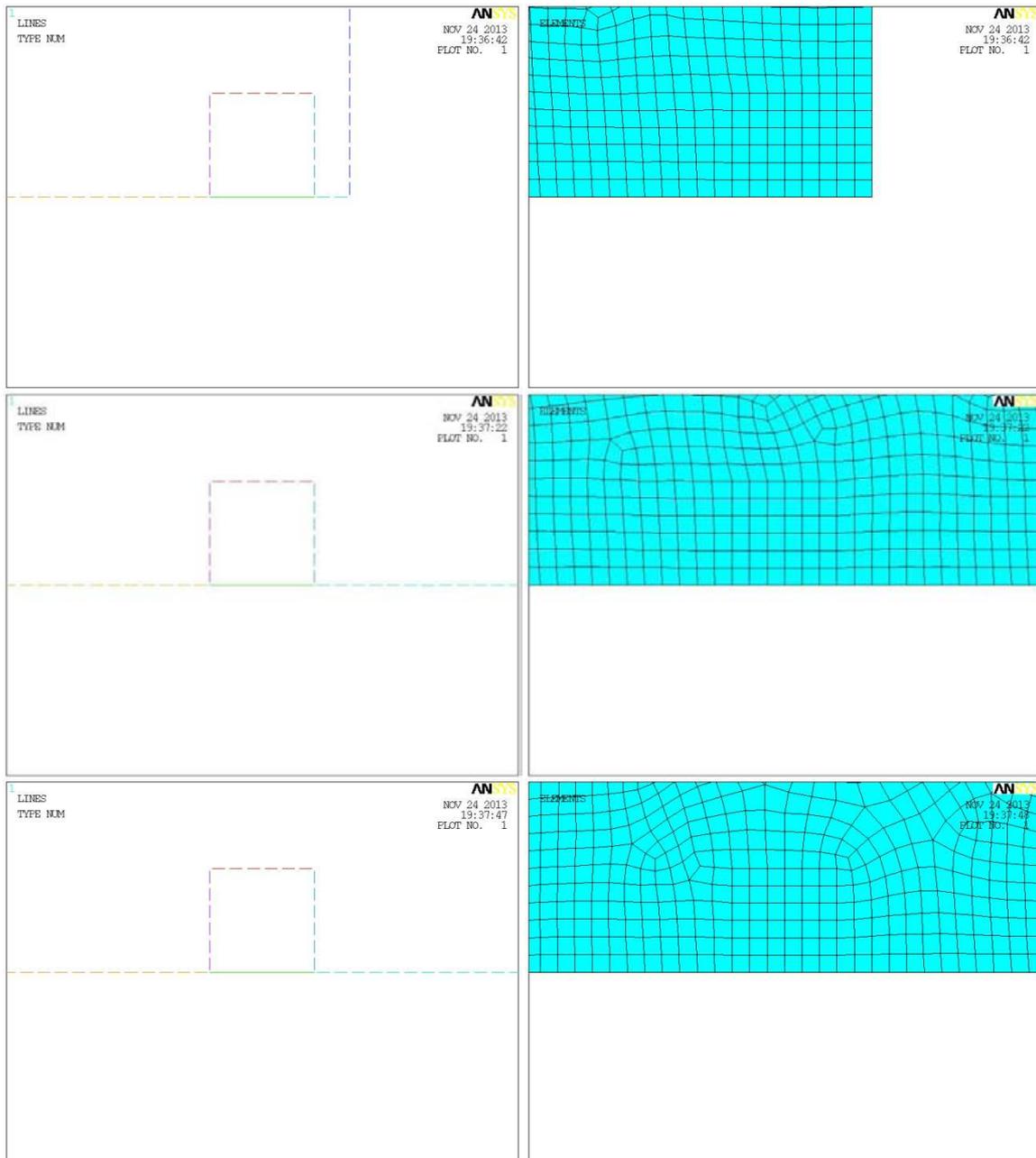


Figura 4.165: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'incisione. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'incisione $2\alpha = 0^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un'incisione di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

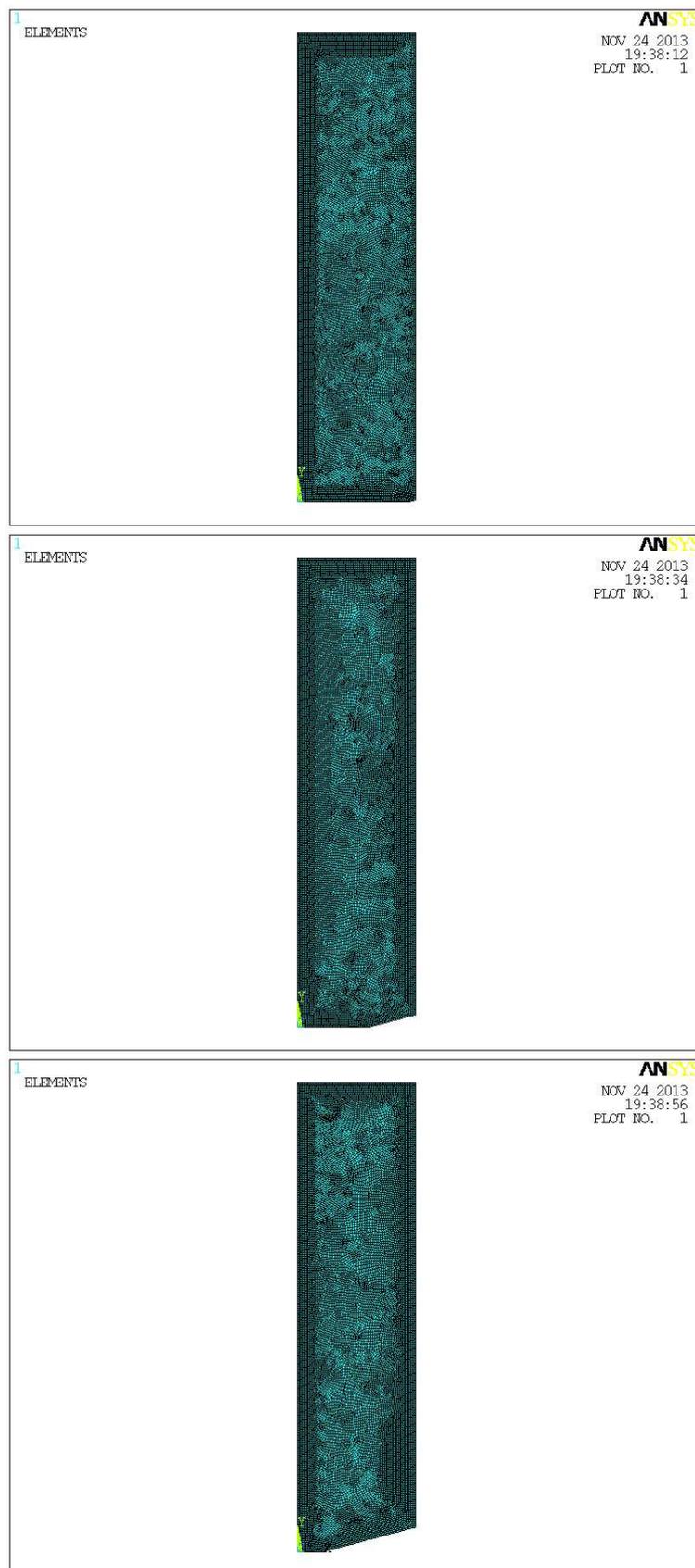


Figura 4.166: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 30^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

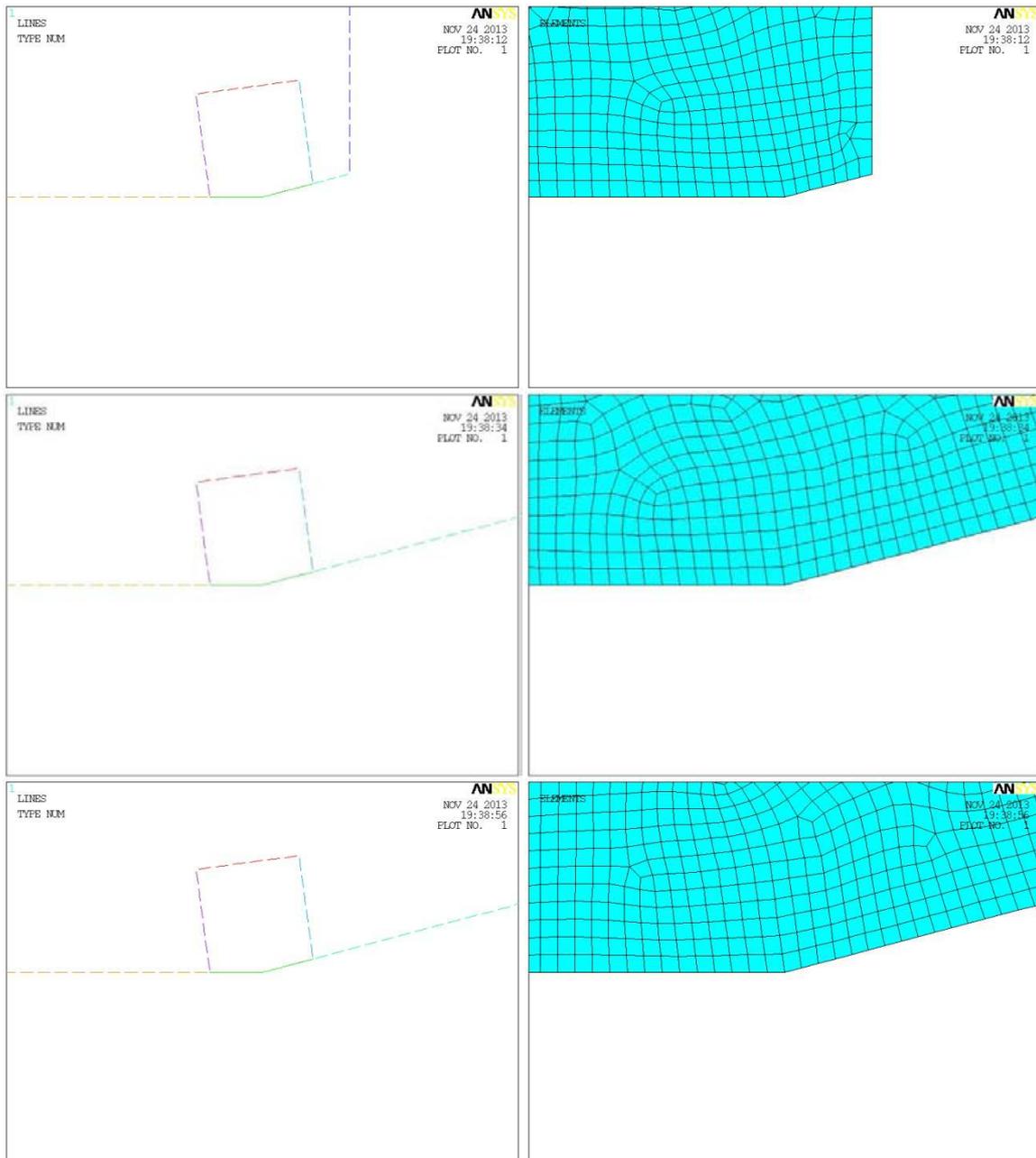


Figura 4.167: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 30^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

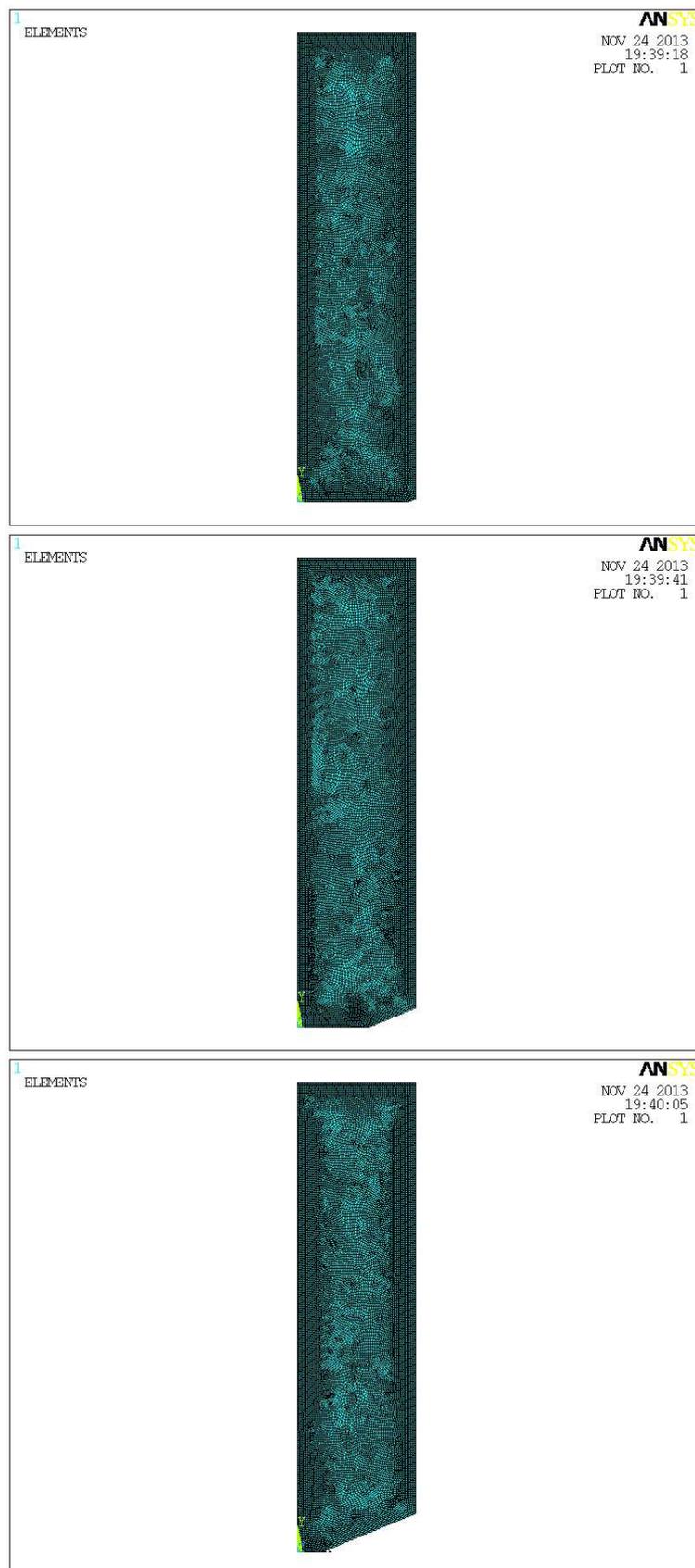


Figura 4.168: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 45^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

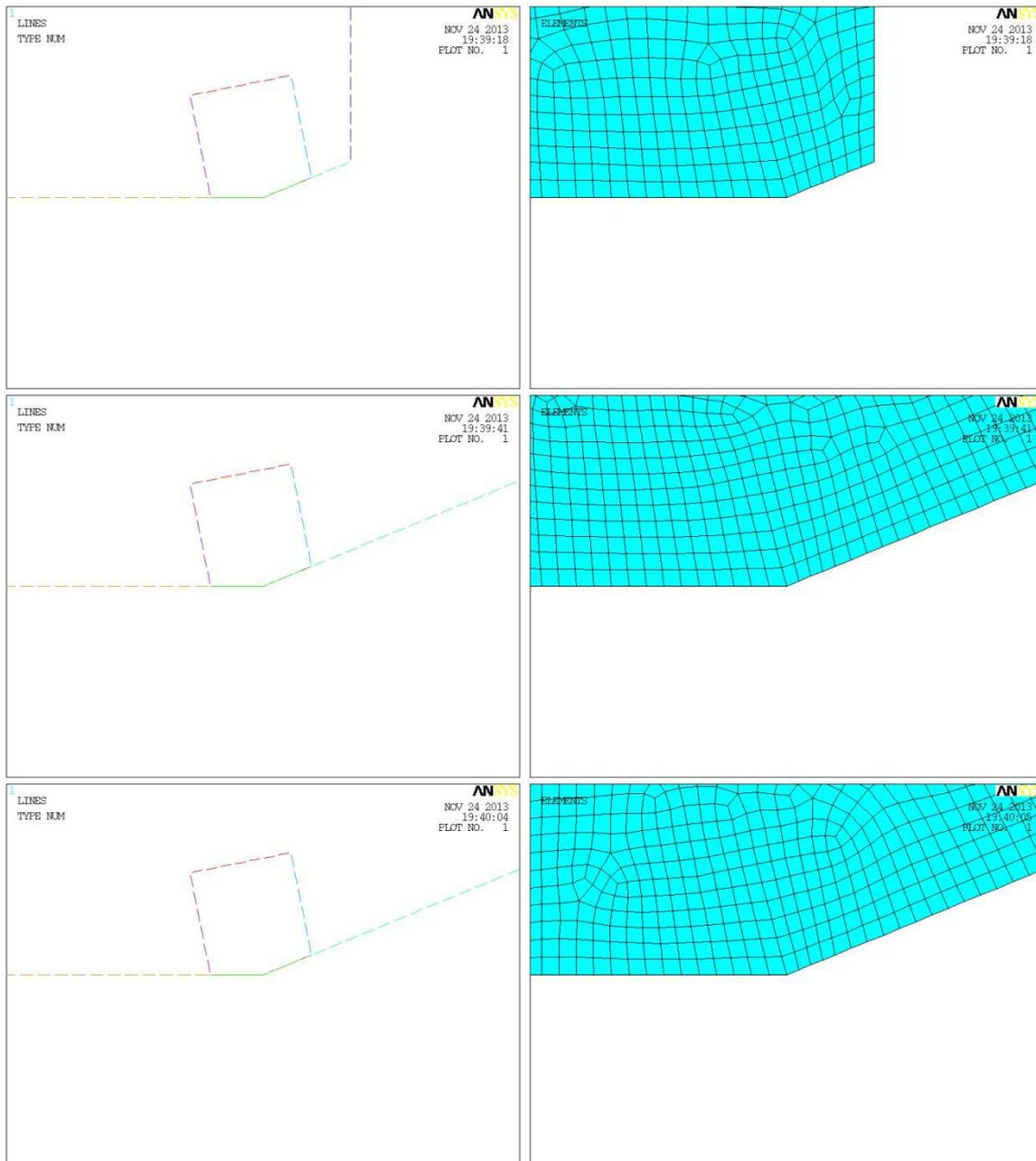


Figura 4.169: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 45^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

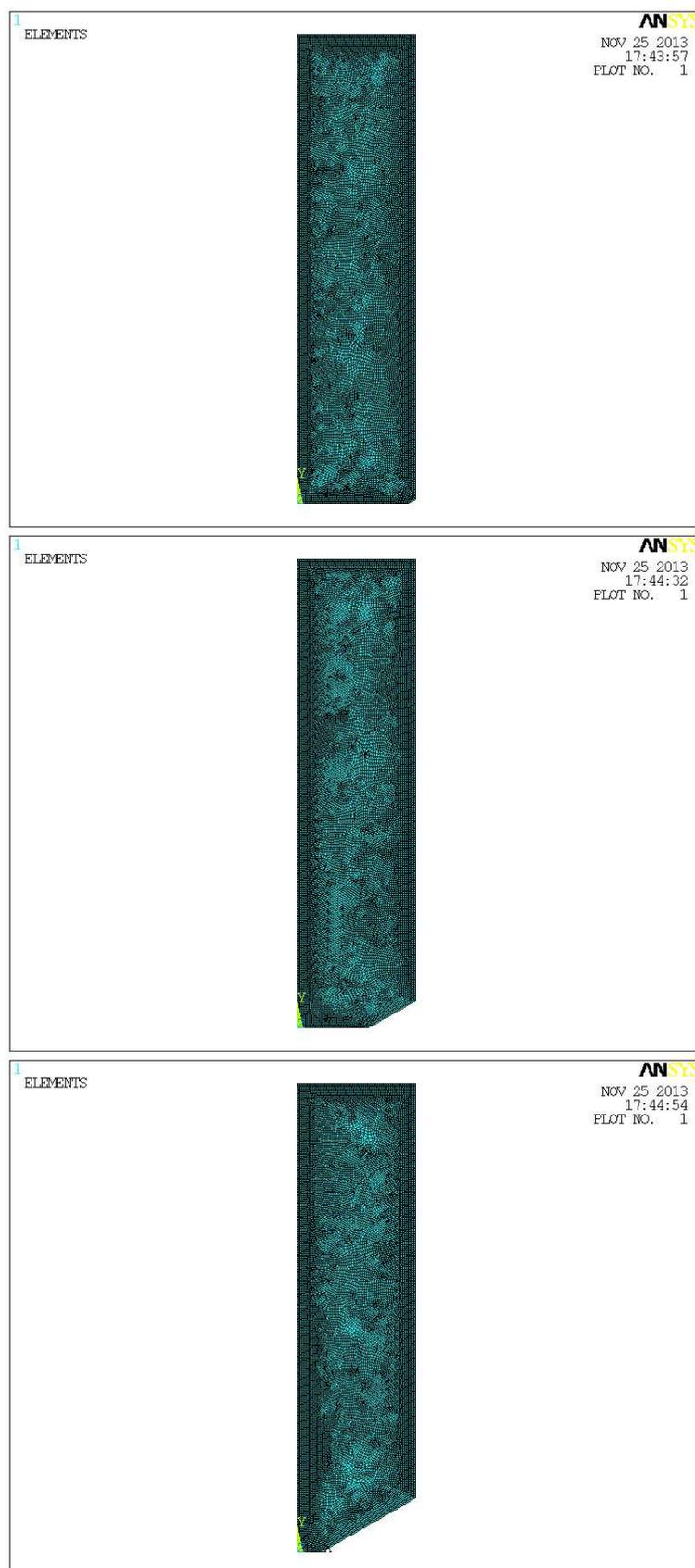


Figura 4.170: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 60^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

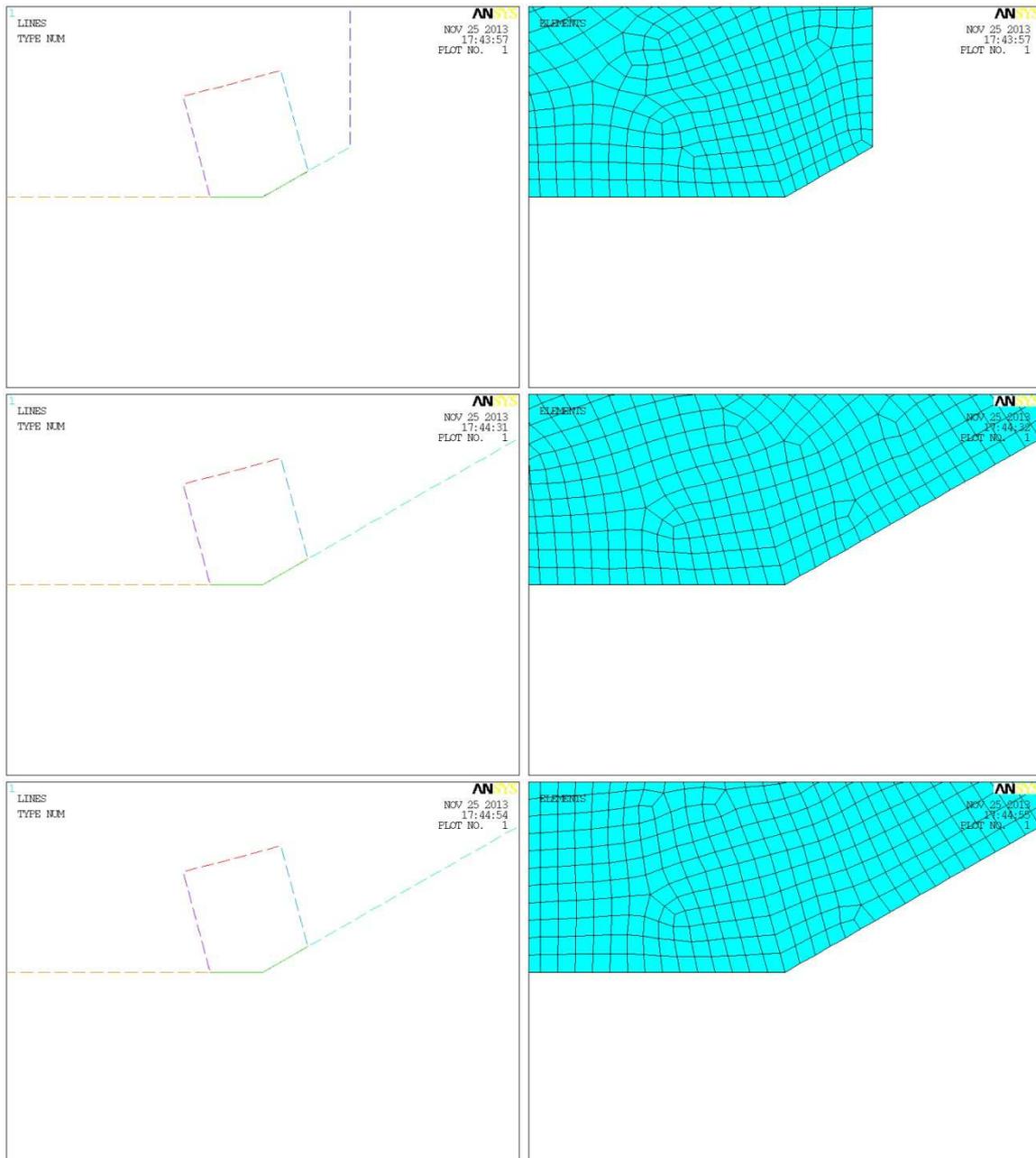


Figura 4.171: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 60^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

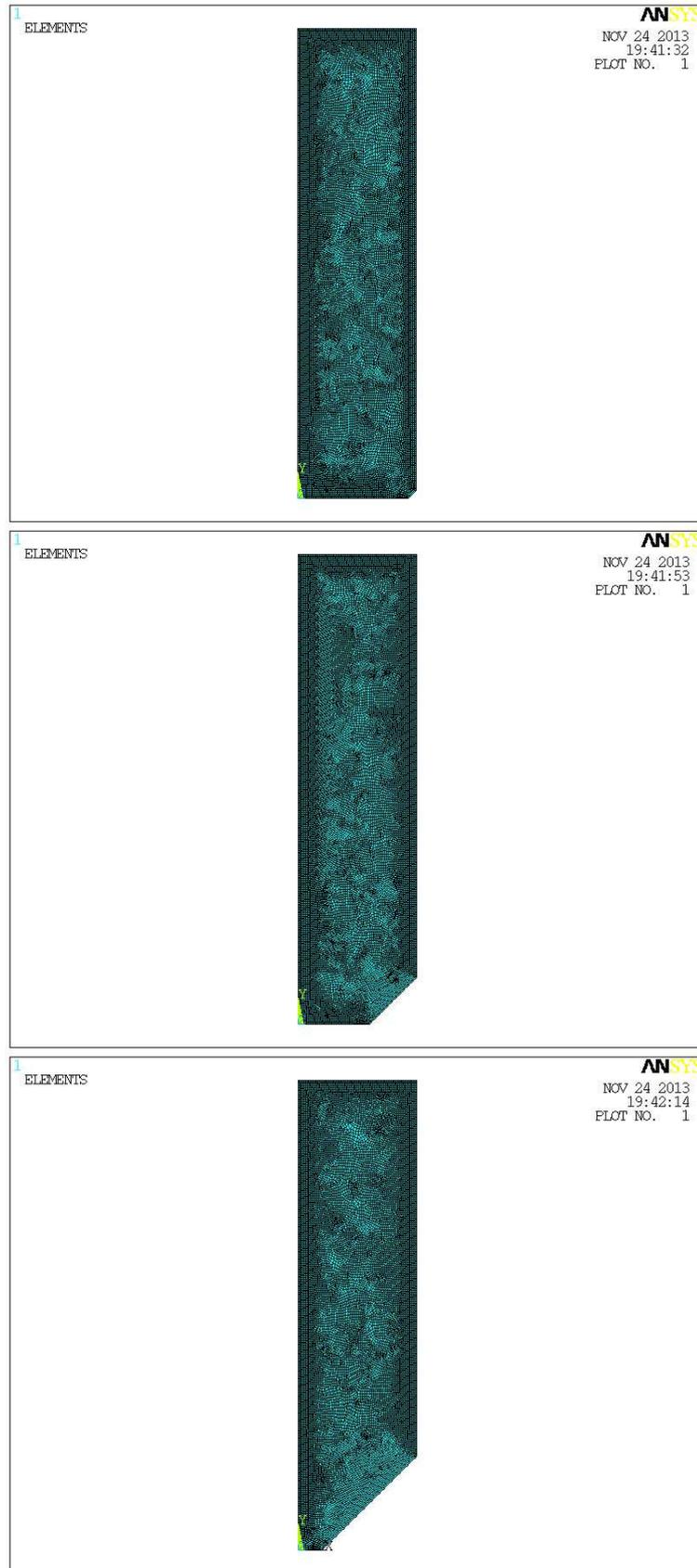


Figura 4.172: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

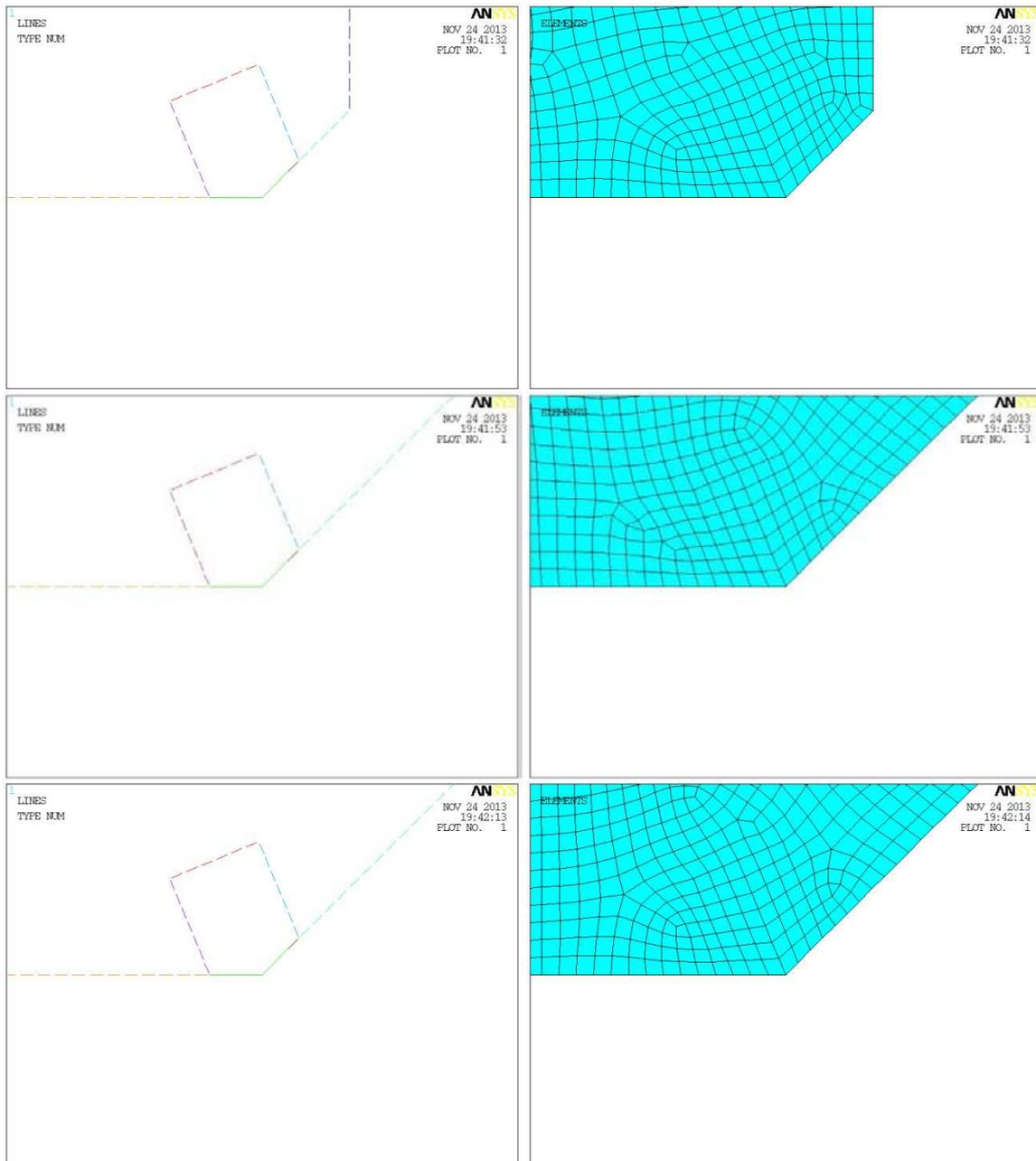


Figura 4.173: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'incisione. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'incisione $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un'incisione di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

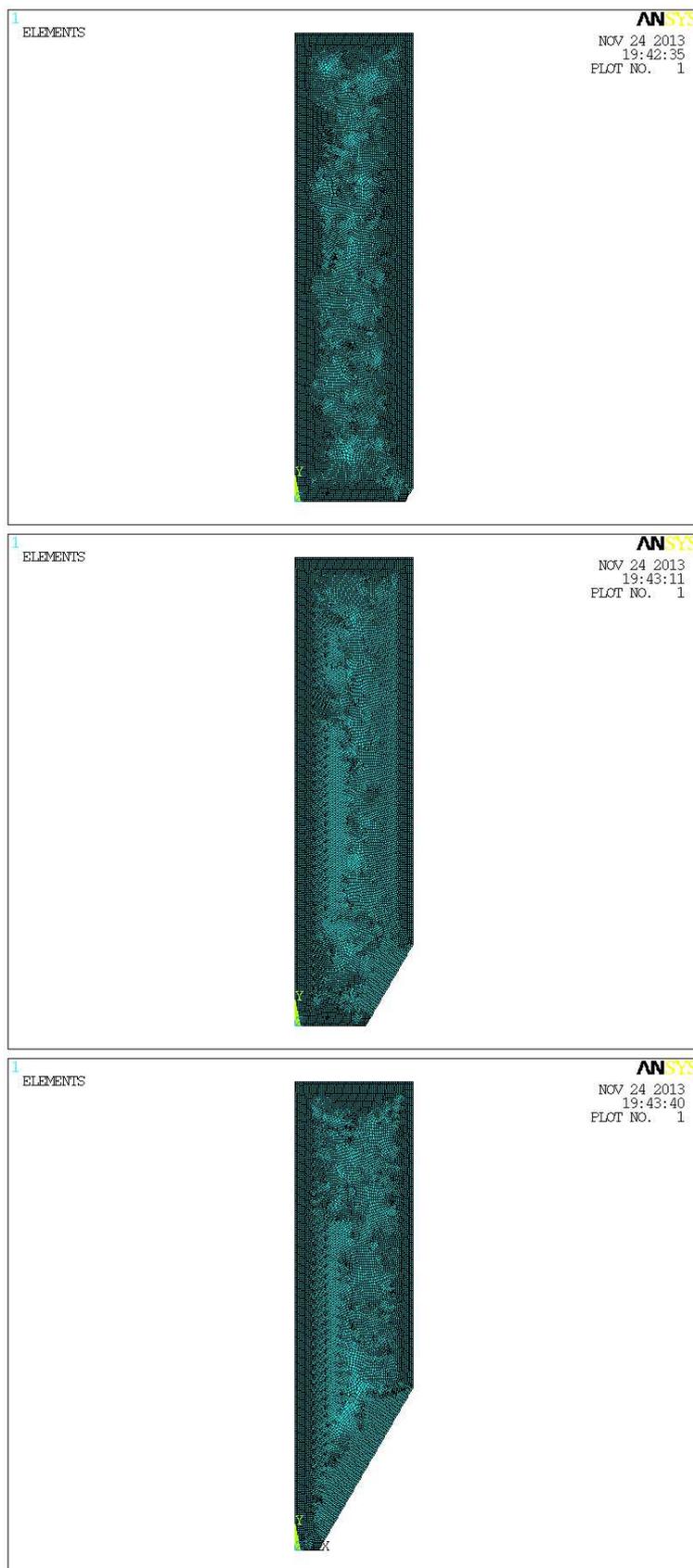


Figura 4.174: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

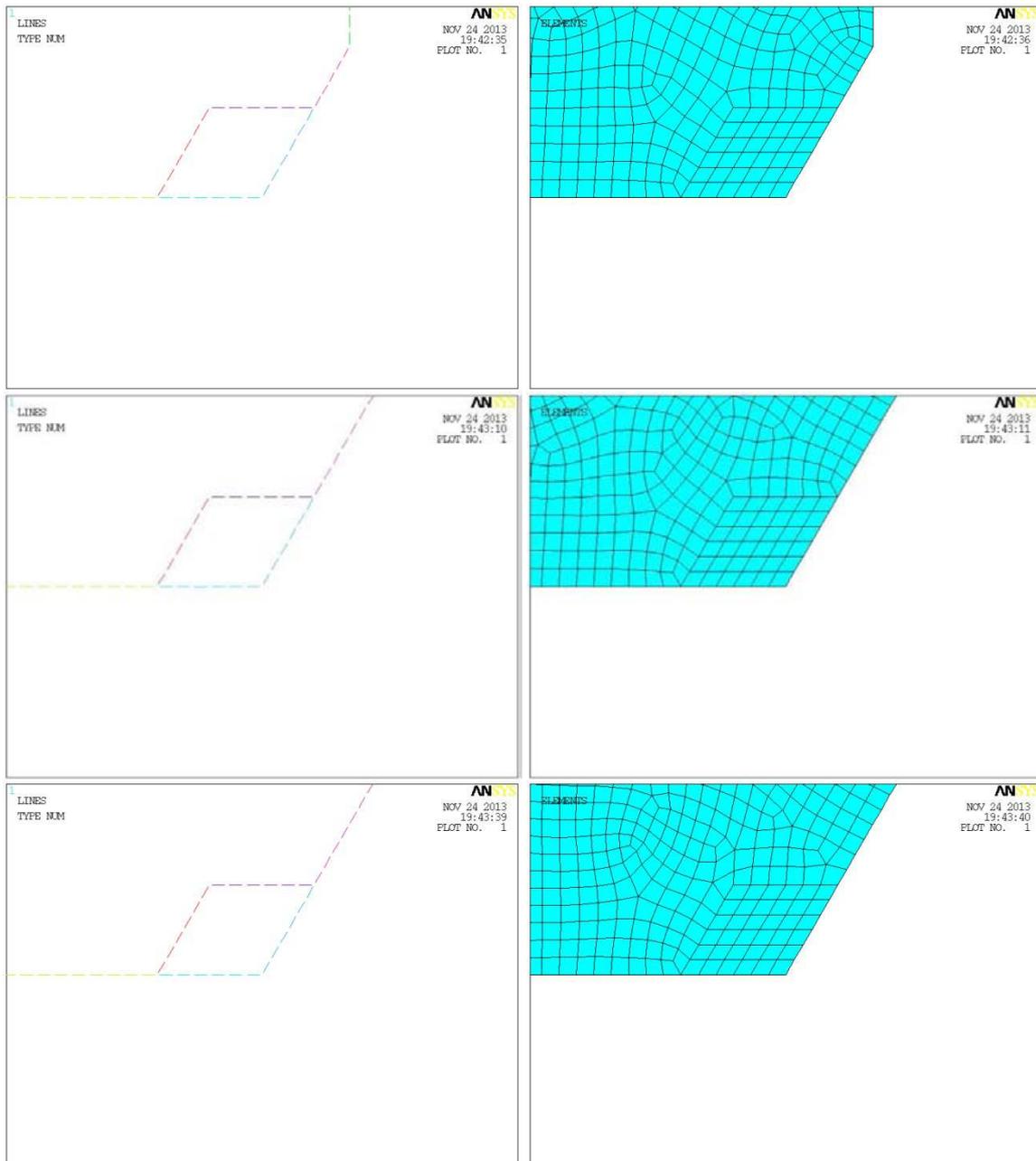


Figura 4.175: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

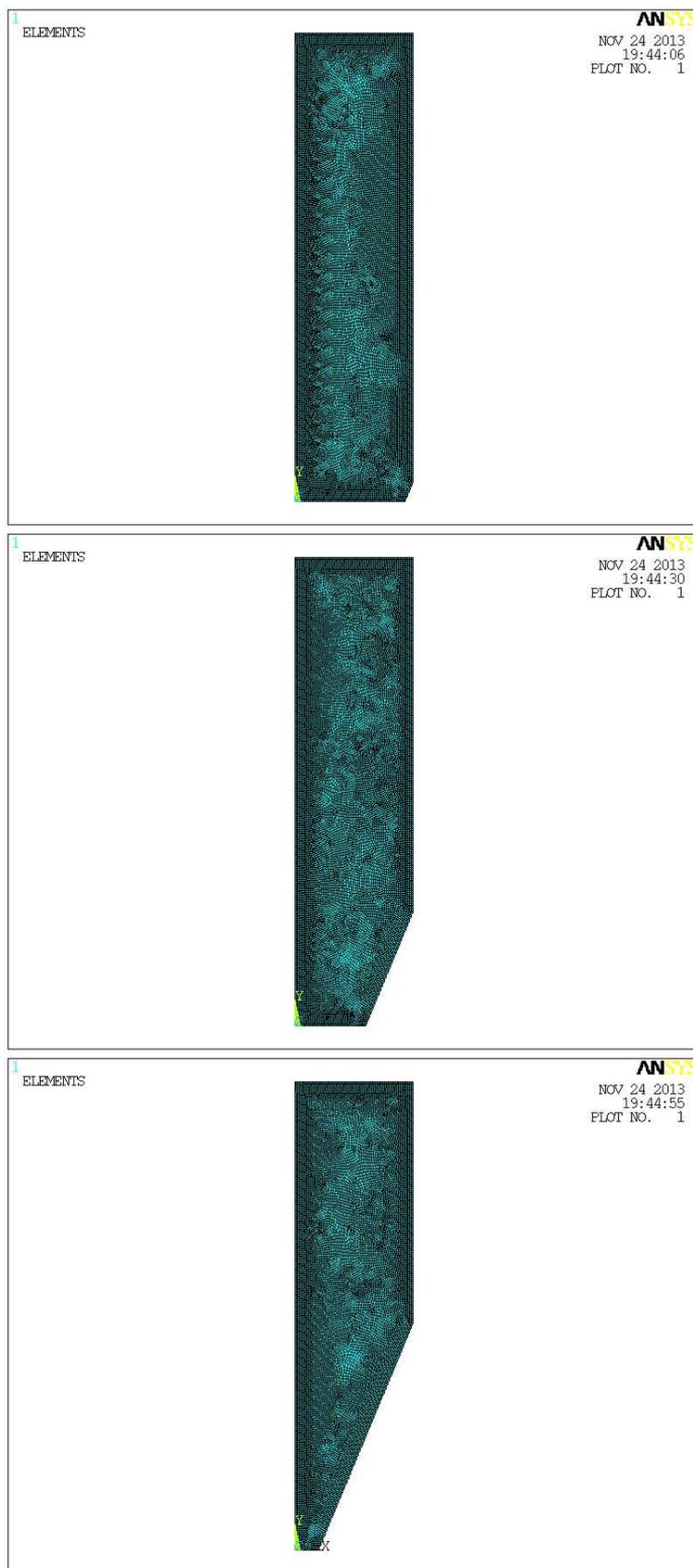


Figura 4.176: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

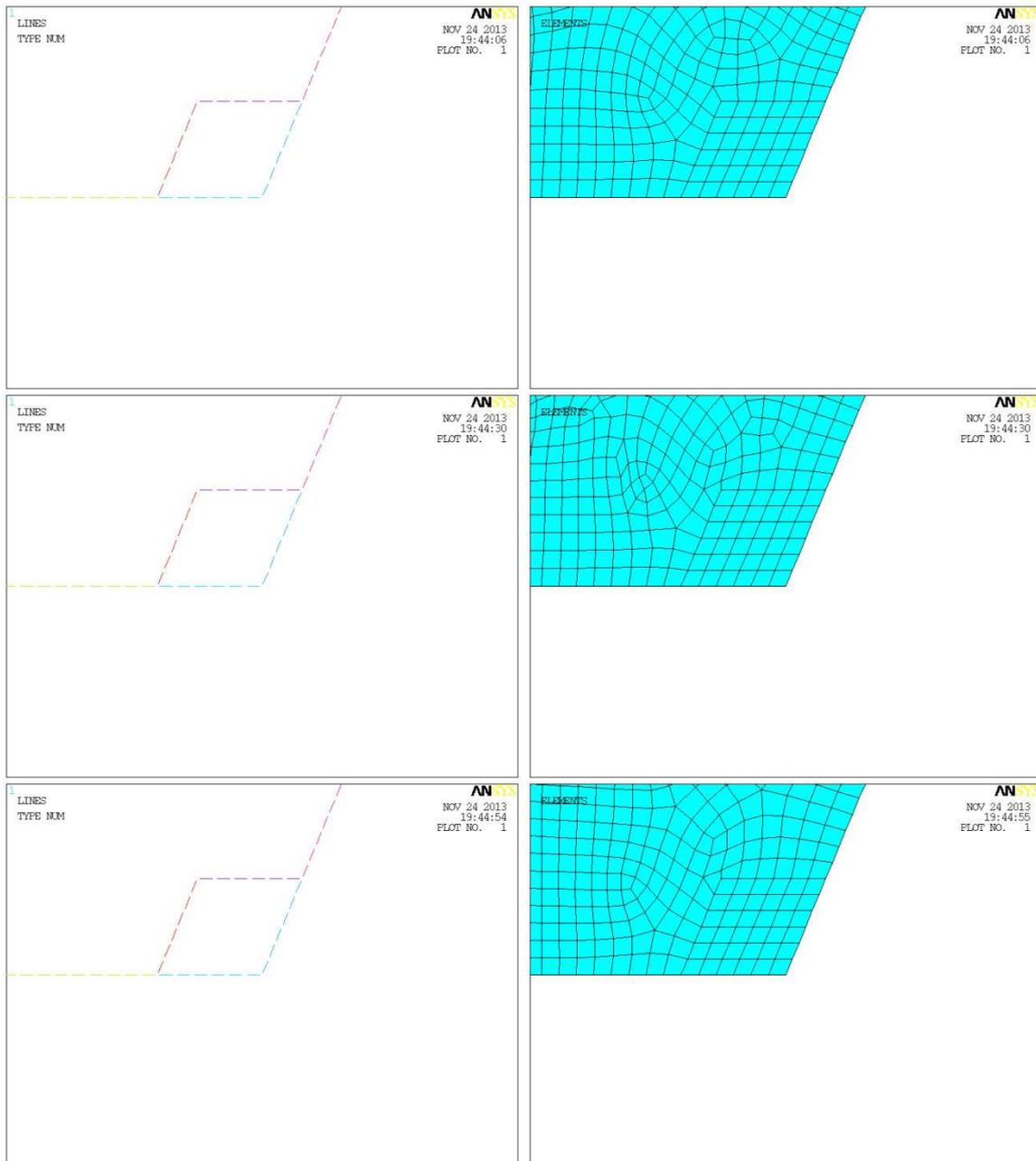


Figura 4.177: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

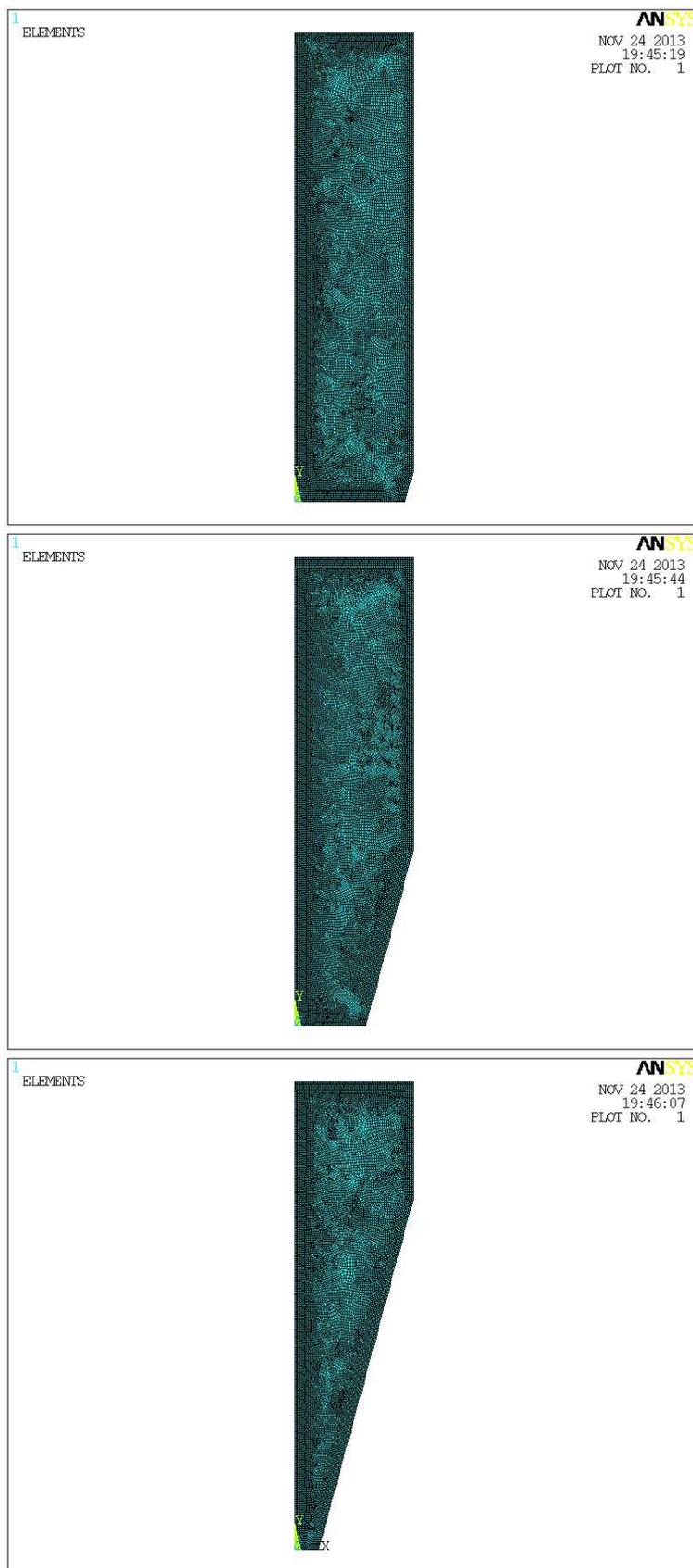


Figura 4.178: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

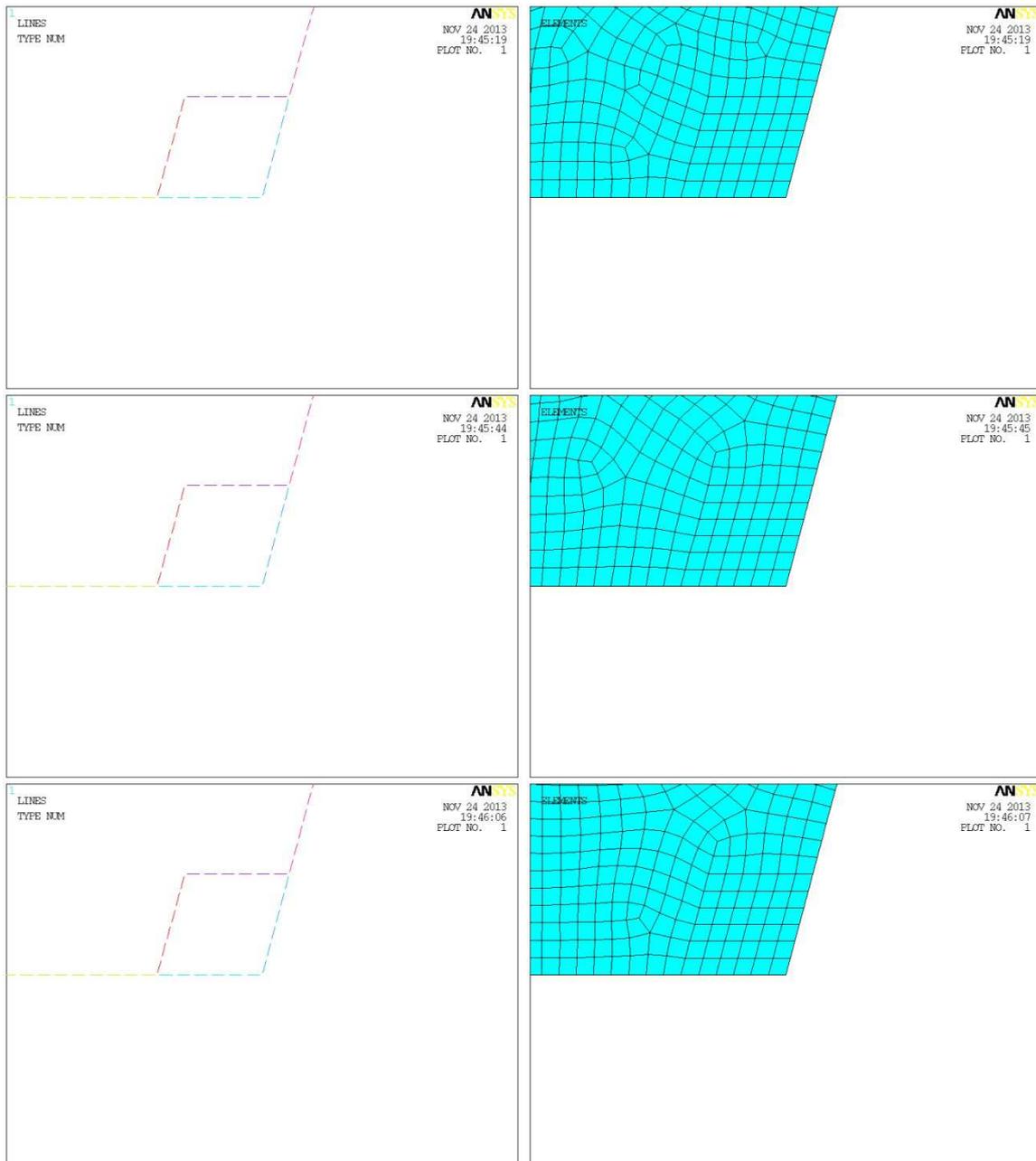


Figura 4.179: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

4.3.6.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

L'applicazione del metodo PSM sfruttando l'areola centrata all'apice dell'intaglio e una mesh mapped internamente alla stessa non è un approccio consigliato dallo scrittore, principalmente a causa della complessità che si ritrova in ambito applicativo nella creazione di tali tipologie di mesh per le quali, si ricorda, si devono utilizzare aree a quattro

lati mantenendo vincoli relativi al numero d'elementi dei lati opposti del quadrilatero. Tale metodo risulta utile quindi nel momento in cui le metodologie non controllata o con areola free falliscono in termini di layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità, ma non è inteso per l'utilizzo individuale. Per questo motivo non si riportano tutti i risultati per ogni singola apertura, ma si riassumono tutti in un unico grafico.

4.3.6.4 - Riassunto dei risultati ottenuti

In conclusione, dopo aver applicato il PSM con mesh controllata tramite l'utilizzo di un'areola centrata all'apice dell'intaglio e dell'algoritmo di meshatura mapped internamente alla stessa, si vuole riassumere tutti i risultati in alcuni diagrammi dove si esprime il K_{FE}^{***} prima in funzione di a/d e poi di x^*/d .

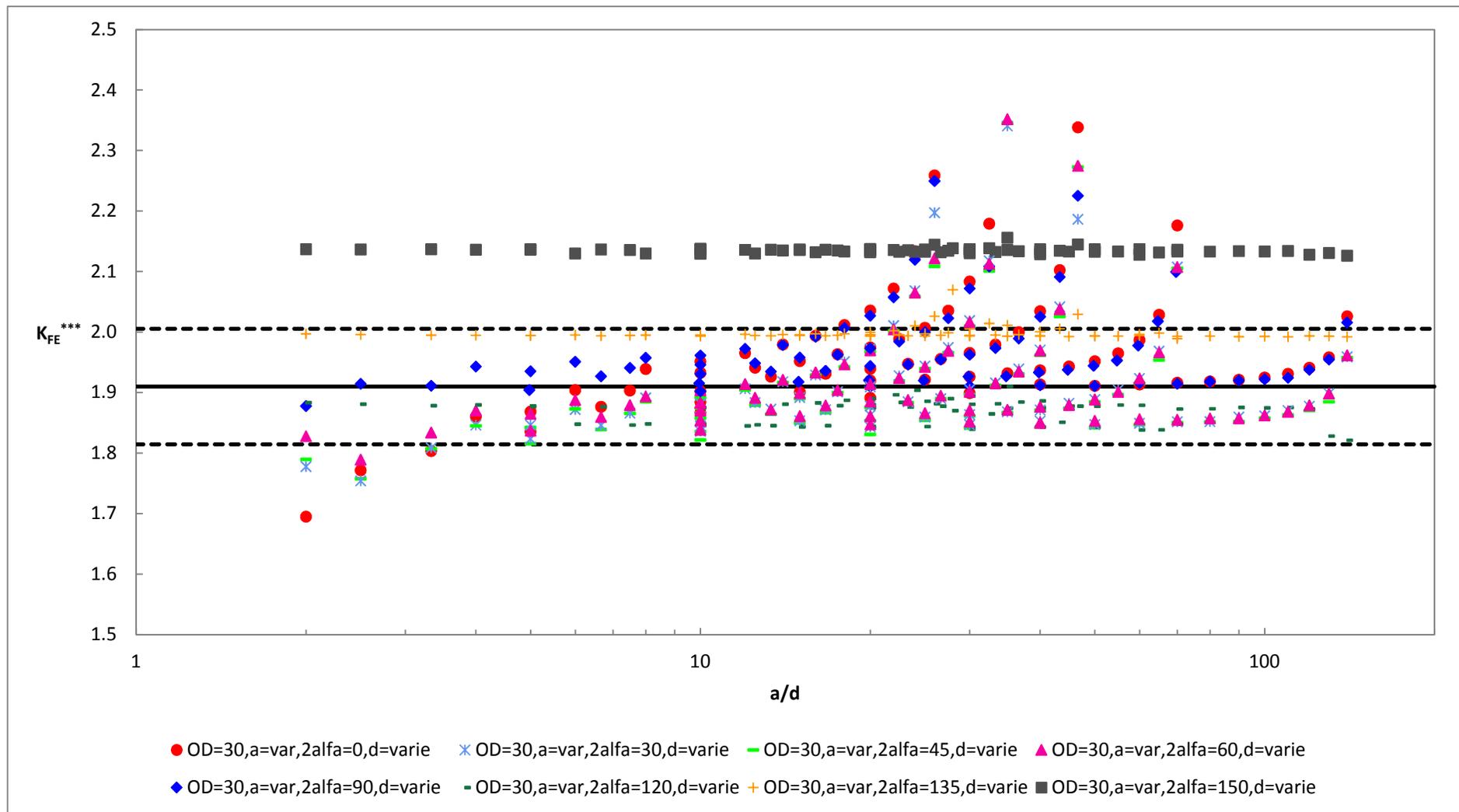


Figura 4.180: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento pari a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

Si noti che con un singolo simbolo si sono indicate tutte le curve relative a diverse dimensioni globali d'elemento di un singolo angolo d'apertura.

Per i motivi già descritti durante la trattazione esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione del parametro a/d si ottengono delle curve che tendono ad uscire dalla banda di convergenza a causa della già menzionata interazione tra i campi di tensione locali. Come già osservato varie volte per riportare il metodo a convergenza è utile esprimere il suddetto parametro adimensionale K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , dove si ricorda che con il simbolo x^* si intende l'estensione del campo locale di tensione calcolata numericamente.

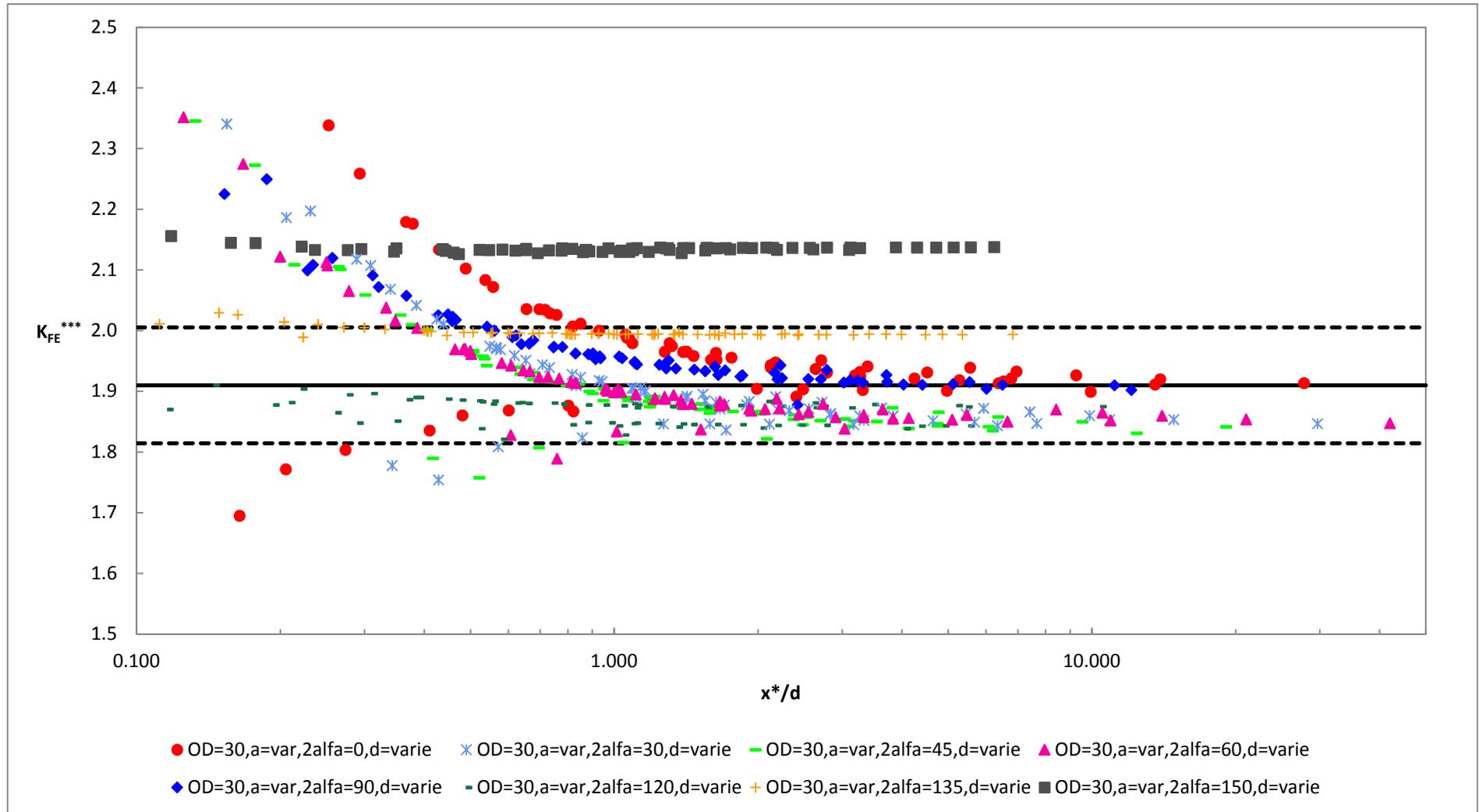


Figura 4.181: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

La nuova definizione per l'espressione di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d permette di far convergere in banda tutti i valori che con la precedente definizione, quella in a/d , escono nonostante si trovino a convergenza.

L'utilizzo dell'areola centrata all'apice dell'intaglio porta gli stessi vantaggi e svantaggi già descritti nel caso di mesh free interna alla stessa; nel caso mapped si osserva una dispersione dei valori relativi al singolo grado d'apertura inferiore, legata al fatto che in questo modo l'algoritmo non ha possibilità di scelta per il layout della mesh che è sempre uniforme. Globalmente però si osserva che il valore medio di convergenza e l'ampiezza delle bande di dispersione corrispondono a quanto già ricavato per areola con mesh free; si conferma quindi un valore di riferimento pari a 1.91 con bande di dispersione del 5% dello stesso.

Il vantaggio nell'utilizzo della mesh mapped internamente all'areola si osserva invece nella lieve diminuzione del limite di convergenza in termini di x^*/d , che ora è sufficiente sia superiore all'unità, mentre nel caso d'areola con mesh interna free il valore ricavato è di 1.3.

Un ulteriore vantaggio consta nel fatto che con questa tipologia di mesh anche l'angolo d'apertura di 60° converge nella banda d'accettabilità utilizzando un'areola di 6x6 elementi; nel caso invece di mesh free nell'areola era necessario adottare una 4x4.

Ancora una volta si osserva che l'angolo d'apertura di 150° converge a valori molto più alti di quelli in banda; si noti che questi valori sono pressoché invariati in tutti e tre i casi trattati e si può quindi dedurre che il problema è legato alla geometria stessa e non al layout della mesh.

Concludendo l'utilizzo dell'areola con mesh mapped interna è sconsigliato per la laboriosità che si presenta nel caso d'applicazione in ambito industriale; rimane comunque una valida soluzione nel qual caso non sia possibile ricavare un layout della mesh corretto nell'intorno del punto di singolarità con uno degli altri metodi precedentemente descritti e, soprattutto, nel caso in cui si stia trattando un intaglio con angolo d'apertura pari a 60° e non ci si voglia accontentare delle informazioni fornite dall'utilizzo del metodo attraverso una mesh senza ausilio dell'areola.

4.4 - Provino con spallamento sollecitato a torsione

4.4.1 - Modello fisico e numerico

Il modello fisico al quale si è fatto riferimento durante l'analisi è quello di provino circolare con spallamento intermedio; quest'ultimo agisce da intaglio e può assumere diverse inclinazioni in funzione dell'angolo d'apertura. Il diametro maggiore è OD, quello inferiore è pari a $OD-2a$ dove a è la dimensione dello spallamento. La sollecitazione di modo III allo spallamento è stata ottenuta imponendo un momento torcente a una delle due estremità e vincolando l'altra. Di seguito si riportano alcune immagini che descrivono il modello adottato.

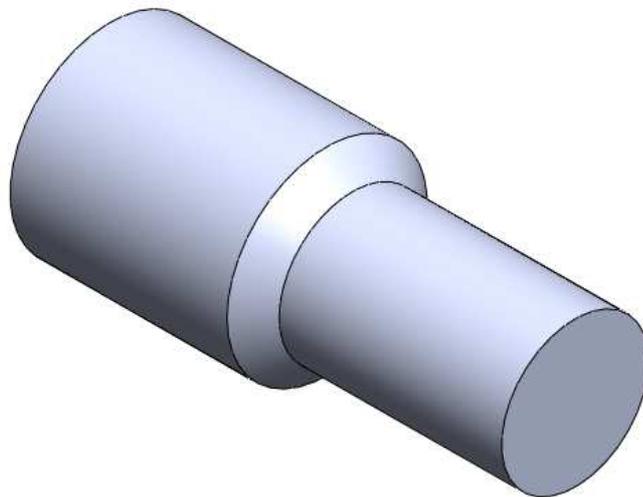


Figura 4.182: Modello di un provino circolare con intagli ai bordi.

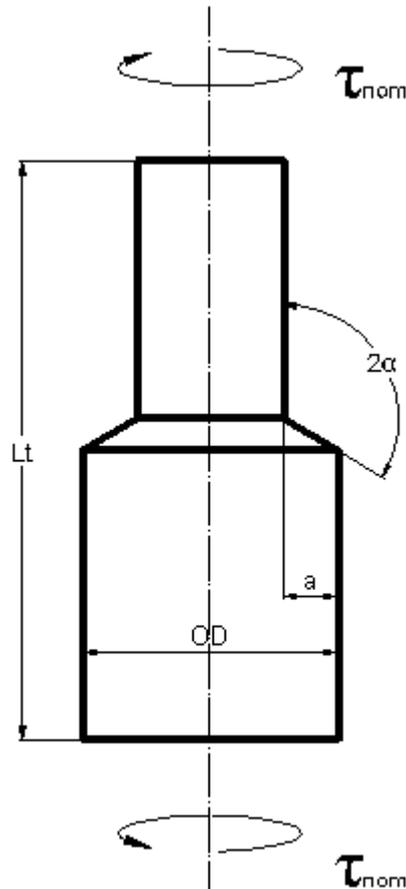


Figura 4.183: Modello fisico adottato per le analisi di un provino circolare con intagli ai bordi sollecitati a modo III.

A partire dal modello fisico si è ricavato quello numerico; data l'assialsimmetria della geometria è possibile semplificare quest'ultimo modellando solamente metà provino in un'analisi 2D, ottenendo una configurazione come in figura 4.184. La tipologia d'elemento scelta in questo caso è il PLANE25, elemento bidimensionale a 4 nodi utilizzato per modellare strutture assialsimmetriche con carichi non assialsimmetrici come la torsione. Ogni nodo possiede 3 gradi di libertà che corrispondono alle traslazioni nelle 3 direzioni.

Il materiale scelto per le analisi è acciaio con modulo di elasticità pari a 206000 MPa e coefficiente di Poisson uguale a 0.3.

La sollecitazione di torsione sul provino è invece modellata mediante l'utilizzo di una forza F ortogonale al piano, come indicato in figura 4.184; la lunghezza del provino è tale da garantire un campo di tensione uniformato presso l'intaglio, cioè che non risente più degli effetti dell'applicazione di una forza concentrata.

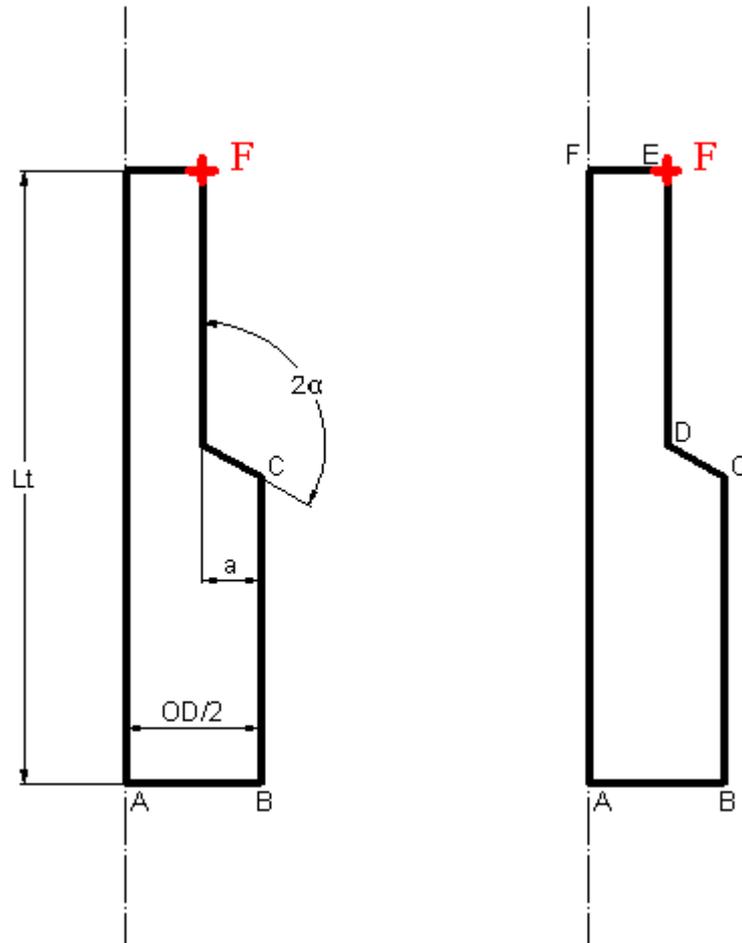


Figura 4.184: Modello semplificato per le analisi numeriche dove si è sfruttata l'assialsimmetria del problema originale. La tensione di torsione sul provino è applicata sfruttando una forza F ortogonale al piano.

Per ottenere una sollecitazione di modo III (l'assialsimmetria è già ricostruita adottando i PLANE25) riferendosi alla figura 4.184 si ha:

1. Vincolo su AB che blocca tutti i gradi di libertà;
2. Forza F ortogonale al piano d'analisi per simulare lo sforzo di torsione applicata al punto E.

Come illustrato nei casi precedenti per svolgere l'analisi NSIF è necessario creare un sistema di riferimento locale con l'origine sul punto di singolarità geometrica, con la direzione y ortogonale alla bisettrice dell'angolo d'apertura e con la direzione x rivolta verso la sezione resistente del provino. Di seguito è riportata una figura di dettaglio del sistema di riferimento locale adottato.



Figura 4.185: Sistema di riferimento locale adottato per una corretta analisi tramite gli NSIFs.

Nel caso in esame le dimensioni scelte per l'analisi sono:

- *Diametro esterno* $\rightarrow OD = 30 \text{ mm}$;
- *Lunghezza totale della piastra* $\rightarrow L_t = 120 \text{ mm}$;
- *Dimensione caratteristica dell'intaglio* $\rightarrow a = 1 \div 14 \text{ mm}$;
- *Angolo di apertura dell'intaglio* $\rightarrow 2\alpha = [90^\circ; 120^\circ; 135^\circ; 150^\circ]$.

4.4.2 - Mesh ottenute tramite l'approccio NSIF

In questa parte dell'elaborato si riportano le mesh ottenute utilizzando l'approccio NSIF; anche in questo caso si è sfruttato il programma automatico per ricercare il numero massimo dei refine applicabili per ogni singola geometria prima di ottenere il messaggio d'errore da parte di Ansys® causato dal raggiungimento della più piccola dimensione

d'elemento gestibile per quella geometria. Si riportano di seguito alcuni esempi di mesh, ottenute con questo approccio, al variare dell'angolo d'apertura dell'intaglio.

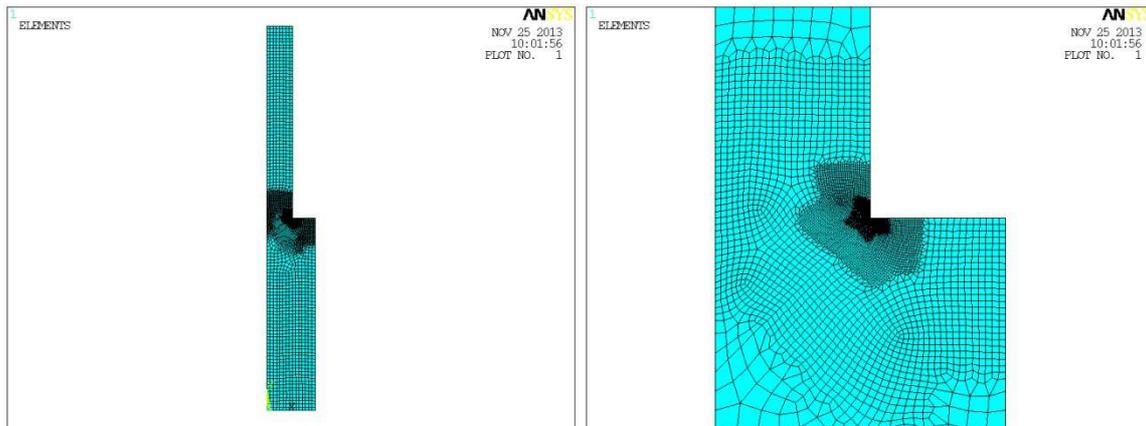


Figura 4.186: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 90° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

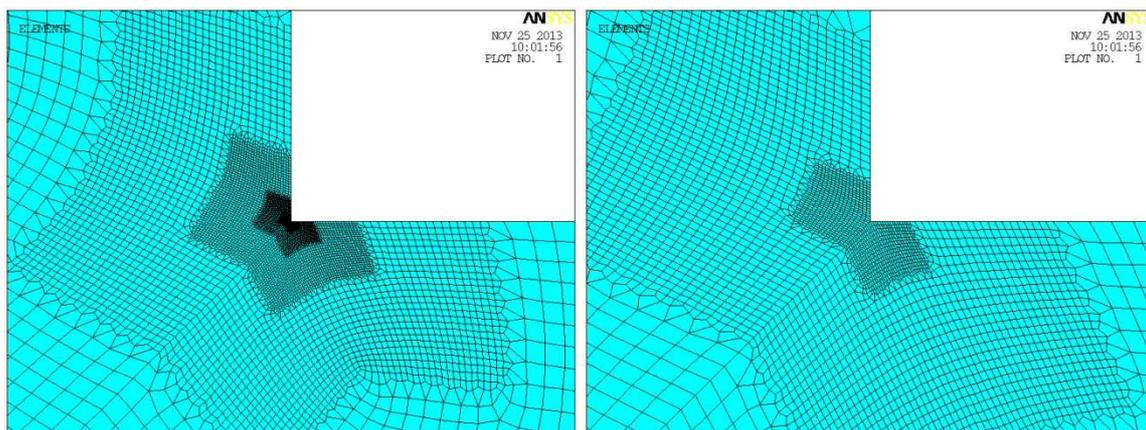


Figura 4.187: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

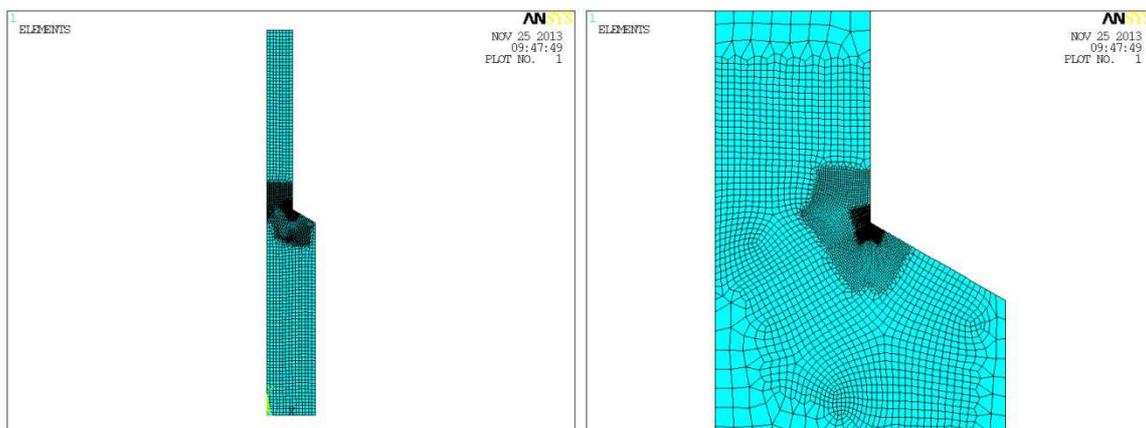


Figura 4.188: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 120° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

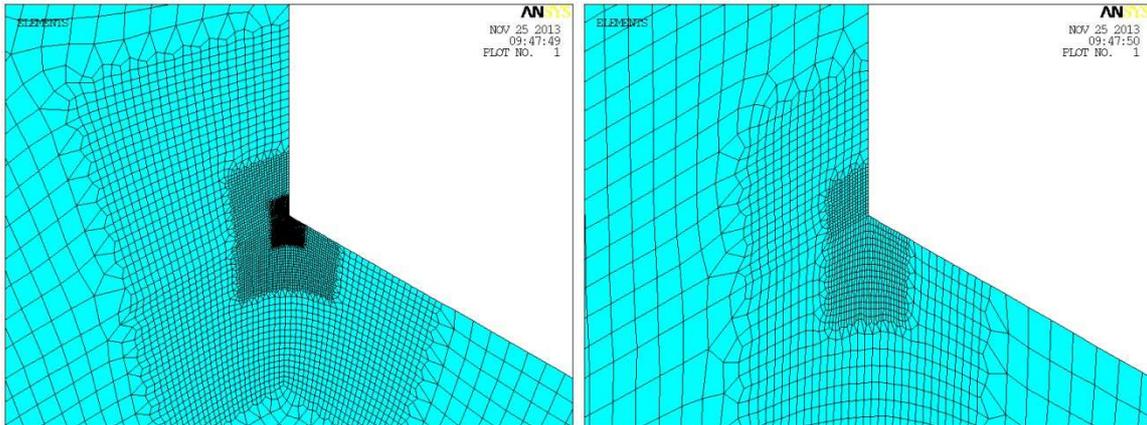


Figura 4.189: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

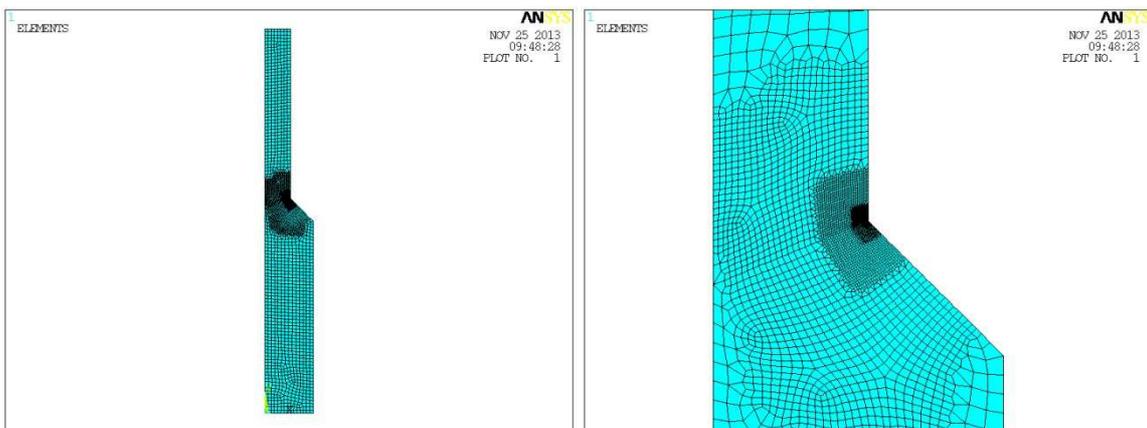


Figura 4.190: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 135° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

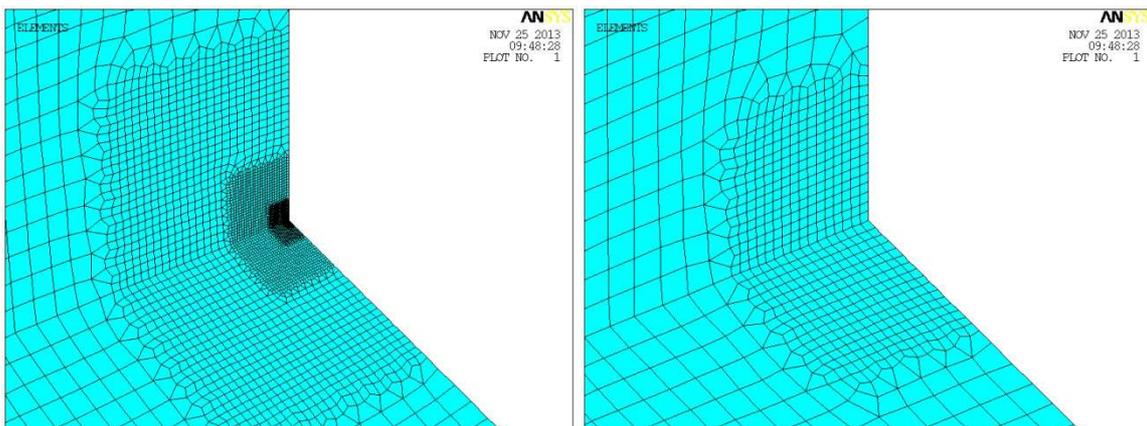


Figura 4.191: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

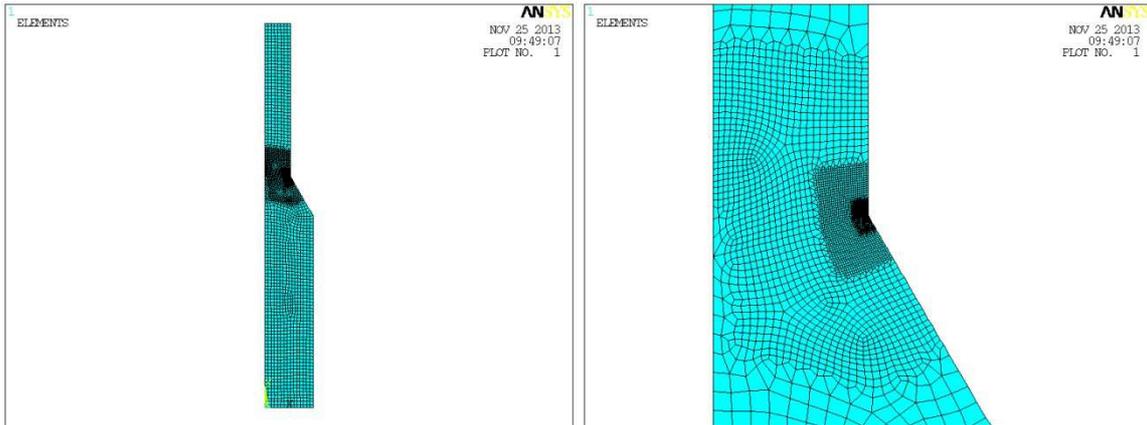


Figura 4.192: Mesh ottenuta nel caso d'applicazione del metodo NSIF per un intaglio di dimensione caratteristica pari a 7 mm, un angolo d'apertura dello stesso pari a 150° e una global element size pari a 1 mm. A destra è riportato un ingrandimento della stessa.

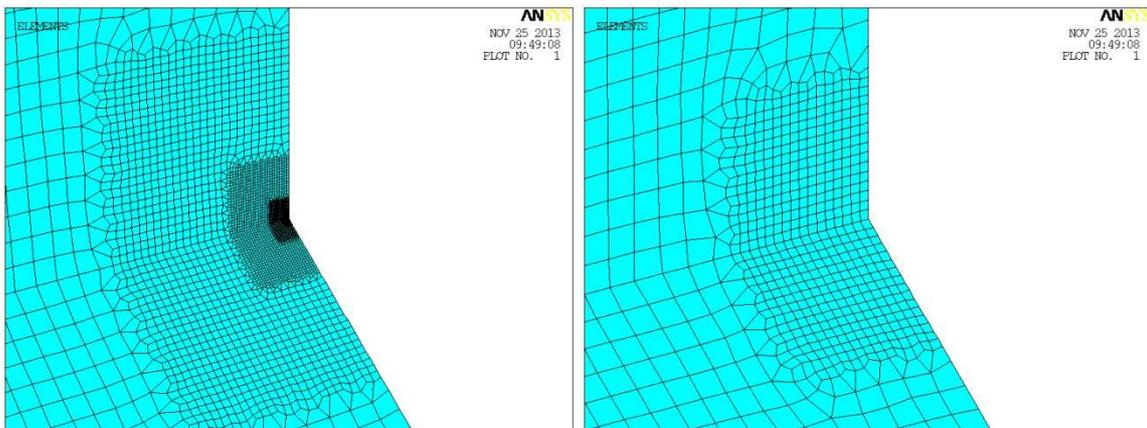


Figura 4.193: Ulteriori ingrandimenti della mesh riferita al caso della precedente figura. A destra si possono vedere gli elementi di dimensione più piccola.

4.4.3 - Risultati ottenuti tramite l'approccio NSIF

In questa sezione s'intendono riassumere tutti i risultati significativi ottenuti utilizzando il metodo NSIF; ogni tabella e ogni diagramma sono riferiti a un singolo grado d'apertura.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.5}]	x^* [mm]
90	1	2.134	1.205744
90	2	3.064	1.2336
90	3	4.117	0.685409
90	4	5.424	0.546097
90	5	7.17	0.468511
90	6	9.648	0.403827
90	7	13.327	0.359159
90	8	19.103	0.3183
90	9	28.907	0.2762
90	10	46.947	0.232443
90	11	85.415	0.179186
90	12	183.6	0.133557
90	13	539.15	0.09579
90	14	3478	0.045078

Tabella 4.97: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 90°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.455}]	x^* [mm]
120	1	2.606	4.071743
120	2	3.622455	0.675015
120	3	4.697	0.58103
120	4	6.093	0.530634
120	5	8.032	0.459783
120	6	10.83167	0.396237
120	7	15.02	0.35937
120	8	21.7	0.3117
120	9	33.153	0.263873
120	10	54.77	0.221058
120	11	101.167	0.17875
120	12	223.2	0.134203
120	13	678.45	0.092855
120	14	4630	0.041615

Tabella 4.98: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 120°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.429}]	x^* [mm]
135	1	2.863	1.520172
135	2	3.824	0.642558
135	3	4.942	0.534275
135	4	6.39	0.489065
135	5	8.412	0.428636
135	6	11.315	0.394163
135	7	15.74	0.357917
135	8	22.92	0.299079
135	9	35.34	0.250165
135	10	58.84	0.212979
135	11	110.1	0.167339
135	12	246.1	0.129847
135	13	764.9	0.091842
135	14	5329	0.044539

Tabella 4.99: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 135°.

Angolo apertura 2α [°]	Profondità intaglio a [mm]	$\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ [mm ^{0.4}]	x^* [mm]
150	1	3.068	0.767261
150	2	3.974	0.58964
150	3	5.0645	0.541937
150	4	6.523	0.500871
150	5	8.596	0.440459
150	6	11.62538	0.393255
150	7	16.24	0.367409
150	8	23.78	0.331978
150	9	36.94	0.292611
150	10	62.257	0.22387
150	11	117.55	0.187167
150	12	268	0.136216
150	13	853.4	0.093244
150	14	6182	0.046135

Tabella 4.100: Risultati in termini di NSIFs e d'estensione del campo locale di tensione ricavati numericamente per un angolo d'apertura pari a 150°.

Si vuole ora riassumere i risultati riportati nelle tabelle 4.97-4.100 in opportuni grafici; il primo di questi riporta l'andamento del $\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ in funzione della dimensione dell'intaglio per ogni caso analizzato.

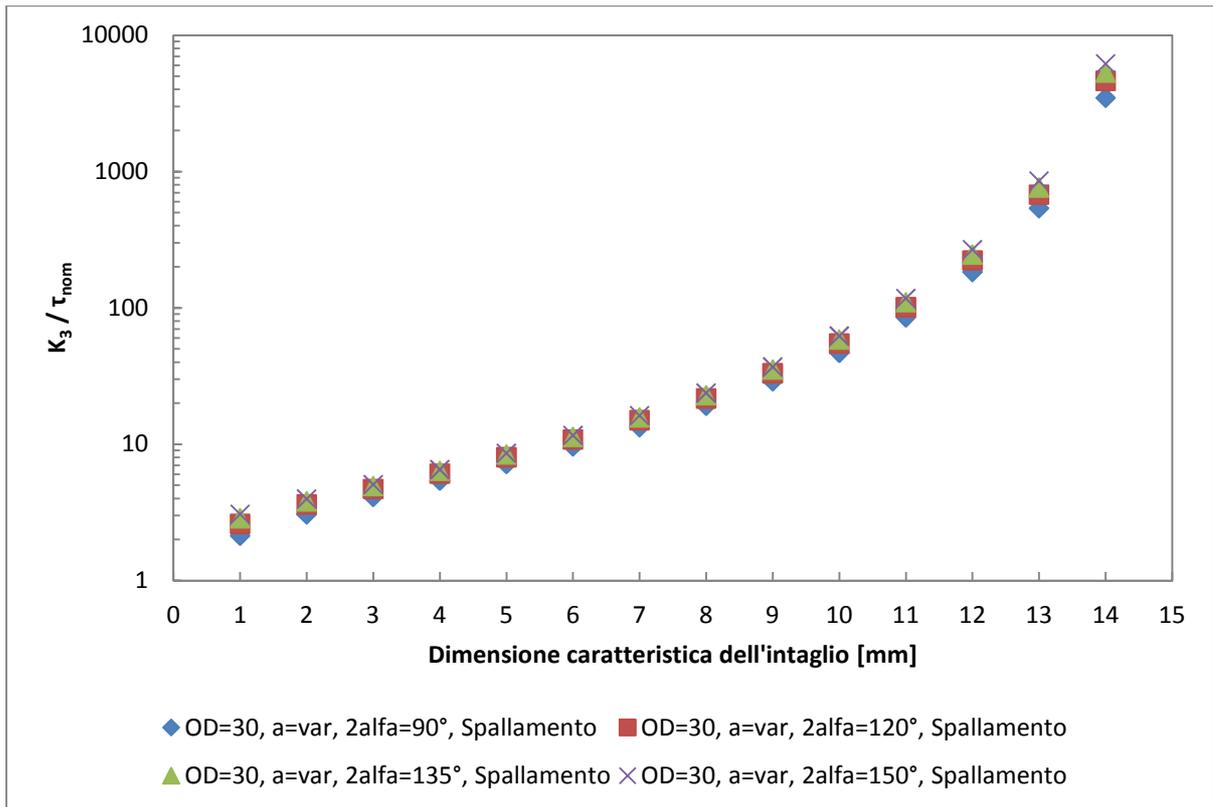


Figura 4.194: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} in funzione della dimensione caratteristica dell'intaglio. Ogni curva si riferisce ad un diverso grado d'apertura dell'intaglio.

Valgono ancora tutte le considerazioni svolte all'interno del paragrafo 4.3.3 riguardo all'andamento delle curve in funzione della dimensione caratteristica dell'intaglio; si noti ancora una volta che, a causa della variazione dell'angolo d'apertura dello spallamento, il confronto in termini di $\frac{K_3}{\tau_{nom}}$ può essere svolto solo confrontando il modulo del rapporto poiché le unità di misura variano.

Si riportano di seguito i campi di tensione e l'andamento dell'NSIF di modo III calcolati numericamente per ogni angolo d'apertura dell'intaglio.

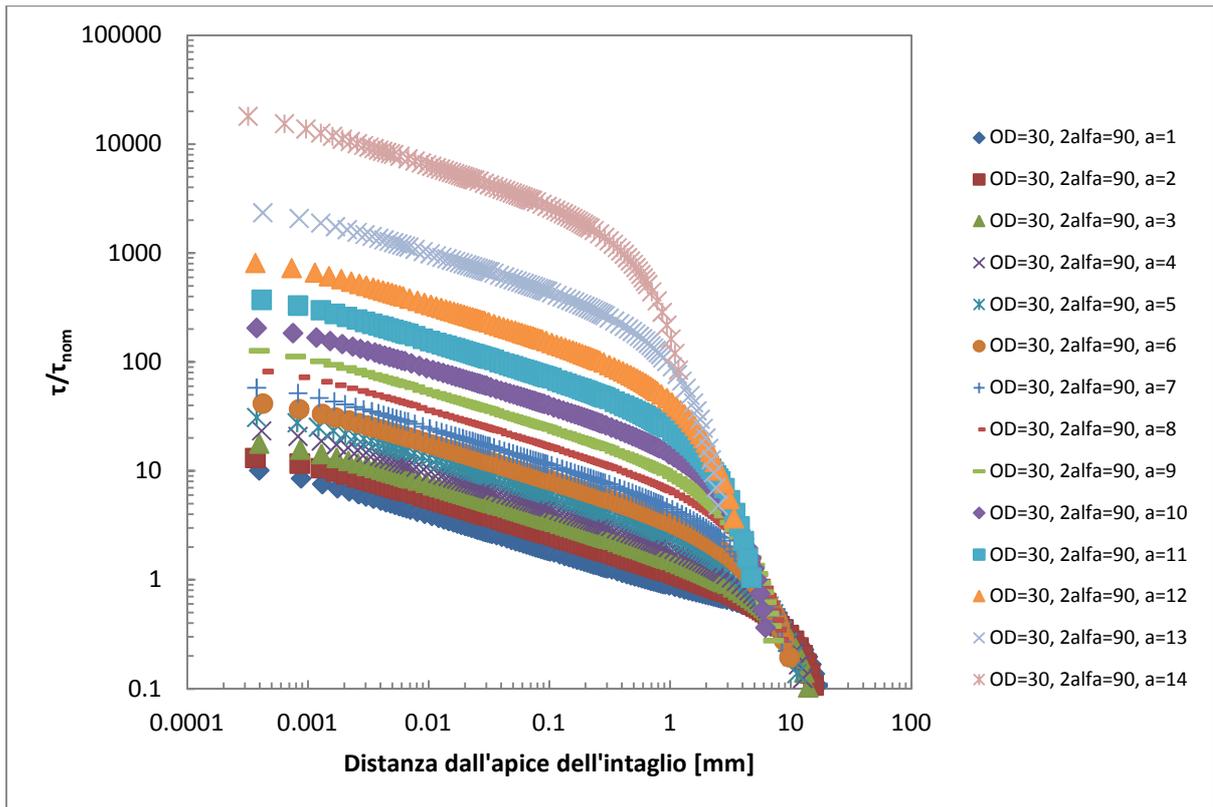


Figura 4.195: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 90°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

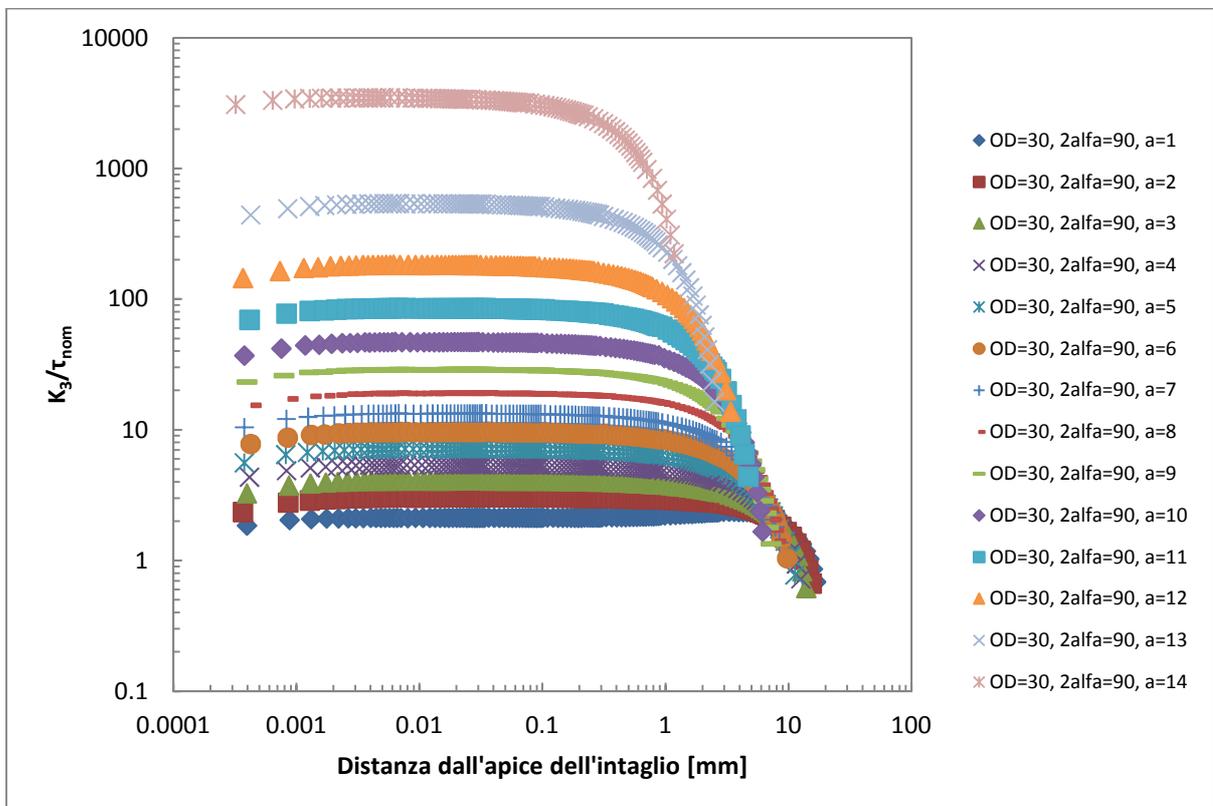


Figura 4.196: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

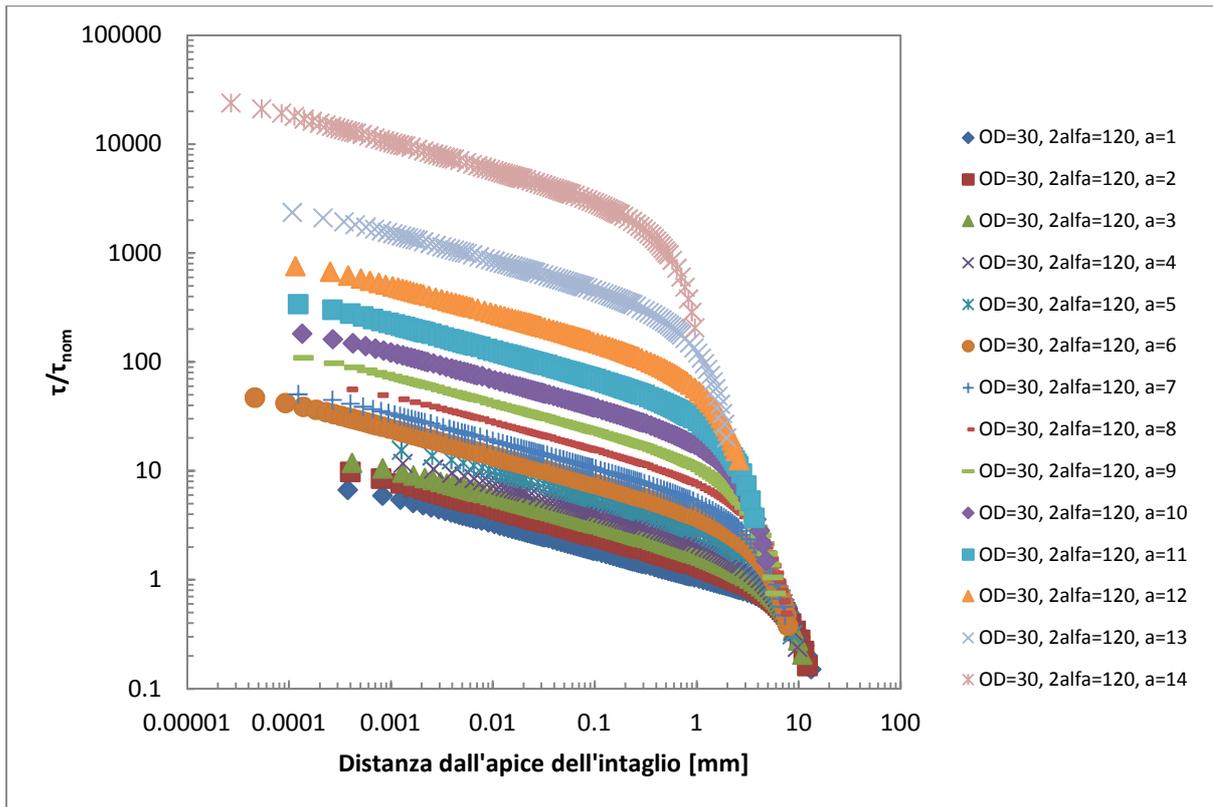


Figura 4.197: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 120°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

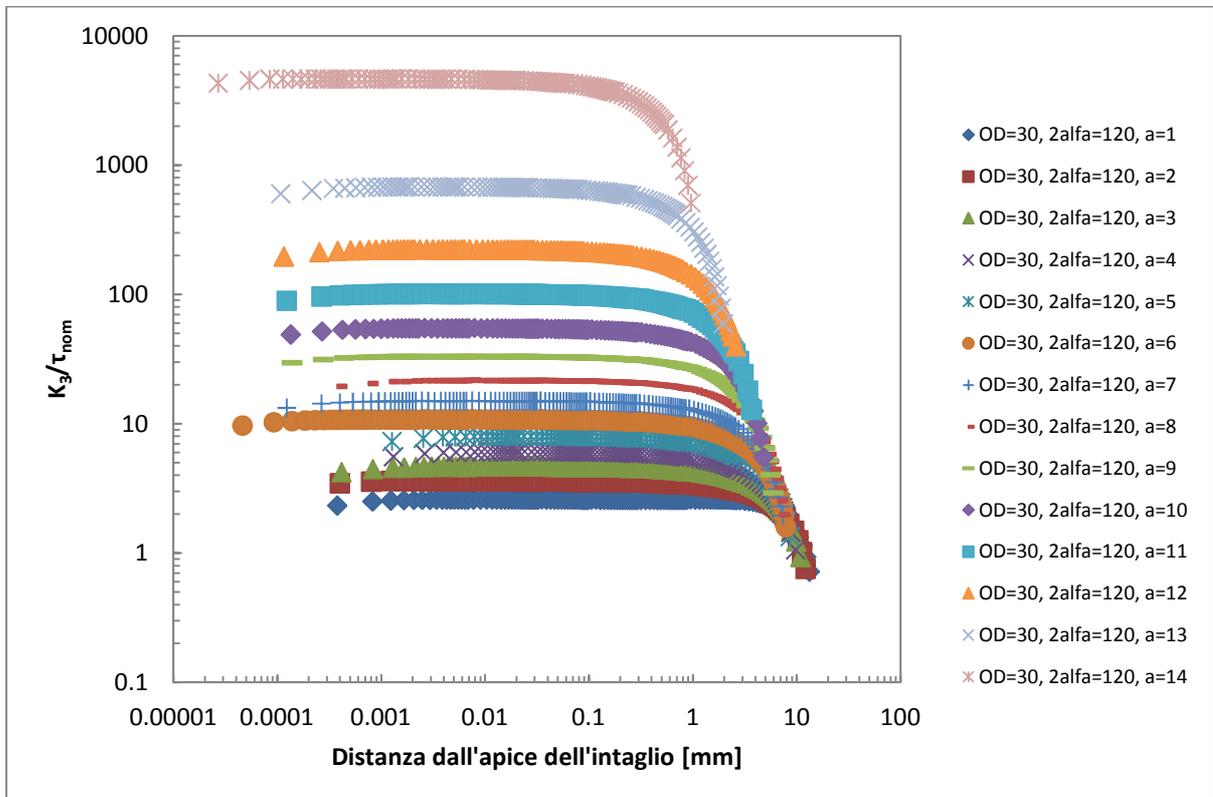


Figura 4.198: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

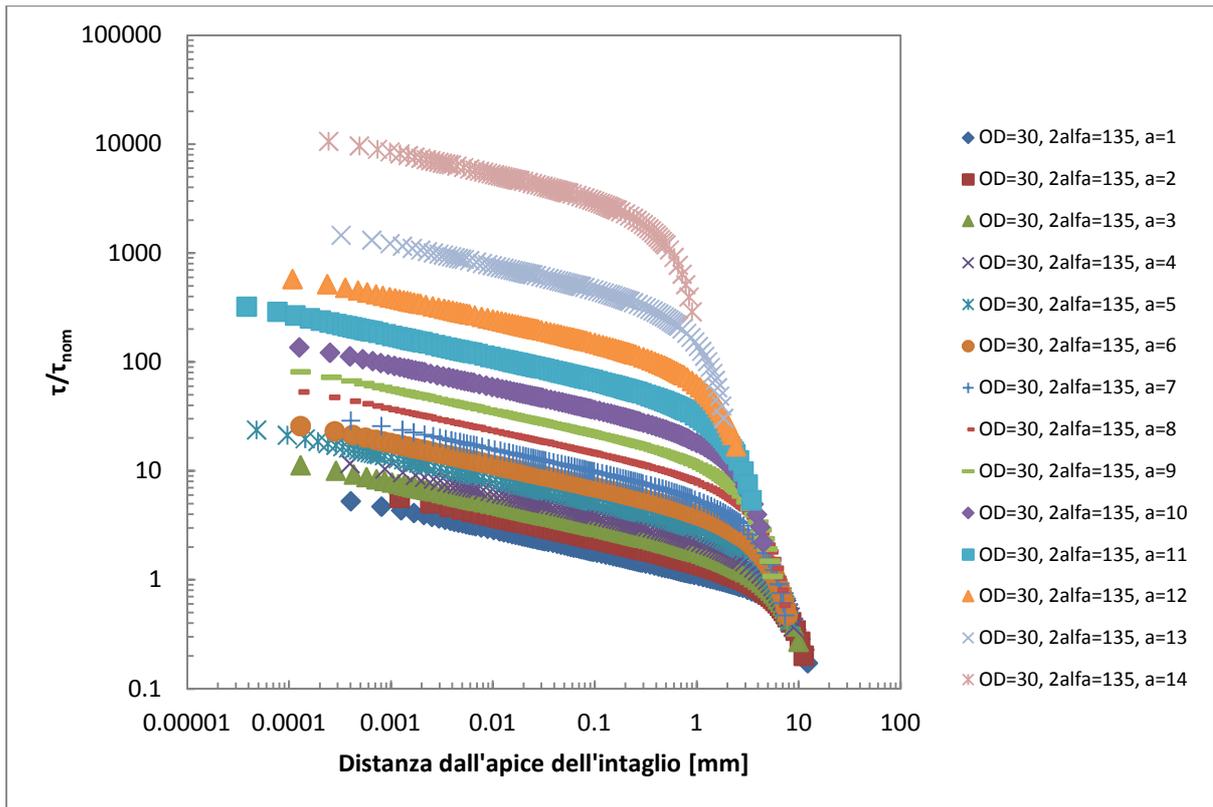


Figura 4.199: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 135°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

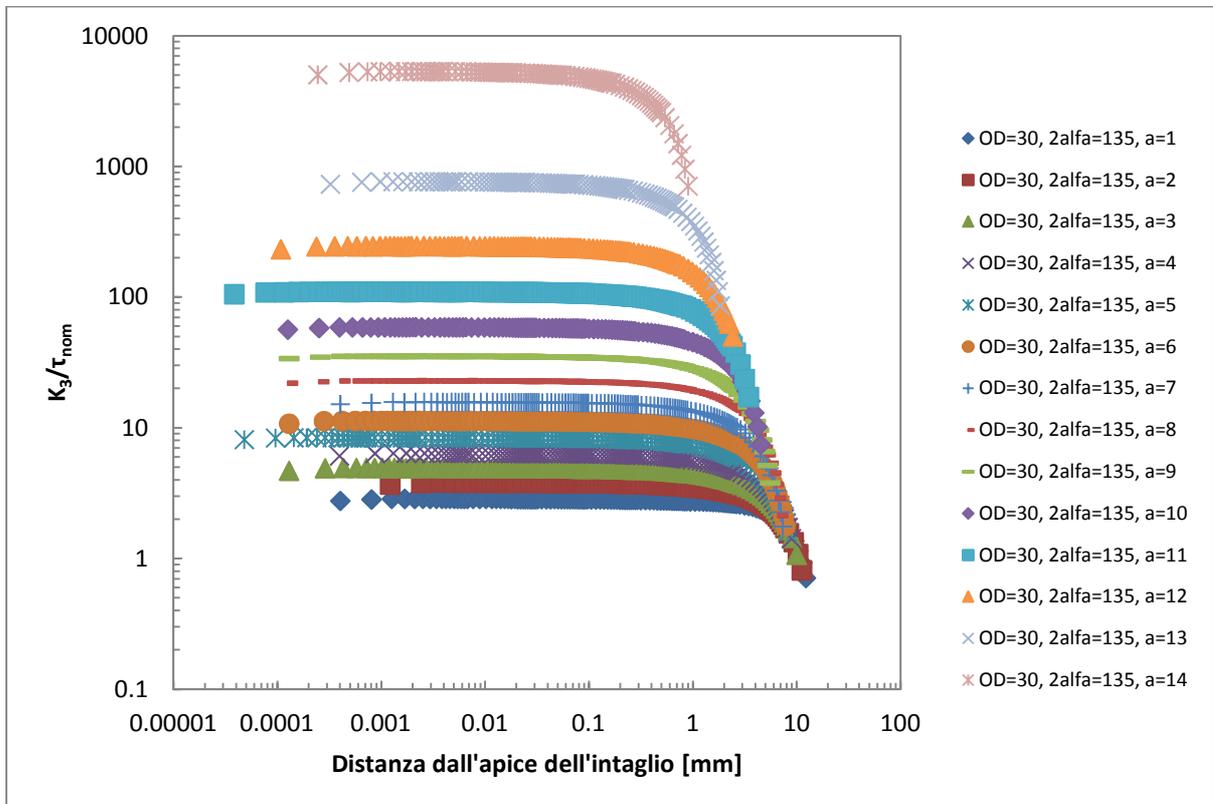


Figura 4.200: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

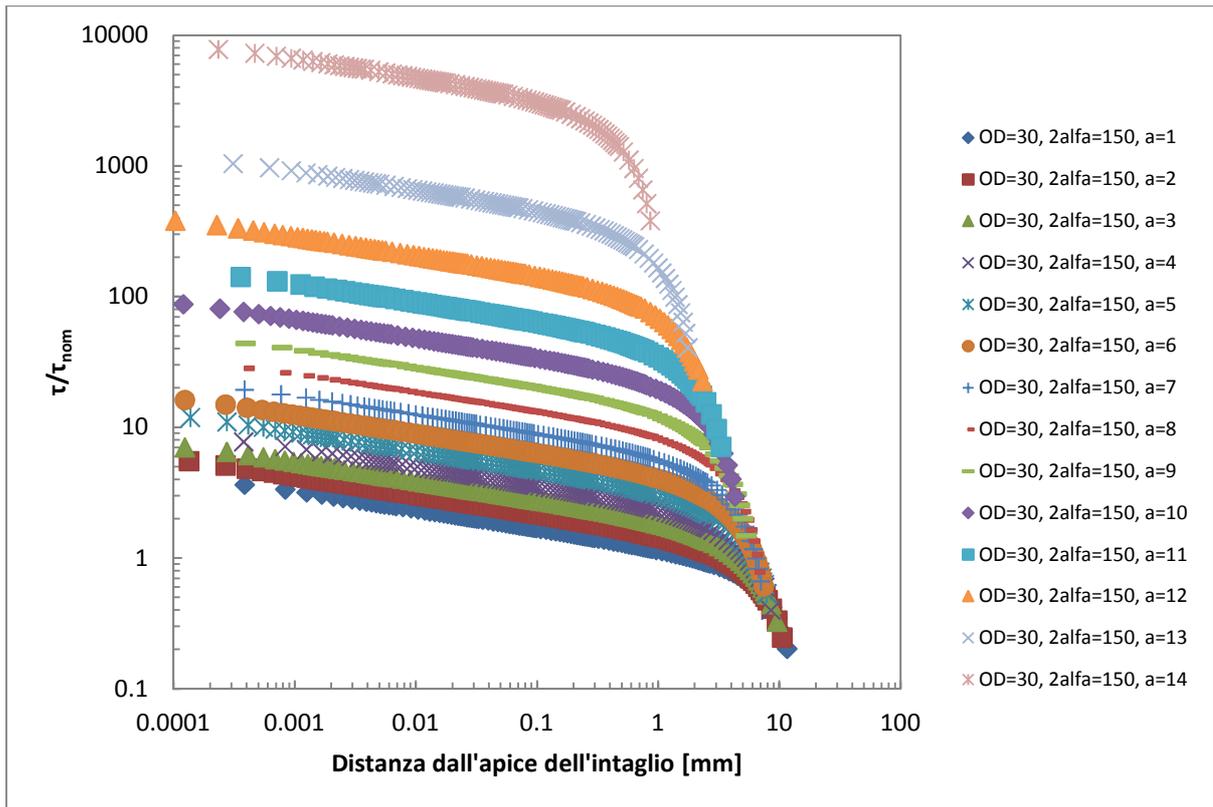


Figura 4.201: Andamento del campo locale della tensione tangenziale di strappo nel caso di geometria con angolo d'apertura pari a 150°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

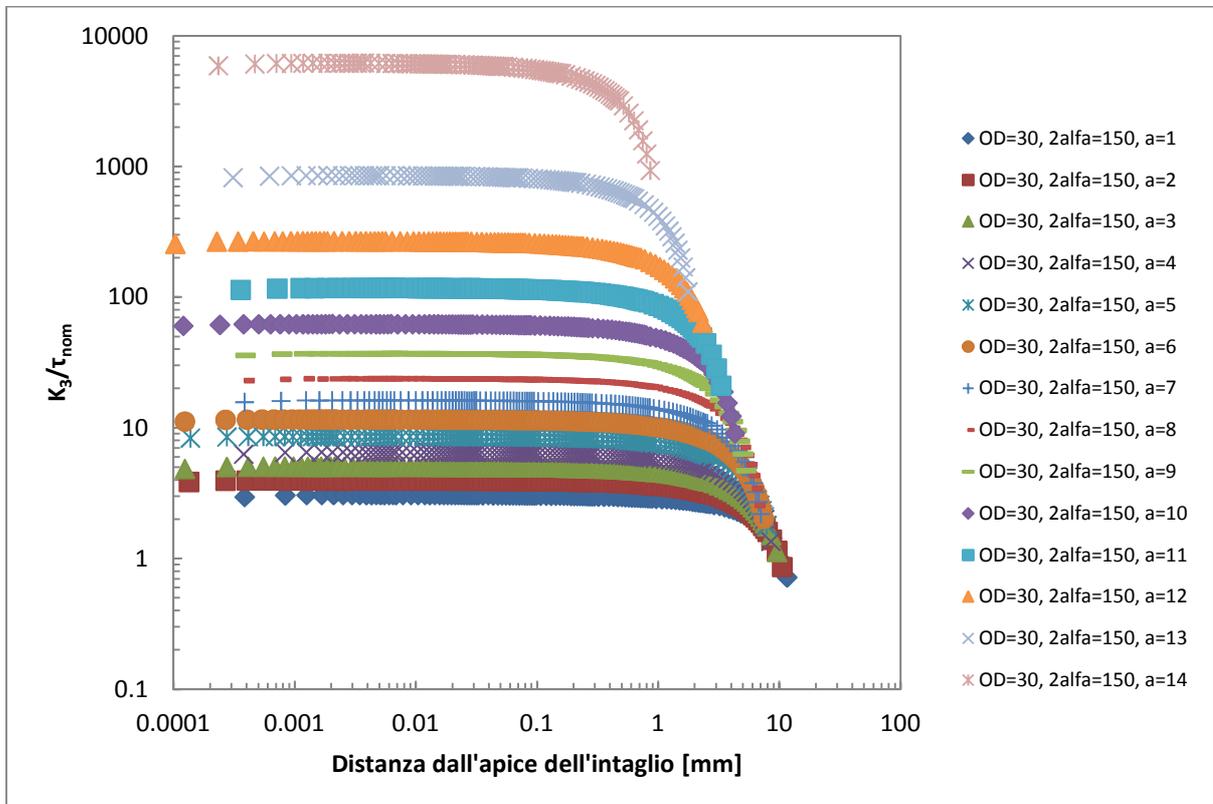


Figura 4.202: Andamento del rapporto K_3/τ_{nom} nel caso di geometria con angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°. Ogni curva si riferisce ad una diversa dimensione caratteristica dell'intaglio.

In termini di estensione del campo di tensione locale al variare della dimensione caratteristica dell'intaglio si ha:

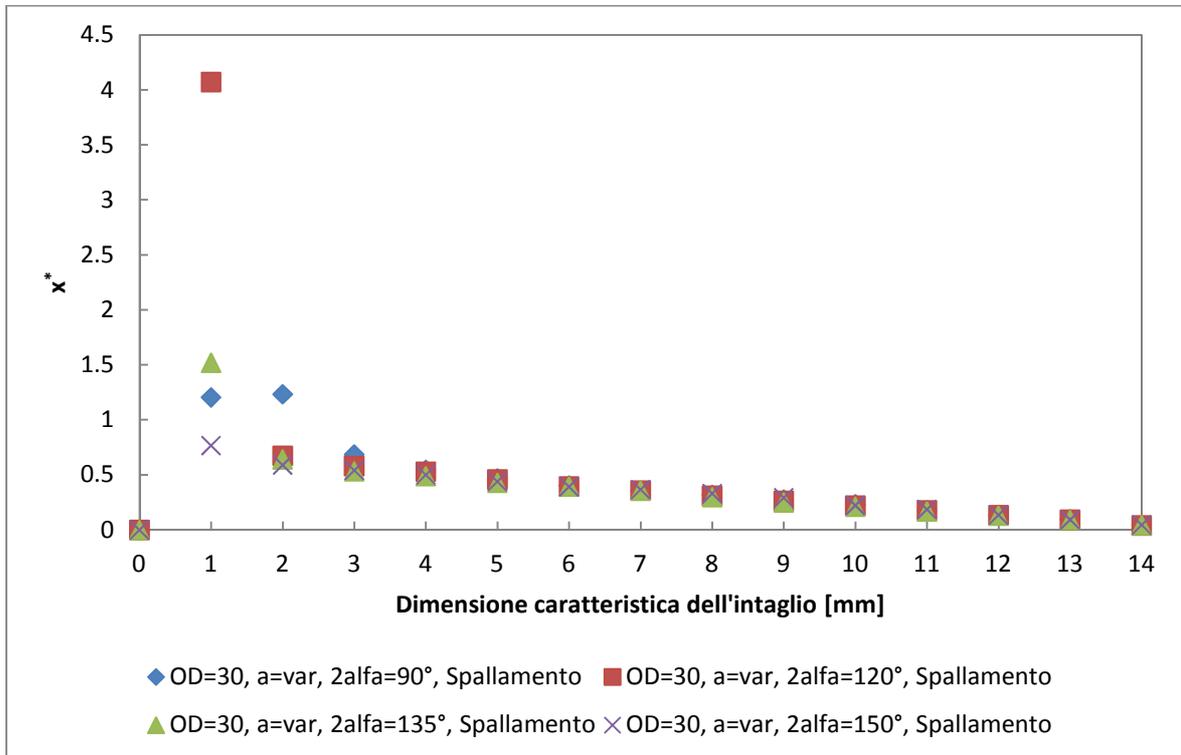


Figura 4.203: Andamento dell'estensione del campo locale di tensione calcolato numericamente x^* in funzione della dimensione caratteristica dell'intaglio. Ogni curva si riferisce ad un diverso grado d'apertura dell'intaglio.

Ancora una volta si può affermare l'andamento dell'estensione del campo di tensione in funzione della dimensione caratteristica dell'intaglio è funzione della discretizzazione con la quale si svolgono le analisi; anche in questo caso si osserva il comportamento atteso di iniziale aumento dell'estensione come descritto dalla teoria e successivo calo della stessa causato dall'interazione tra i due campi locali di tensione relativi ai due apici dell'intaglio stesso, che si affacciano in posizione diametralmente opposte.

Valgono ancora una volta tutte le considerazioni svolte all'interno del paragrafo 4.3.3.

4.4.4 - Mesh PSM non controllata

In questa parte si riporta quanto ottenuto dall'applicazione del PSM per la geometria in esame e con l'ausilio di mesh non controllate. La filosofia alla base di questa tipologia di mesh consiste nel lanciare la creazione della stessa senza preoccuparsi del suo layout nelle

zone vicine all'apice dell'intaglio che, si ricorda, è molto importante per la corretta applicazione del PSM.

4.4.4.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Per un'esaustiva descrizione del programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi in questione si faccia riferimento al paragrafo 4.1.2.1; infatti, il programma utilizzato in questo caso ha gli stessi input e le stesse peculiarità di quello utilizzato nel caso di provino circolare con intagli esterni, l'unica differenza sta nel corpo del programma stesso che realizza una geometria differente rispetto al caso precedente.

4.4.4.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

Si riportano di seguito alcuni esempi delle mesh ottenute attraverso questa modalità di procedere; ancora una volta in questo modo il layout della mesh, a parità di global element size, varia al variare della profondità dell'intaglio, creando una fonte di dispersione arbitraria. Per questo motivo è necessario adottare un metodo per il controllo del layout della mesh come già descritto in precedenza.

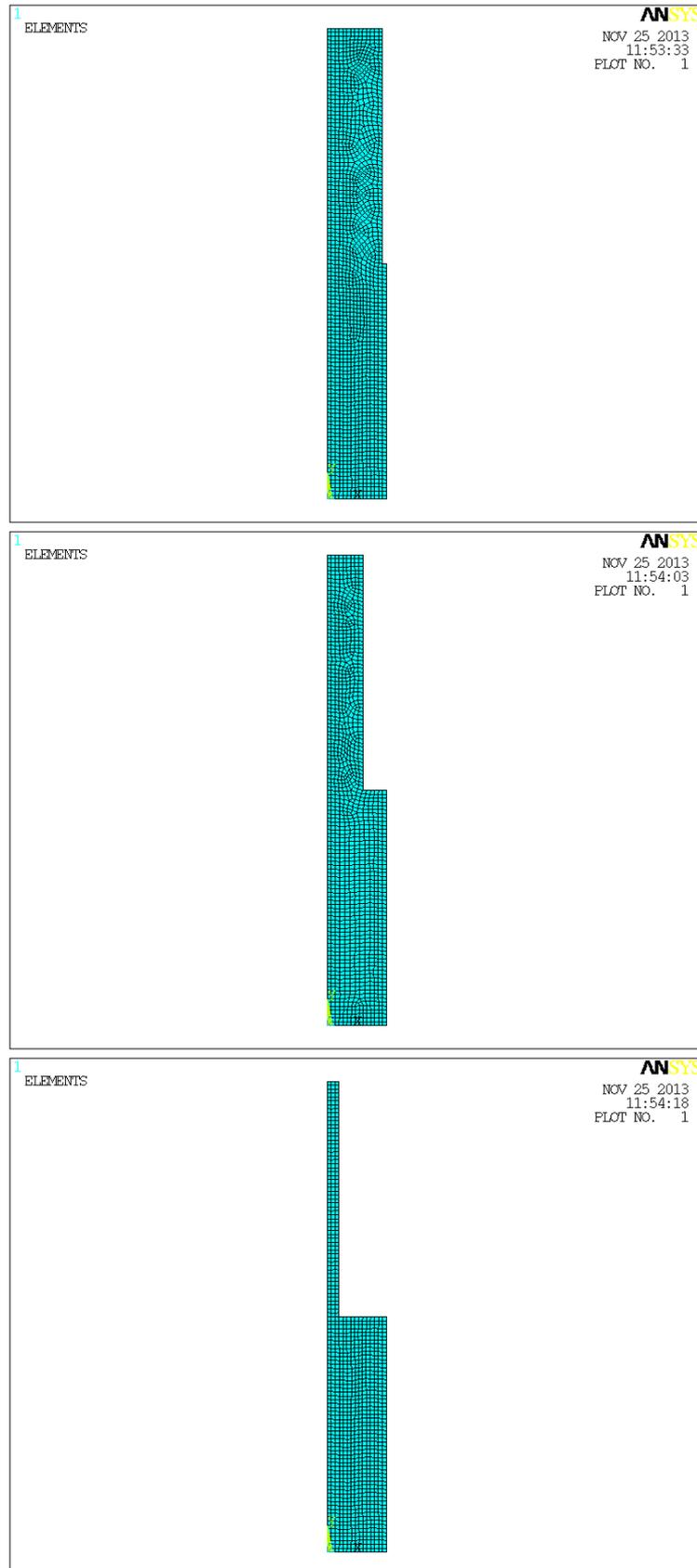


Figura 4.204: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

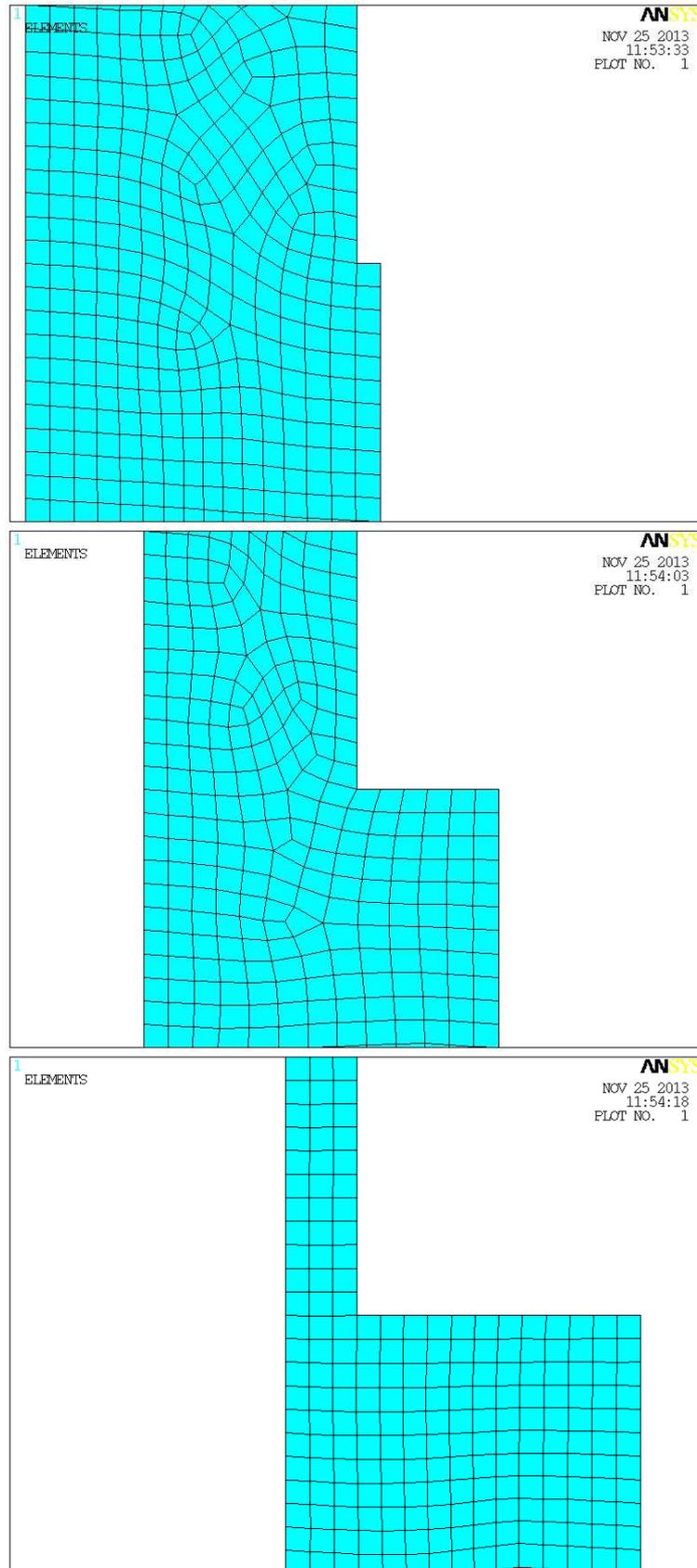


Figura 4.205: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'incisione. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'incisione $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un'incisione di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

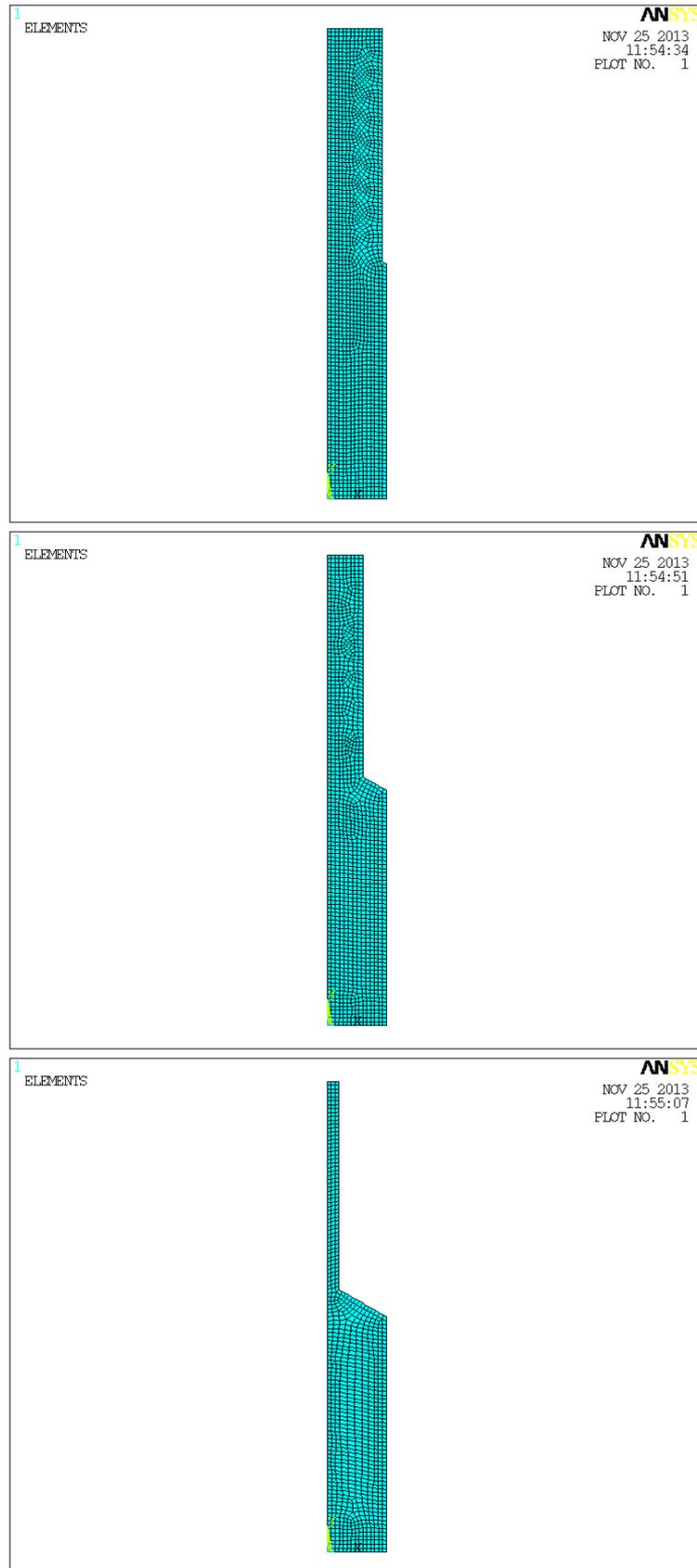


Figura 4.206: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

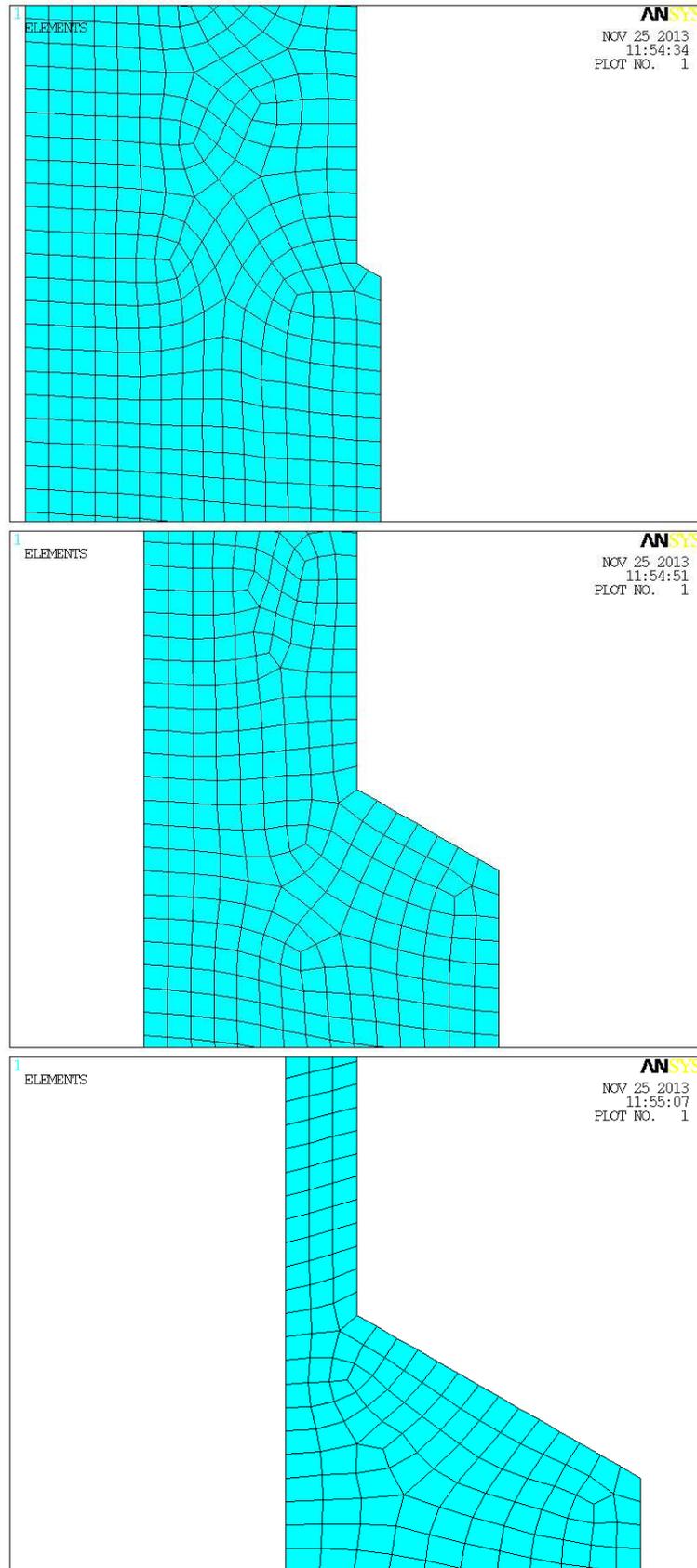


Figura 4.207: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

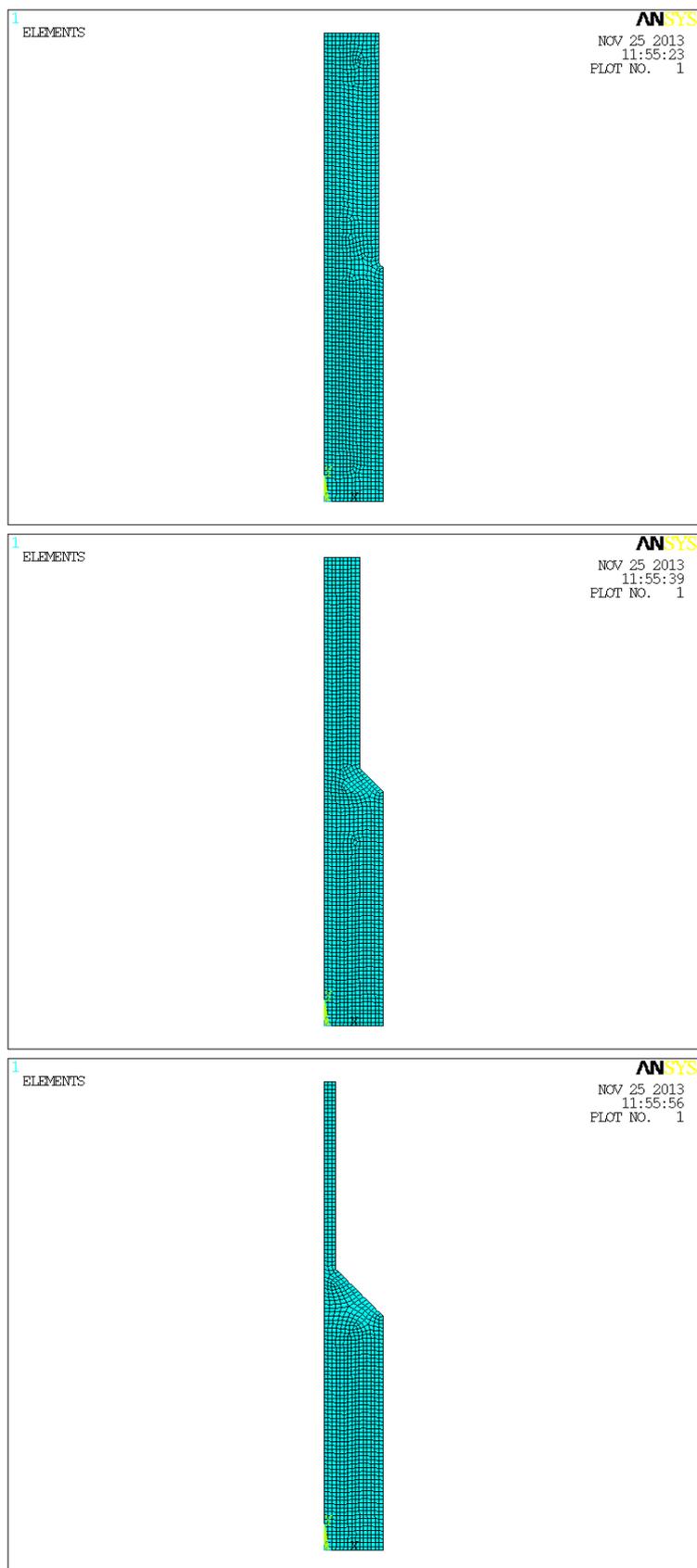


Figura 4.208: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

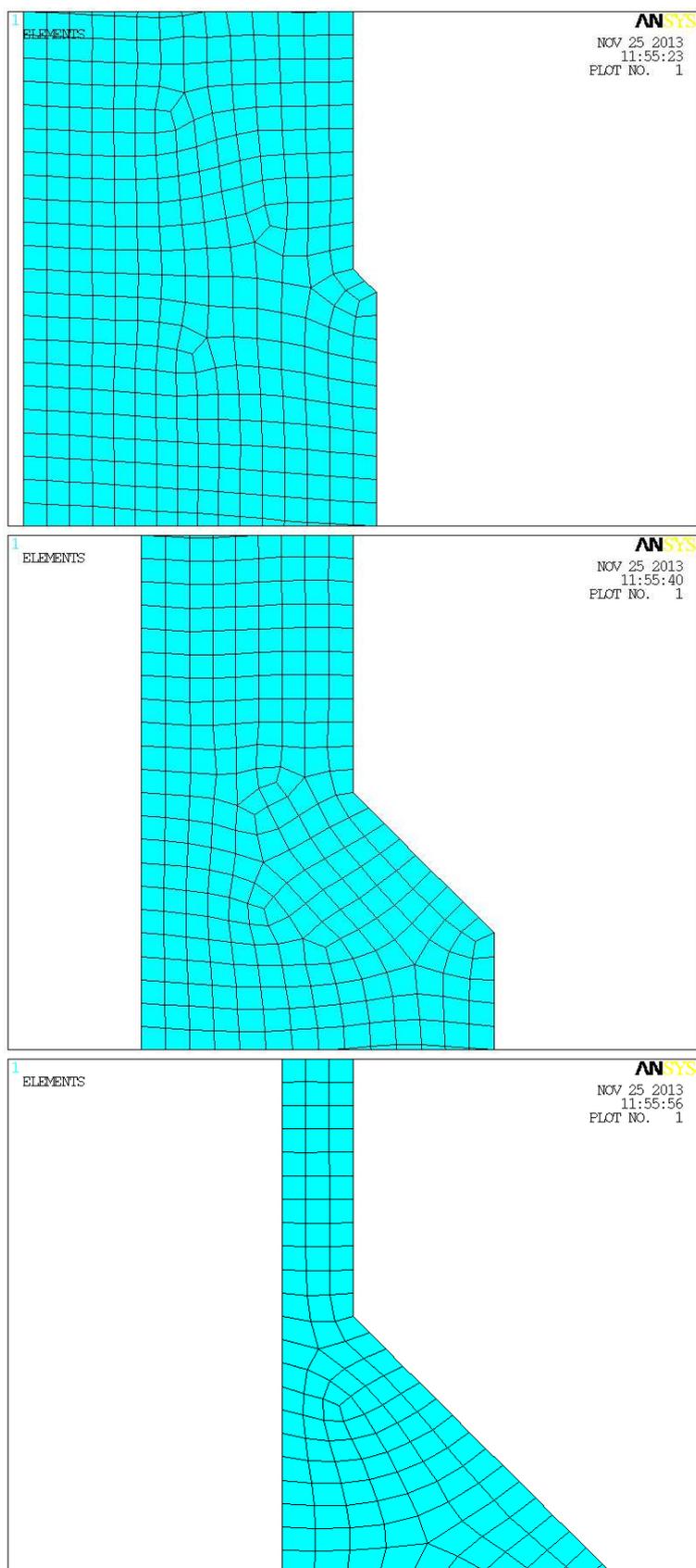


Figura 4.209: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

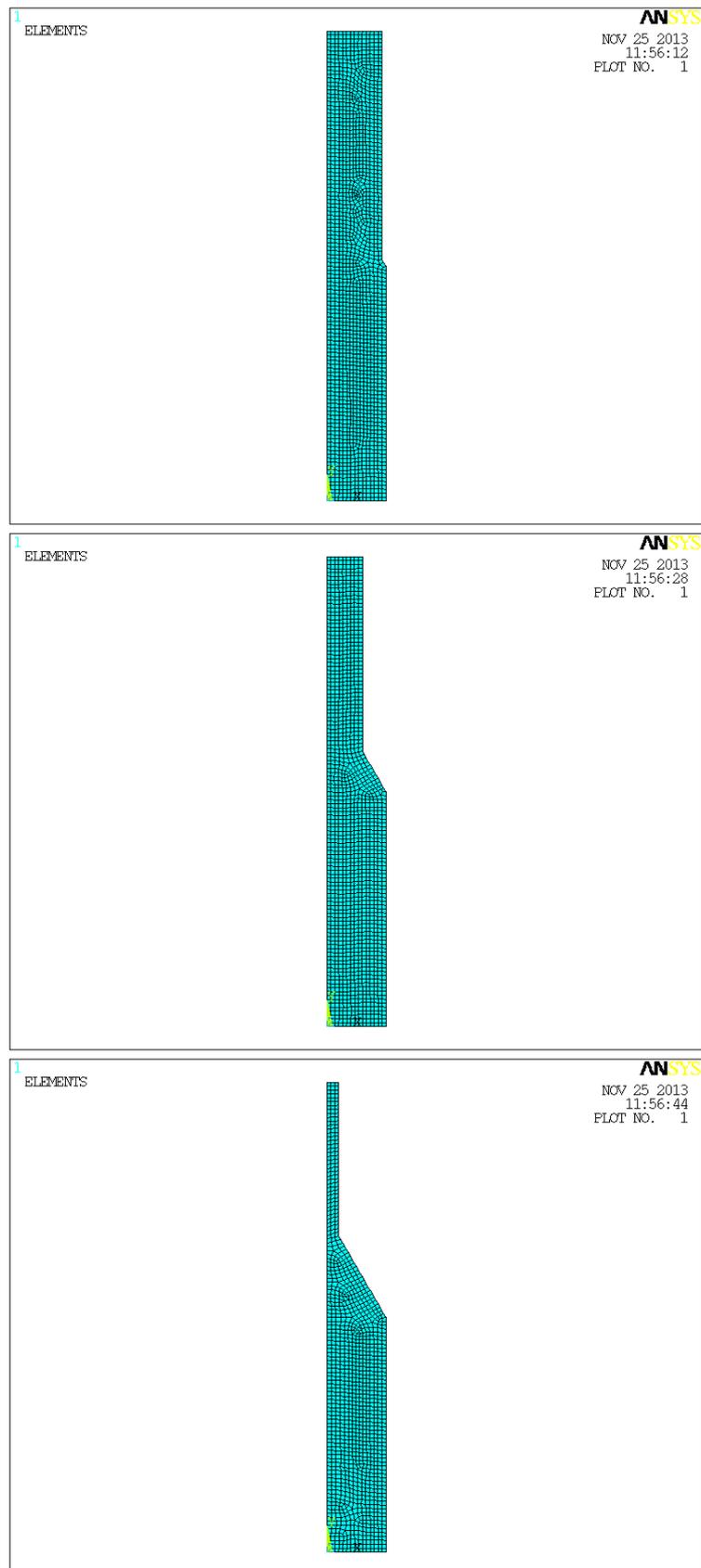


Figura 4.210: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio non controllato. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

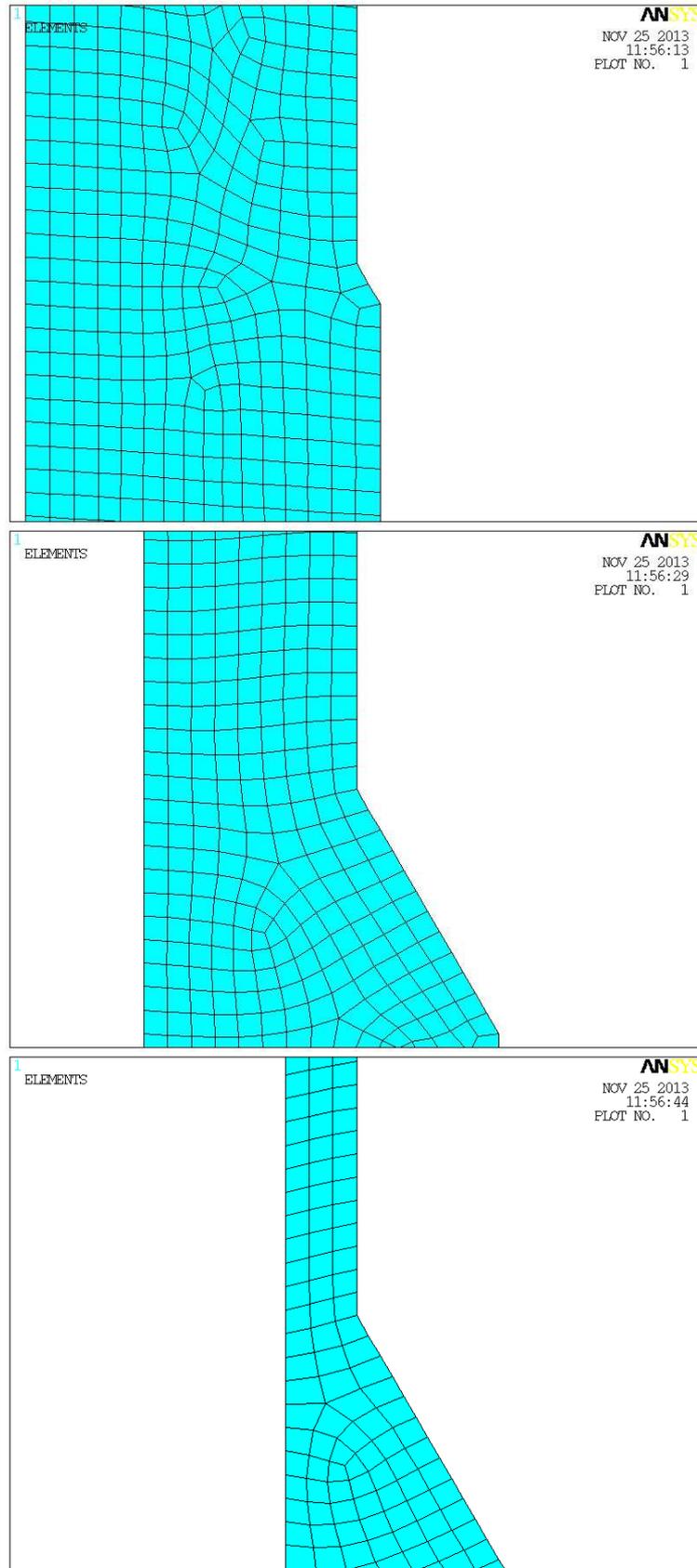


Figura 4.211: Vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio non controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 1 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

4.4.4.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

Per quanto riguarda il PSM, l'intera batteria d'analisi ricalca come modo di procedere quanto già descritto in precedenza.

Si elencano di seguito i parametri presi in esame nel presente lavoro:

- Angoli d'apertura: 90°; 120°; 135°; 150°.
- Dimensioni globali d'elemento: 0.5 mm; 0.4 mm; 0.3 mm; 0.2 mm; 0.1 mm.
- Dimensioni caratteristiche dell'intaglio: da 1 a 14 mm con passo 1 mm.

L'intera batteria d'analisi espressa in termini del parametro adimensionale "a/d" è riportata nella seguente tabella:

d [mm]	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
a [mm]	a/d				
1	2	2.5	3.333333	5	10
2	4	5	6.666667	10	20
3	6	7.5	10	15	30
4	8	10	13.333333	20	40
5	10	12.5	16.666667	25	50
6	12	15	20	30	60
7	14	17.5	23.333333	35	70
8	16	20	26.666667	40	80
9	18	22.5	30	45	90
10	20	25	33.333333	50	100
11	22	27.5	36.666667	55	110
12	24	30	40	60	120
13	26	32.5	43.333333	65	130
14	28	35	46.666667	70	140

Tabella 4.101: Valori del parametro adimensionale a/d per i vari casi analizzati.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal PSM riassumendo in ogni tabella una singola global element size; si è preferito suddividere i risultati riferiti ad ogni angolo d'apertura dell'intaglio in diversi sottoparagrafi.

In tutte le tabelle riportate si noti che:

- a è la dimensione dell'intaglio;

- d è la dimensione globale d'elemento imposta;
- x^* è l'estensione del campo locale di tensione valuta numericamente come già descritto;
- τ_{peak} è la tensione di picco misurata all'apice dell'intaglio e intesa come una τ_{yz} , dove y è la direzione ortogonale alla bisettrice dell'intaglio e z quella uscente dal piano 2D;
- K_{FE}^{***} è il valore adimensionale calcolato numericamente tramite la (1.6).

4.4.4.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	1.206	2.411	11.736	1.174	1.858
2	4	1.234	2.467	13.489	1.349	1.862
3	6	0.685	1.371	14.284	1.428	1.856
4	8	0.546	1.092	14.328	1.433	1.878
5	10	0.469	0.937	14.227	1.423	1.883
6	12	0.404	0.808	13.897	1.390	1.888
7	14	0.359	0.718	13.386	1.339	1.905
8	16	0.318	0.637	13.075	1.308	1.870
9	18	0.276	0.552	12.227	1.223	1.904
10	20	0.232	0.465	11.768	1.177	1.861
11	22	0.179	0.358	10.622	1.062	1.922
12	24	0.134	0.267	9.7061	0.971	1.907
13	26	0.096	0.192	8.1072	0.811	1.986
14	28	0.045	0.090	5.6335	0.563	2.306

Tabella 4.102: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	1.206	3.014	13.441	1.344	1.748
2	5	1.234	3.084	14.719	1.472	1.838
3	7.5	0.685	1.714	15.486	1.549	1.844
4	10	0.546	1.365	15.882	1.588	1.825
5	12.5	0.469	1.171	15.679	1.568	1.840
6	15	0.404	1.010	15.02	1.502	1.881
7	17.5	0.359	0.898	14.809	1.481	1.855
8	20	0.318	0.796	13.881	1.388	1.898
9	22.5	0.276	0.691	13.442	1.344	1.866
10	25	0.232	0.581	12.371	1.237	1.907
11	27.5	0.179	0.448	11.347	1.135	1.938
12	30	0.134	0.334	10.478	1.048	1.903
13	32.5	0.096	0.239	8.9366	0.894	1.941
14	35	0.045	0.113	6.5498	0.655	2.136

Tabella 4.103: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	1.206	4.019	14.346	1.435	1.802
2	6.666666667	1.234	4.112	16.615	1.662	1.792
3	10	0.685	2.285	16.929	1.693	1.857
4	13.33333333	0.546	1.820	16.651	1.665	1.916
5	16.66666667	0.469	1.562	16.978	1.698	1.871
6	20	0.404	1.346	16.979	1.698	1.832
7	23.33333333	0.359	1.197	16.339	1.634	1.850
8	26.66666667	0.318	1.061	15.625	1.563	1.856
9	30	0.276	0.921	14.935	1.494	1.848
10	33.33333333	0.232	0.775	13.695	1.370	1.896
11	36.66666667	0.179	0.597	12.663	1.266	1.911
12	40	0.134	0.445	10.967	1.097	2.001
13	43.33333333	0.096	0.319	10.41	1.041	1.834
14	46.66666667	0.045	0.150	7.2893	0.729	2.113

Tabella 4.104: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	1.206	6.029	16.057	1.606	1.843
2	10	1.234	6.168	18.418	1.842	1.850
3	15	0.685	3.427	19.75	1.975	1.822
4	20	0.546	2.730	19.991	1.999	1.827
5	25	0.469	2.343	19.869	1.987	1.830
6	30	0.404	2.019	19.463	1.946	1.829
7	35	0.359	1.796	18.854	1.885	1.836
8	40	0.318	1.592	18.113	1.811	1.832
9	45	0.276	1.381	17.222	1.722	1.835
10	50	0.232	1.162	16.176	1.618	1.837
11	55	0.179	0.896	14.976	1.498	1.850
12	60	0.134	0.668	13.344	1.334	1.882
13	65	0.096	0.479	11.8	1.180	1.852
14	70	0.045	0.225	8.8915	0.889	1.983

Tabella 4.105: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	1.206	12.057	20.136	2.014	1.852
2	20	1.234	12.336	23.554	2.355	1.823
3	30	0.685	6.854	24.724	2.472	1.833
4	40	0.546	5.461	24.833	2.483	1.853
5	50	0.469	4.685	25.012	2.501	1.831
6	60	0.404	4.038	24.388	2.439	1.839
7	70	0.359	3.592	23.443	2.344	1.860
8	80	0.318	3.183	22.848	2.285	1.830
9	90	0.276	2.762	21.433	2.143	1.858
10	100	0.232	2.324	20.37	2.037	1.838
11	110	0.179	1.792	18.996	1.900	1.837
12	120	0.134	1.336	16.927	1.693	1.870
13	130	0.096	0.958	14.804	1.480	1.860
14	140	0.045	0.451	10.915	1.092	2.035

Tabella 4.106: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

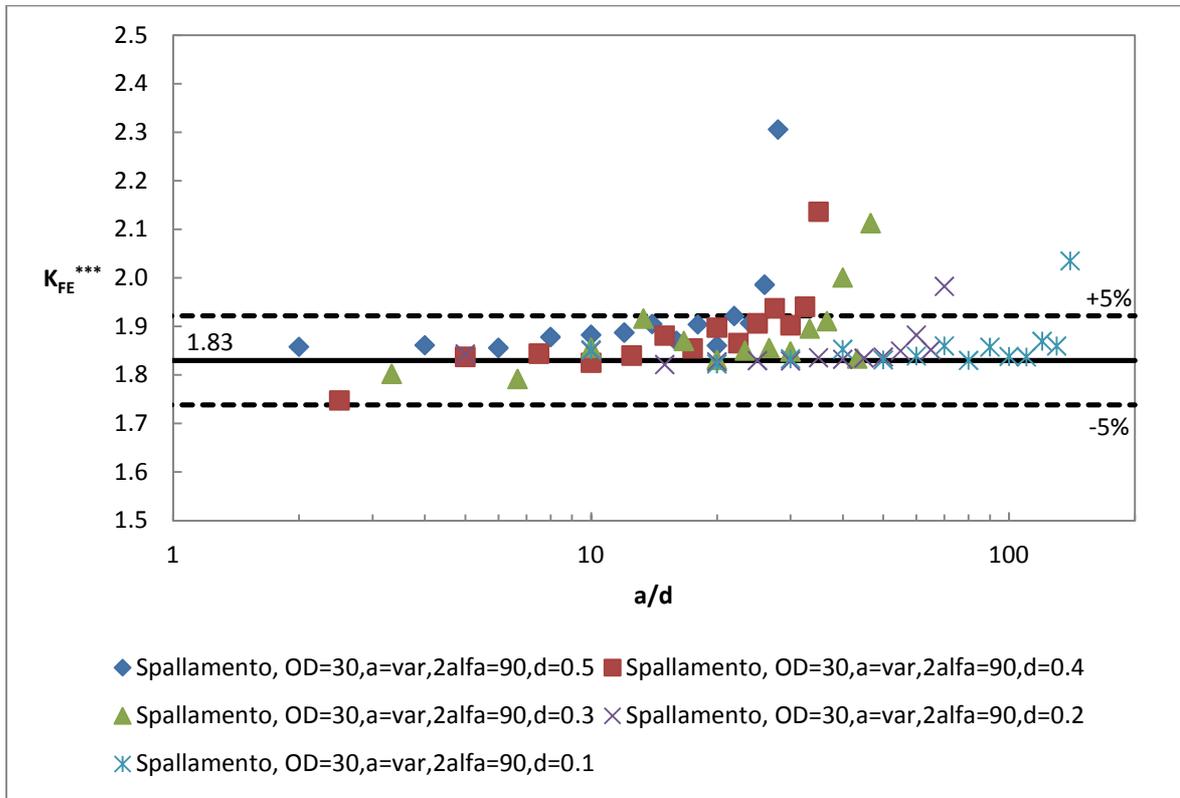


Figura 4.212: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento pari a 1.83; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato.

In termini di x^*/d si ottiene quindi:

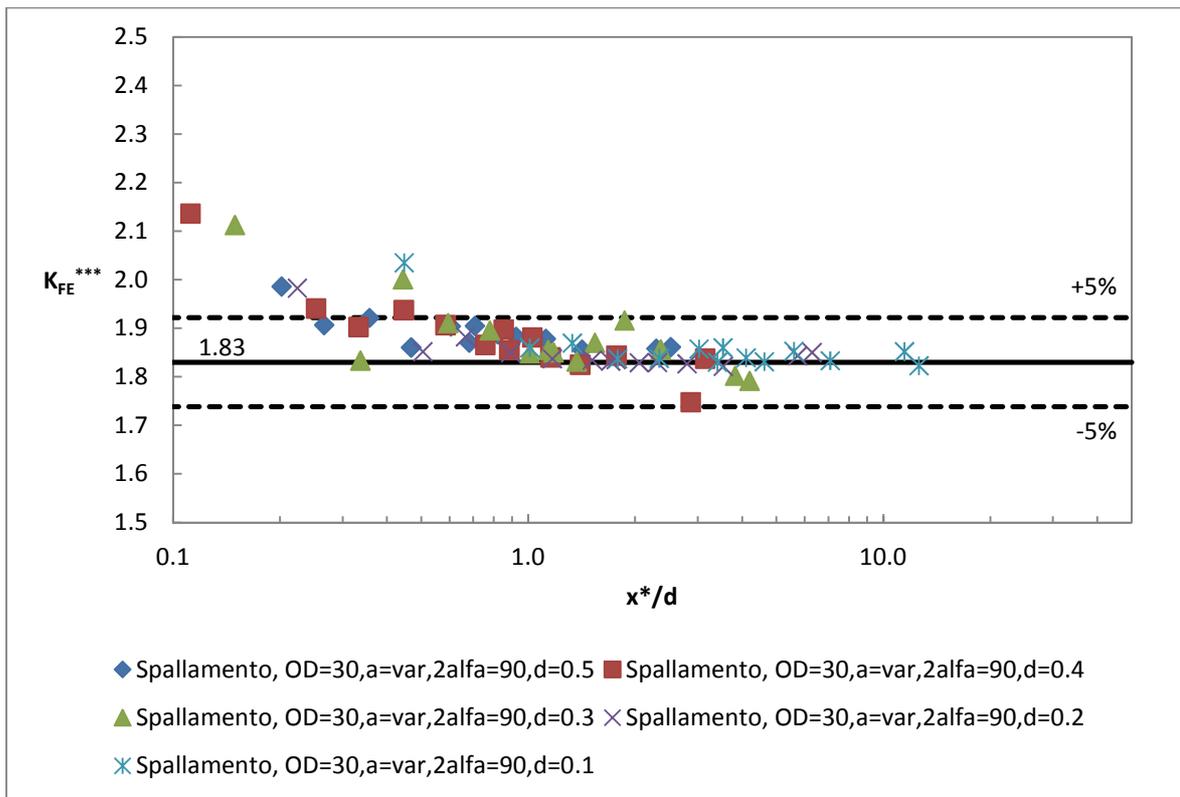


Figura 4.213: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento pari a 1.83; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione del parametro x^*/d è quindi possibile ripristinare ancora una volta la convergenza del metodo.

Si osservi che in questo caso:

- Il valore di riferimento è di 1.83;
- Le bande d'accettabilità sono di ampiezza pari al 5% del valore di riferimento calcolato;
- Il limite di convergenza espresso in x^*/d è inferiore all'unità e pari a 0.5 circa.

4.4.4.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	4.072	8.143	14.417	1.442	1.745
2	4	0.675	1.350	15.415	1.542	1.812
3	6	0.581	1.162	15.931	1.593	1.796
4	8	0.531	1.061	16.064	1.606	1.782
5	10	0.460	0.920	15.806	1.581	1.791
6	12	0.396	0.792	15.366	1.537	1.810
7	14	0.359	0.719	15.149	1.515	1.790
8	16	0.312	0.623	14.719	1.472	1.781
9	18	0.264	0.528	14.07	1.407	1.793
10	20	0.221	0.442	13.949	1.395	1.729
11	22	0.179	0.357	12.792	1.279	1.781
12	24	0.134	0.268	12.134	1.213	1.748
13	26	0.093	0.186	10.811	1.081	1.769
14	28	0.042	0.083	6.8438	0.684	2.384

Tabella 4.107: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	4.072	10.179	14.727	1.473	1.806
2	5	0.675	1.688	16.348	1.635	1.807
3	7.5	0.581	1.453	16.909	1.691	1.789
4	10	0.531	1.327	17.136	1.714	1.766
5	12.5	0.460	1.149	16.79	1.679	1.782
6	15	0.396	0.991	16.403	1.640	1.793
7	17.5	0.359	0.898	16.059	1.606	1.785
8	20	0.312	0.779	15.522	1.552	1.785
9	22.5	0.264	0.660	14.687	1.469	1.816
10	25	0.221	0.553	14.107	1.411	1.808
11	27.5	0.179	0.447	13.332	1.333	1.807
12	30	0.134	0.336	12.402	1.240	1.809
13	32.5	0.093	0.232	11.336	1.134	1.784
14	35	0.042	0.104	10.24	1.024	1.685

Tabella 4.108: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	4.072	13.572	15.86	1.586	1.802
2	6.666666667	0.675	2.250	17.758	1.776	1.787
3	10	0.581	1.937	18.105	1.811	1.796
4	13.33333333	0.531	1.769	18.091	1.809	1.798
5	16.66666667	0.460	1.533	18.027	1.803	1.784
6	20	0.396	1.321	17.681	1.768	1.787
7	23.33333333	0.359	1.198	17.004	1.700	1.812
8	26.66666667	0.312	1.039	16.519	1.652	1.803
9	30	0.264	0.880	16.412	1.641	1.746
10	33.33333333	0.221	0.737	15.244	1.524	1.798
11	36.66666667	0.179	0.596	14.361	1.436	1.803
12	40	0.134	0.447	13.505	1.351	1.785
13	43.33333333	0.093	0.310	12.226	1.223	1.777
14	46.66666667	0.042	0.139	10.118	1.012	1.832

Tabella 4.109: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	4.072	20.359	17.708	1.771	1.786
2	10	0.675	3.375	19.543	1.954	1.797
3	15	0.581	2.905	20.211	2.021	1.780
4	20	0.531	2.653	20.3	2.030	1.773
5	25	0.460	2.299	19.683	1.968	1.808
6	30	0.396	1.981	19.608	1.961	1.784
7	35	0.359	1.797	18.975	1.898	1.797
8	40	0.312	1.559	18.48	1.848	1.783
9	45	0.264	1.319	17.64	1.764	1.798
10	50	0.221	1.105	16.957	1.696	1.788
11	55	0.179	0.894	15.929	1.593	1.799
12	60	0.134	0.671	14.789	1.479	1.804
13	65	0.093	0.464	13.395	1.340	1.795
14	70	0.042	0.208	11.479	1.148	1.787

Tabella 4.110: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	4.072	40.717	21.109	2.111	1.782
2	20	0.675	6.750	23.369	2.337	1.787
3	30	0.581	5.810	23.668	2.367	1.808
4	40	0.531	5.306	24.432	2.443	1.752
5	50	0.460	4.598	23.56	2.356	1.796
6	60	0.396	3.962	23.168	2.317	1.795
7	70	0.359	3.594	22.467	2.247	1.805
8	80	0.312	3.117	22.049	2.205	1.778
9	90	0.264	2.639	21.116	2.112	1.786
10	100	0.221	2.211	20.704	2.070	1.742
11	110	0.179	1.787	18.802	1.880	1.812
12	120	0.134	1.342	17.587	1.759	1.804
13	130	0.093	0.929	15.925	1.593	1.796
14	140	0.042	0.416	13.329	1.333	1.830

Tabella 4.111: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

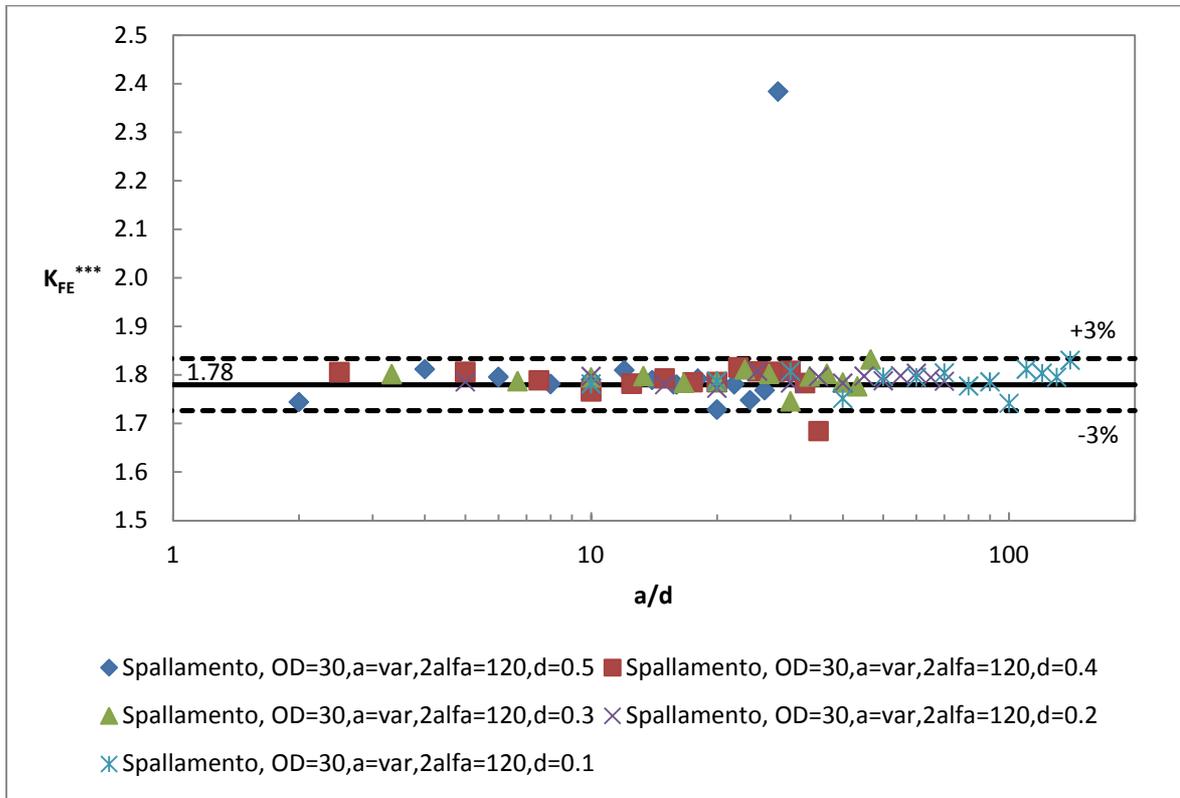


Figura 4.214: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.78; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Si osserva che con questa prima definizione, benché la maggior parte dei punti si trovi interna alla banda d'accettabilità, alcuni fuoriescono dalla stessa a causa dei limiti già discussi.

Per riportare il metodo al corretto funzionamento è ancora una volta necessario esprimere il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d come riportato nella figura successiva.

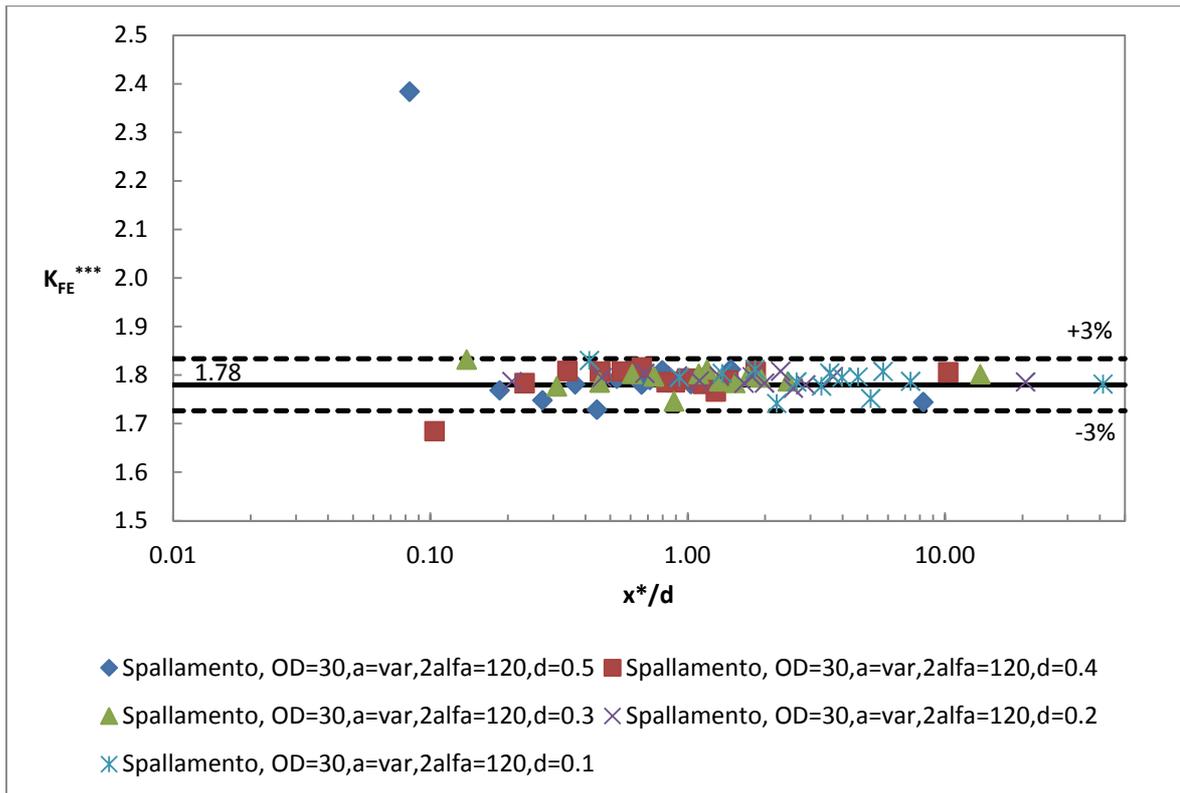


Figura 4.215: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.78; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Si osserva quindi che anche in questo caso con la seconda definizione si è ripristinata la convergenza del metodo; si nota inoltre che:

- Il valore di riferimento di convergenza è pari a 1.78;
- Le bande d'accettabilità hanno ampiezza pari al 3% del valore di riferimento ricavato;
- Il valore limite di convergenza in termini di x^*/d è pari a 0.5 circa.

4.4.4.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	1.520	3.040	13.778	1.378	1.939
2	4	0.643	1.285	14.768	1.477	1.931
3	6	0.534	1.069	15.035	1.504	1.936
4	8	0.489	0.978	14.95	1.495	1.935
5	10	0.429	0.857	14.783	1.478	1.935
6	12	0.394	0.788	14.428	1.443	1.946
7	14	0.358	0.716	14.126	1.413	1.938
8	16	0.299	0.598	13.775	1.378	1.940
9	18	0.250	0.500	13.368	1.337	1.939
10	20	0.213	0.426	12.854	1.285	1.943
11	22	0.167	0.335	12.24	1.224	1.958
12	24	0.130	0.260	11.601	1.160	1.948
13	26	0.092	0.184	10.683	1.068	1.941
14	28	0.045	0.089	9.0477	0.905	2.000

Tabella 4.112: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	1.520	3.800	14.658	1.466	1.906
2	5	0.643	1.606	15.716	1.572	1.898
3	7.5	0.534	1.336	15.848	1.585	1.921
4	10	0.489	1.223	15.814	1.581	1.913
5	12.5	0.429	1.072	15.587	1.559	1.919
6	15	0.394	0.985	15.283	1.528	1.921
7	17.5	0.358	0.895	14.909	1.491	1.920
8	20	0.299	0.748	14.595	1.460	1.914
9	22.5	0.250	0.625	14.123	1.412	1.919
10	25	0.213	0.532	13.653	1.365	1.913
11	27.5	0.167	0.418	12.964	1.296	1.933
12	30	0.130	0.325	12.152	1.215	1.944
13	32.5	0.092	0.230	11.116	1.112	1.950
14	35	0.045	0.111	9.812	0.981	1.928

Tabella 4.113: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	1.520	5.067	15.298	1.530	1.934
2	6.666666667	0.643	2.142	16.368	1.637	1.930
3	10	0.534	1.781	16.612	1.661	1.941
4	13.33333333	0.489	1.630	16.47	1.647	1.946
5	16.66666667	0.429	1.429	16.289	1.629	1.945
6	20	0.394	1.314	16.009	1.601	1.942
7	23.33333333	0.358	1.193	15.779	1.578	1.921
8	26.66666667	0.299	0.997	15.428	1.543	1.918
9	30	0.250	0.834	14.782	1.478	1.942
10	33.33333333	0.213	0.710	14.267	1.427	1.939
11	36.66666667	0.167	0.558	13.797	1.380	1.924
12	40	0.130	0.433	12.813	1.281	1.953
13	43.33333333	0.092	0.306	11.842	1.184	1.939
14	46.66666667	0.045	0.148	10.276	1.028	1.950

Tabella 4.114: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	1.520	7.601	16.687	1.669	1.921
2	10	0.643	3.213	17.739	1.774	1.929
3	15	0.534	2.671	18.018	1.802	1.939
4	20	0.489	2.445	17.881	1.788	1.942
5	25	0.429	2.143	17.653	1.765	1.944
6	30	0.394	1.971	17.327	1.733	1.944
7	35	0.358	1.790	16.941	1.694	1.939
8	40	0.299	1.495	16.497	1.650	1.943
9	45	0.250	1.251	15.998	1.600	1.944
10	50	0.213	1.065	15.425	1.543	1.943
11	55	0.167	0.837	14.763	1.476	1.948
12	60	0.130	0.649	13.943	1.394	1.945
13	65	0.092	0.459	12.807	1.281	1.943
14	70	0.045	0.223	11.12	1.112	1.952

Tabella 4.115: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	1.520	15.202	19.024	1.902	1.938
2	20	0.643	6.426	20.284	2.028	1.940
3	30	0.534	5.343	20.574	2.057	1.952
4	40	0.489	4.891	20.492	2.049	1.948
5	50	0.429	4.286	20.234	2.023	1.950
6	60	0.394	3.942	19.923	1.992	1.944
7	70	0.358	3.579	19.427	1.943	1.944
8	80	0.299	2.991	18.936	1.894	1.947
9	90	0.250	2.502	18.431	1.843	1.940
10	100	0.213	2.130	17.706	1.771	1.946
11	110	0.167	1.673	16.942	1.694	1.951
12	120	0.130	1.298	15.999	1.600	1.949
13	130	0.092	0.918	14.763	1.476	1.938
14	140	0.045	0.445	12.796	1.280	1.951

Tabella 4.116: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

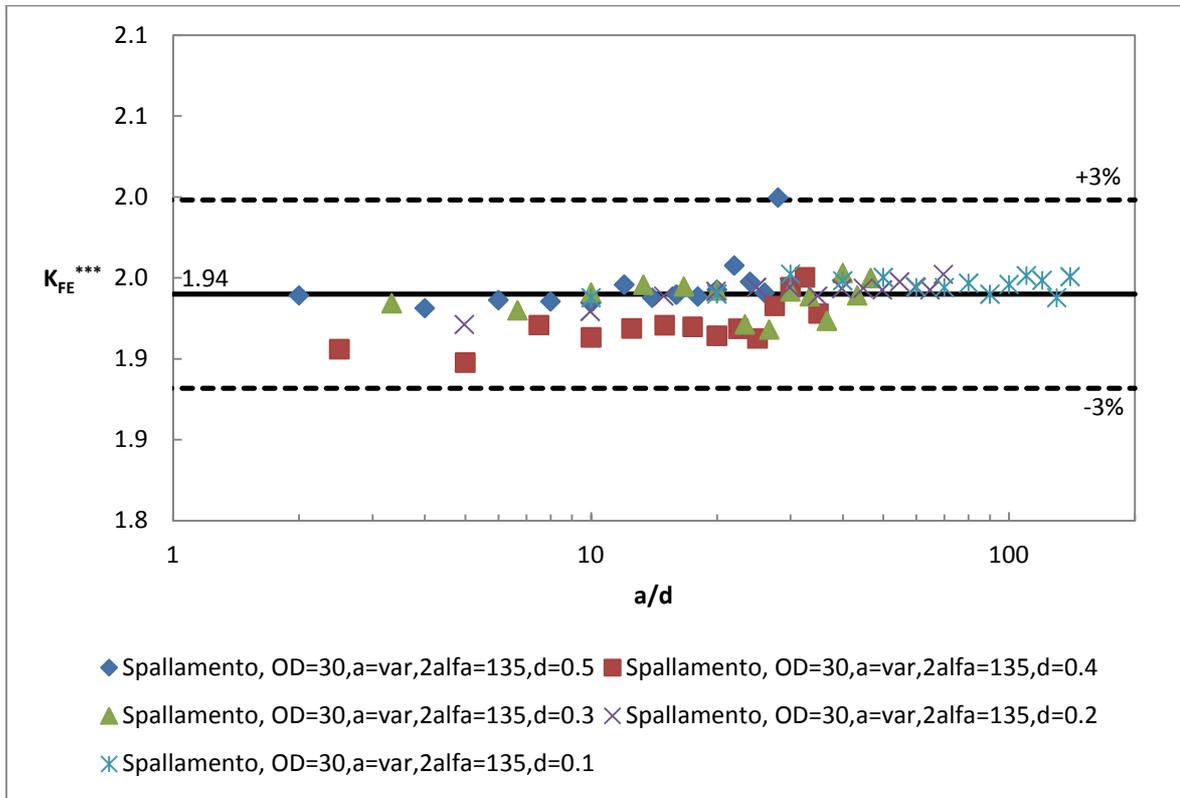


Figura 4.216: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.94; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Nel caso di spallamento con angolo d'apertura di 135° si osserva che praticamente tutti i punti calcolati rientrano nella banda di convergenza; si osserva però, soprattutto per le dimensioni d'elemento più elevate, una marcata tendenza delle curve ad uscire dalla banda.

Per risolvere questa problematica si esprime ora il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d :

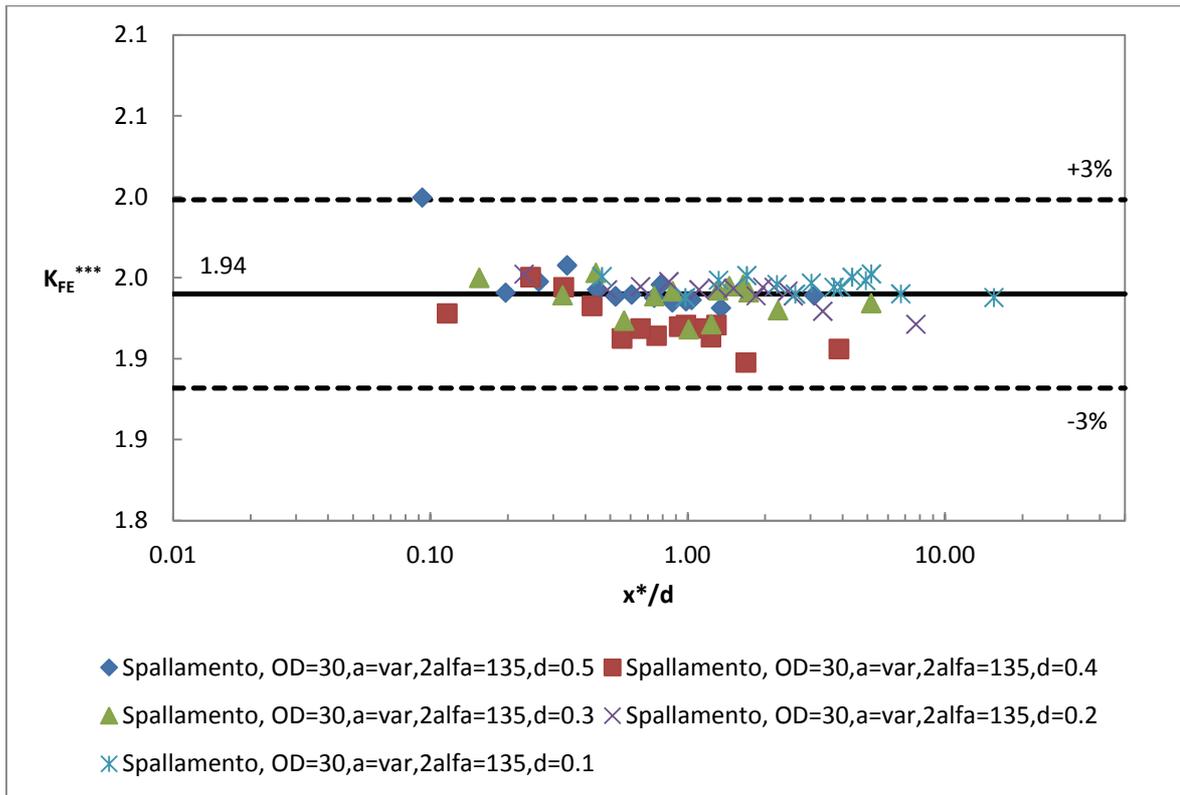


Figura 4.217: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.94; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 3% rispetto al valore calcolato.

Si osserva quindi che il punto che tendeva ad uscire diagrammando i risultati in termini di a/d ora si è spostato verso sinistra.

Si osserva inoltre che:

- Il valore di riferimento calcolato è 1.94, coerente con l'1.93 dichiarato in letteratura [4];
- Le bande di dispersione hanno ampiezza del 3% del valore di riferimento ricavato;
- Praticamente tutti i punti sono contenuti all'interno della banda d'accettabilità.

4.4.4.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°

PSM d = 0.5 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2	0.767	1.535	12.97	1.297	2.124
2	4	0.590	1.179	13.487	1.349	2.118
3	6	0.542	1.084	13.489	1.349	2.125
4	8	0.501	1.002	13.424	1.342	2.115
5	10	0.440	0.881	13.243	1.324	2.120
6	12	0.393	0.787	13.053	1.305	2.121
7	14	0.367	0.735	12.915	1.292	2.108
8	16	0.332	0.664	12.676	1.268	2.106
9	18	0.293	0.585	12.398	1.240	2.105
10	20	0.224	0.448	12.071	1.207	2.107
11	22	0.187	0.374	11.65	1.165	2.112
12	24	0.136	0.272	11.213	1.121	2.105
13	26	0.093	0.186	10.57	1.057	2.104
14	28	0.046	0.092	9.3108	0.931	2.158

Tabella 4.117: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.4 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	2.5	0.767	1.918	13.393	1.339	2.123
2	5	0.590	1.474	13.896	1.390	2.123
3	7.5	0.542	1.355	13.982	1.398	2.116
4	10	0.501	1.252	13.869	1.387	2.113
5	12.5	0.440	1.101	13.72	1.372	2.113
6	15	0.393	0.983	13.523	1.352	2.114
7	17.5	0.367	0.919	13.333	1.333	2.108
8	20	0.332	0.830	13.088	1.309	2.106
9	22.5	0.293	0.732	12.794	1.279	2.106
10	25	0.224	0.560	12.458	1.246	2.108
11	27.5	0.187	0.468	12.055	1.206	2.107
12	30	0.136	0.341	11.543	1.154	2.111
13	32.5	0.093	0.233	10.916	1.092	2.103
14	35	0.046	0.115	9.8119	0.981	2.114

Tabella 4.118: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.3 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	3.333333333	0.767	2.557536	14.096	1.410	2.102
2	6.666666667	0.590	1.965468	14.655	1.466	2.097
3	10	0.542	1.806457	14.483	1.448	2.129
4	13.33333333	0.501	1.669569	14.469	1.447	2.110
5	16.66666667	0.440	1.468196	14.306	1.431	2.111
6	20	0.393	1.310851	14.047	1.405	2.121
7	23.33333333	0.367	1.224696	13.87	1.387	2.112
8	26.66666667	0.332	1.106594	13.614	1.361	2.109
9	30	0.293	0.97537	13.321	1.332	2.108
10	33.33333333	0.224	0.746233	12.963	1.296	2.111
11	36.66666667	0.187	0.623889	12.573	1.257	2.105
12	40	0.136	0.454052	12.04	1.204	2.109
13	43.33333333	0.093	0.310814	11.333	1.133	2.111
14	46.66666667	0.046	0.153782	10.341	1.034	2.090

Tabella 4.119: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.2 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	5	0.767	3.836	14.791	1.479	2.123
2	10	0.590	2.948	15.368	1.537	2.119
3	15	0.542	2.710	15.355	1.536	2.128
4	20	0.501	2.504	15.309	1.531	2.114
5	25	0.440	2.202	15.124	1.512	2.116
6	30	0.393	1.966	14.858	1.486	2.124
7	35	0.367	1.837	14.687	1.469	2.113
8	40	0.332	1.660	14.414	1.441	2.111
9	45	0.293	1.463	14.097	1.410	2.110
10	50	0.224	1.119	13.74	1.374	2.110
11	55	0.187	0.936	13.307	1.331	2.107
12	60	0.136	0.681	12.821	1.282	2.099
13	65	0.093	0.466	12.074	1.207	2.099
14	70	0.046	0.231	10.928	1.093	2.096

Tabella 4.120: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.1 mm						
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}
1	10	0.767	7.673	16.373	1.637	2.117
2	20	0.590	5.896	16.968	1.697	2.119
3	30	0.542	5.419	17.009	1.701	2.121
4	40	0.501	5.009	16.894	1.689	2.115
5	50	0.440	4.405	16.696	1.670	2.116
6	60	0.393	3.933	16.39	1.639	2.126
7	70	0.367	3.674	16.205	1.621	2.114
8	80	0.332	3.320	15.894	1.589	2.114
9	90	0.293	2.926	15.552	1.555	2.112
10	100	0.224	2.239	15.125	1.513	2.117
11	110	0.187	1.872	14.68	1.468	2.109
12	120	0.136	1.362	14.093	1.409	2.108
13	130	0.093	0.932	13.3	1.330	2.104
14	140	0.046	0.461	12.074	1.207	2.094

Tabella 4.121: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

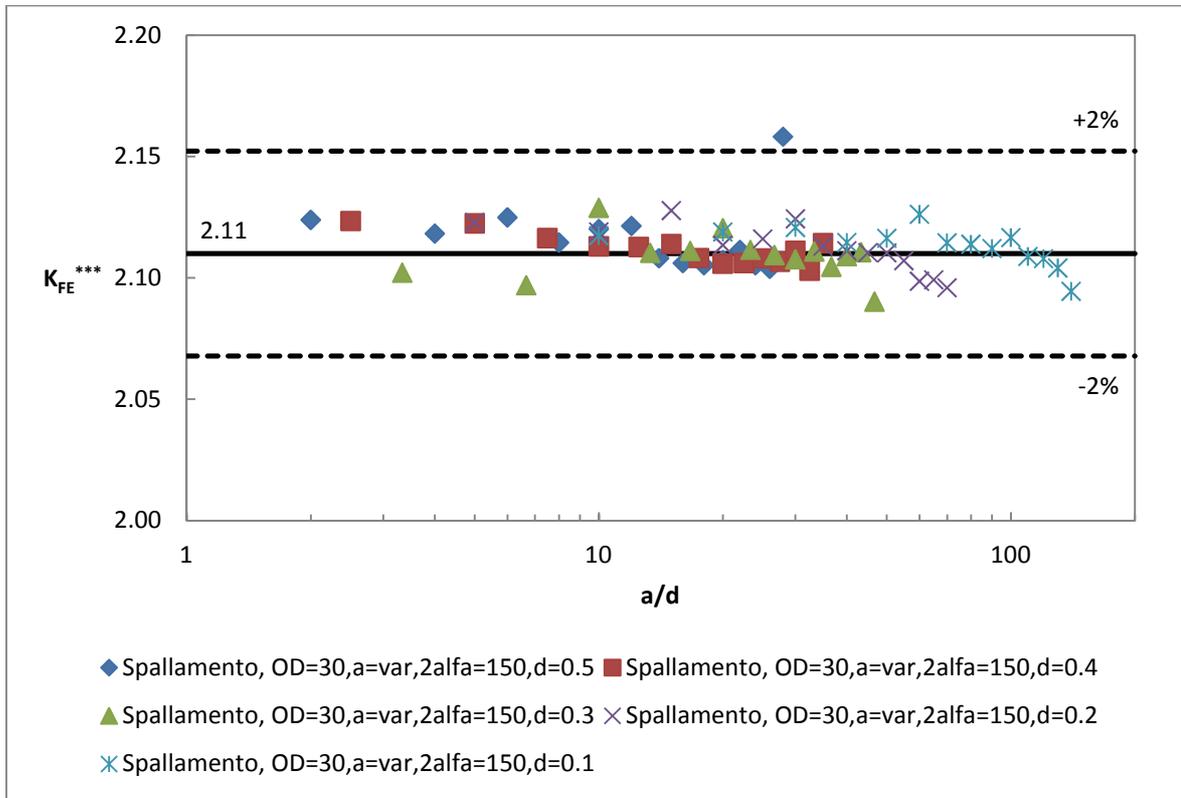


Figura 4.218: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 2.11; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , cioè del numero d'elementi che sono posizionati nella zona d'estensione del campo locale di tensione, si ha:

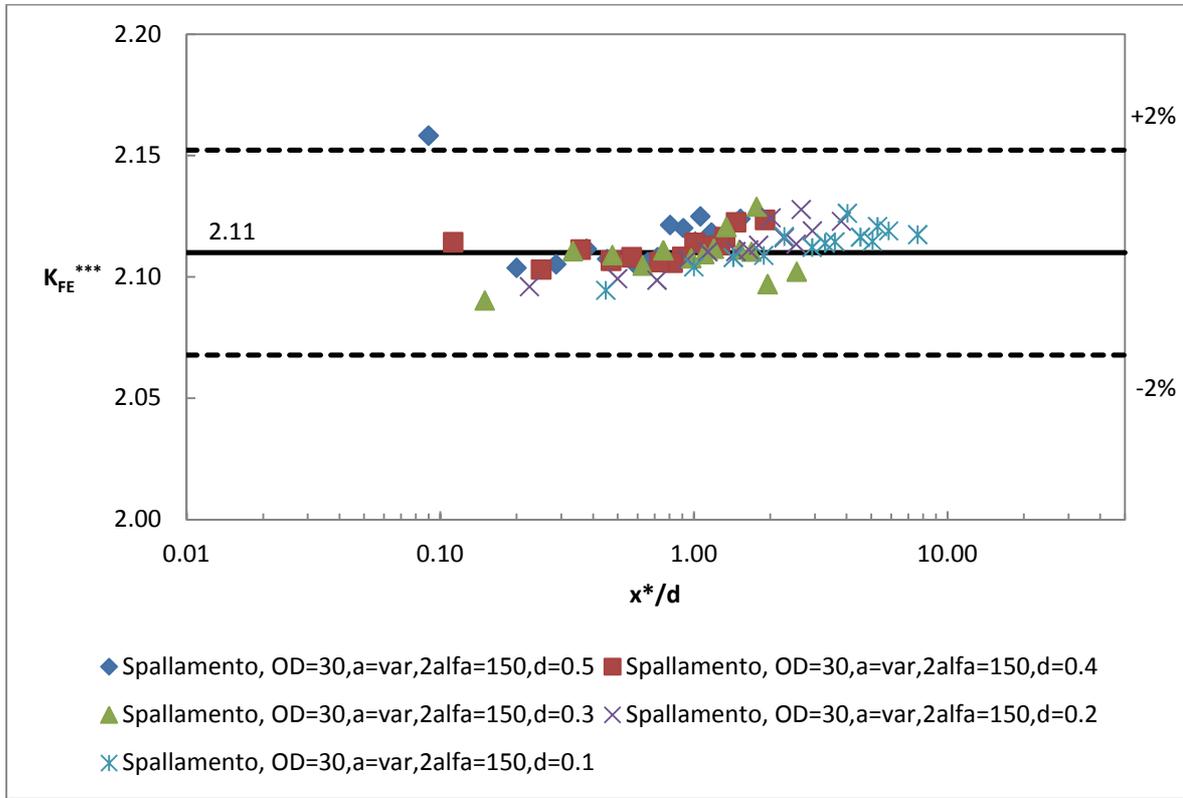


Figura 4.219: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 2.11; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 2% rispetto al valore calcolato.

Si osserva quindi che anche in questo caso la convergenza del metodo è ristabilita grazie a questo nuovo criterio di convergenza in x^*/d ; si osserva inoltre che:

- Il valore di convergenza è pari a 2.11, molto lontano da quelli ricavati per gli altri angoli d'apertura ma coerente con quanto visto nel caso di provino con intagli esterni con angolo d'apertura di 150° ;
- Le bande di dispersione hanno un'ampiezza pari al 2% del valore di riferimento ricavato;
- Il metodo converge in termini di x^*/d per valori molto inferiori all'unità; nel caso in esame si può assumere uno 0.2.

4.4.4.4 - Riassunto dei risultati ottenuti

Come ultimo passo di questo paragrafo, nel quale si ricorda si sta applicando il metodo del PSM eseguendo solamente una mesh di tipo free senza alcun tipo di controllo sul layout della stessa nell'intorno del punto di singolarità, si vuole riassumere tutti i risultati finora raccolti con lo scopo di fornire una linea guida che consenta di applicare il metodo per ogni angolo d'apertura.

Si riportano tutti i risultati in un unico grafico dove si rappresentano con lo stesso simbolo e lo stesso colore i dati relativi ad un singolo angolo d'apertura dell'intaglio. Si riporta dapprima il grafico suddetto in termini di a/d .

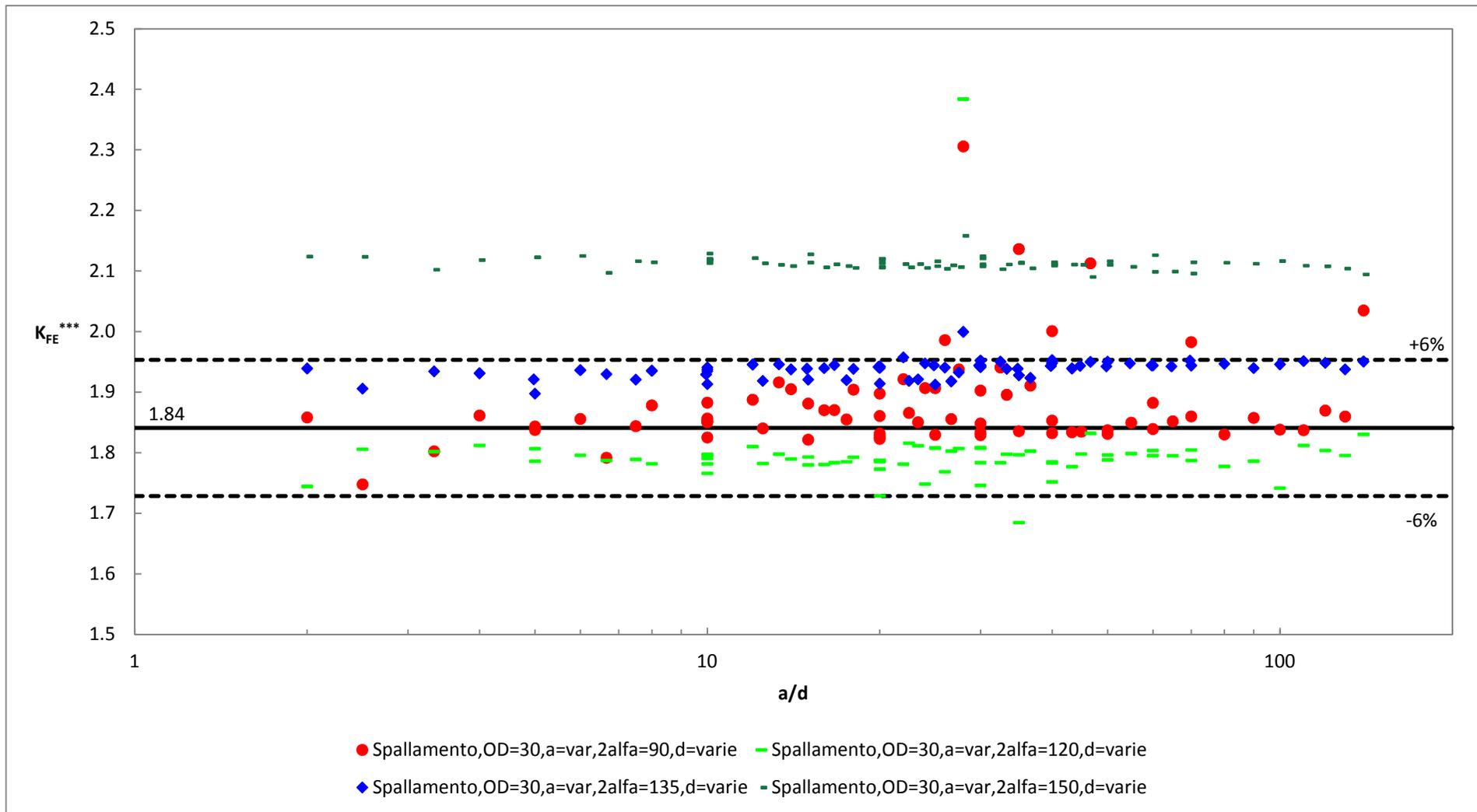


Figura 4.220: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.84; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 6% rispetto al valore calcolato.

Per i motivi già descritti durante la trattazione esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione del parametro a/d si ottengono delle curve che tendono ad uscire dalla banda di convergenza a causa della già menzionata interazione tra i campi di tensione locali. Come già osservato durante l'analisi dei singoli angoli d'apertura dell'intaglio per riportare il metodo a convergenza è utile esprimere il suddetto parametro adimensionale K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , dove si ricorda che con il simbolo x^* s'intende l'estensione del campo locale di tensione calcolata numericamente.

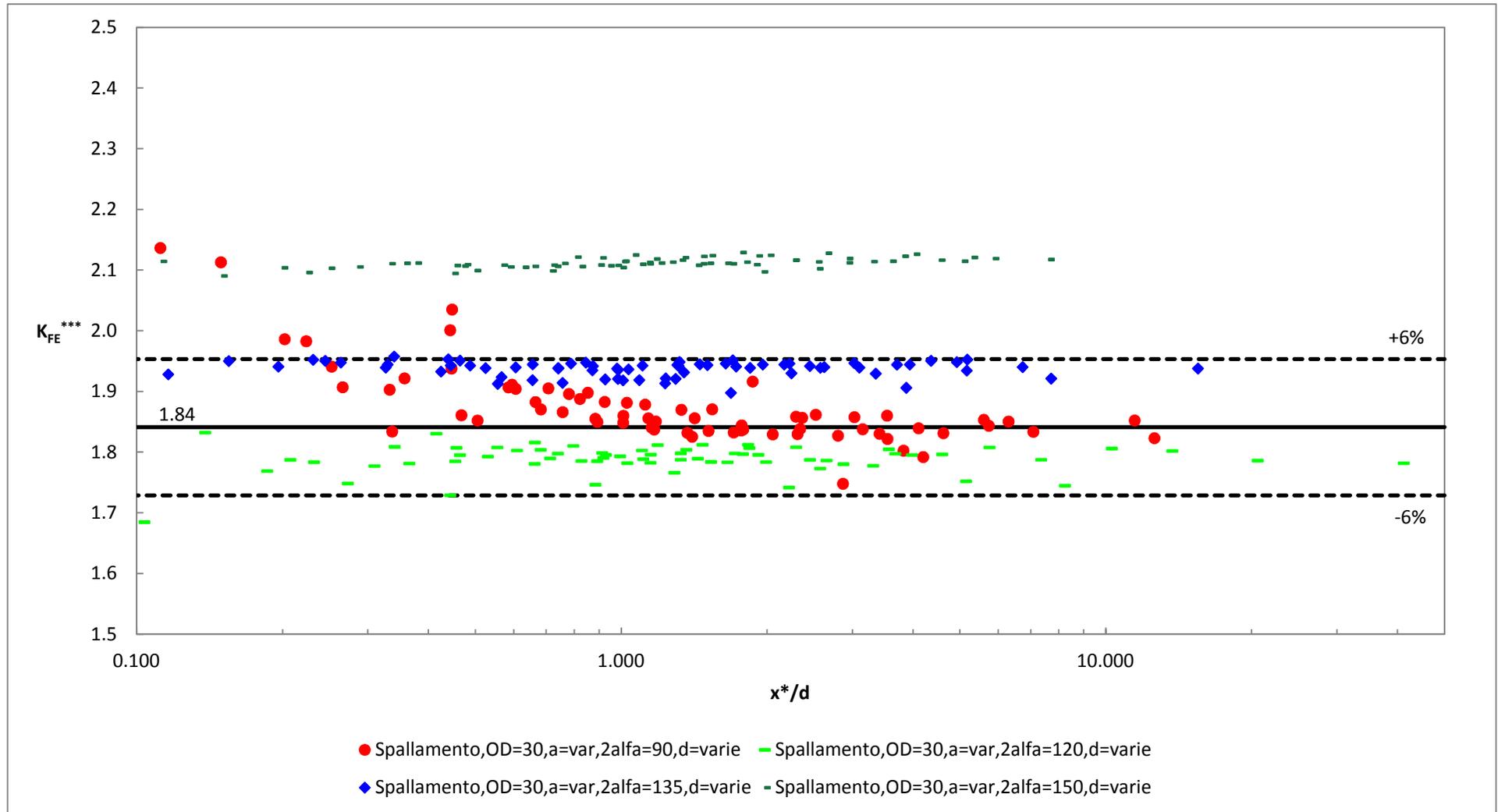


Figura 4.221: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.84; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 6% rispetto al valore calcolato.

Ancora una volta si conferma l'utilità di questa seconda definizione del criterio di convergenza; si noti che, anche in questo caso, i risultati relativi all'angolo d'apertura 150° convergono ad un livello superiore a quello di tutti gli altri e perciò non entrano nella banda d'accettabilità.

Per tutti gli angoli d'apertura inferiori al limite suddetto di 150° si è confermata la validità del metodo PSM applicato utilizzando solamente una mesh free senza controllo del layout della stessa; il valore medio di convergenza è uguale a 1.84 e ed è stato necessario adottare una banda di dispersione dei risultati di ampiezza del 6% dello stesso.

I limiti di convergenza del metodo, espressi in funzione del rapporto tra l'estensione del campo locale di tensione e la global element size della mesh, sono pari a circa:

$$\frac{x^*}{a} \geq 0.7 \quad (4.12)$$

Ciò significa che, a prescindere dalle dimensioni caratteristiche dell'intaglio analizzato, è sempre necessario posizionare almeno un elemento nella zona d'estensione del campo locale di tensione per ottenere delle informazioni corrette da parte del PSM seguendo l'approccio descritto.

4.4.5 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e utilizzo dell'algorithm di meshatura free internamente alla stessa

Nel precedente paragrafo, dove si è applicato il PSM senza alcun metodo di controllo della mesh nell'intorno del punto di singolarità geometrica, si è ricavato un valore medio di convergenza del K_{FE}^{***} pari a 1.84 con delle bande d'accettabilità del 6%. Per cercare di ridurre la loro dimensione si è quindi nuovamente fatto ricorso ad una areola centrata all'apice dell'intaglio che permette di controllare la mesh al suo interno.

Si osservi che in questo caso sarà necessario creare due areole adiacenti, una per ogni lato della bisettrice dell'angolo; ciò non era necessario nei casi precedenti di provino circolare con intaglio poiché si sfruttava la simmetria del problema attorno alla mezzieria del componente.

Per i dettagli sulla creazione dell'areola e le relative problematiche si faccia riferimento al paragrafo 4.3.5; nella trattazione si sceglie di assumere, coerentemente con quanto già ricavato, una dimensione dell'areola di 6x6 elementi per tutti gli angoli d'apertura.

Anche in questo caso se la dimensione dell'areola è troppo grande rispetto allo spazio disponibile nel provino, per esempio nel caso di piccola dimensione d'intaglio e grande global element size, il programma automatico Matlab® riduce le dimensioni dell'areola stessa fino a ottenerne una compatibile con la geometria; in questi casi l'areola non è più 6x6 ma più piccola e quindi in generale la mesh ottenuta può scostarsi da quella desiderata.

4.4.5.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Il programma automatico utilizzato per svolgere l'intera batteria d'analisi ricalca ogni aspetto descritto nel paragrafo 4.3.5.1; solo la parte di creazione della geometria è cambiata coerentemente con la volontà di ottenere degli spallamenti.

4.4.5.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

Si riportano di seguito alcuni esempi, riferiti ad una singola dimensione globale d'elemento pari a 0.2 mm, delle mesh ottenute attraverso questo modo di procedere; in questo caso, diversamente da quanto osservato nel precedente paragrafo dove si trattavano mesh non controllate, si osserva che le configurazioni degli elementi ottenute al variare delle grandezze geometriche sono pressoché invariate.

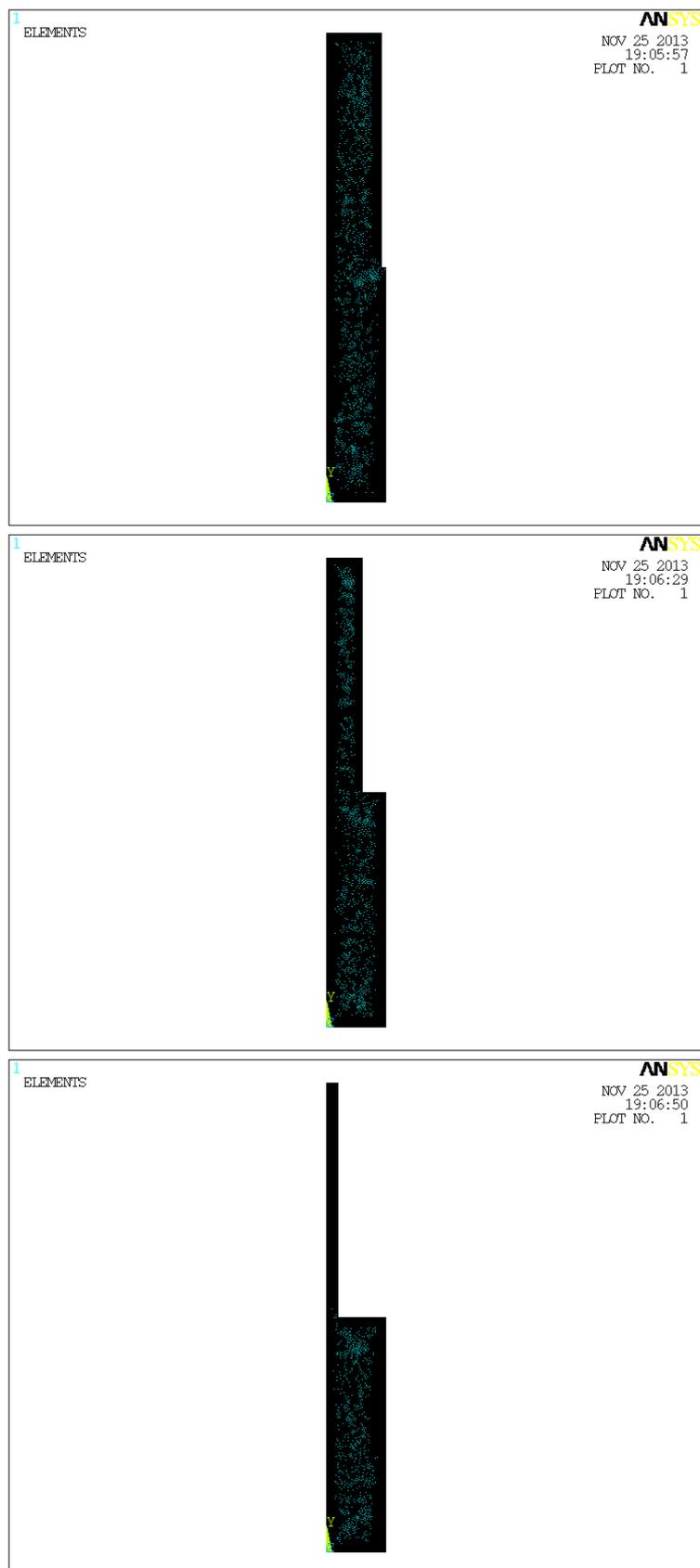


Figura 4.222: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

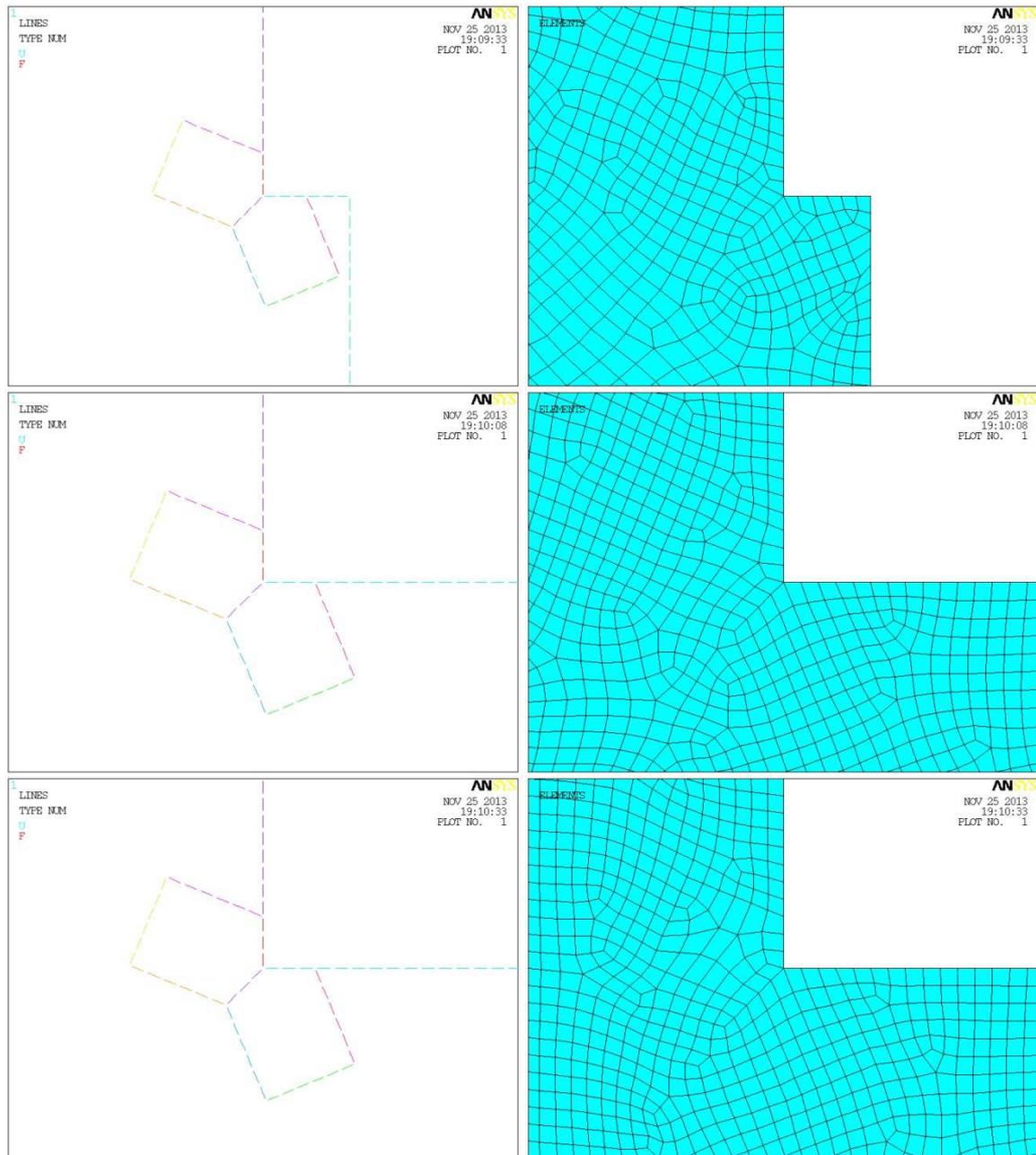


Figura 4.223: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm. Si noti che nel caso di dimensione caratteristica d'intaglio pari a 1 mm il programma automatico ha diminuito le dimensioni dell'areola a causa degli ingombri della stessa, apportando però una distorsione della mesh.



Figura 4.224: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

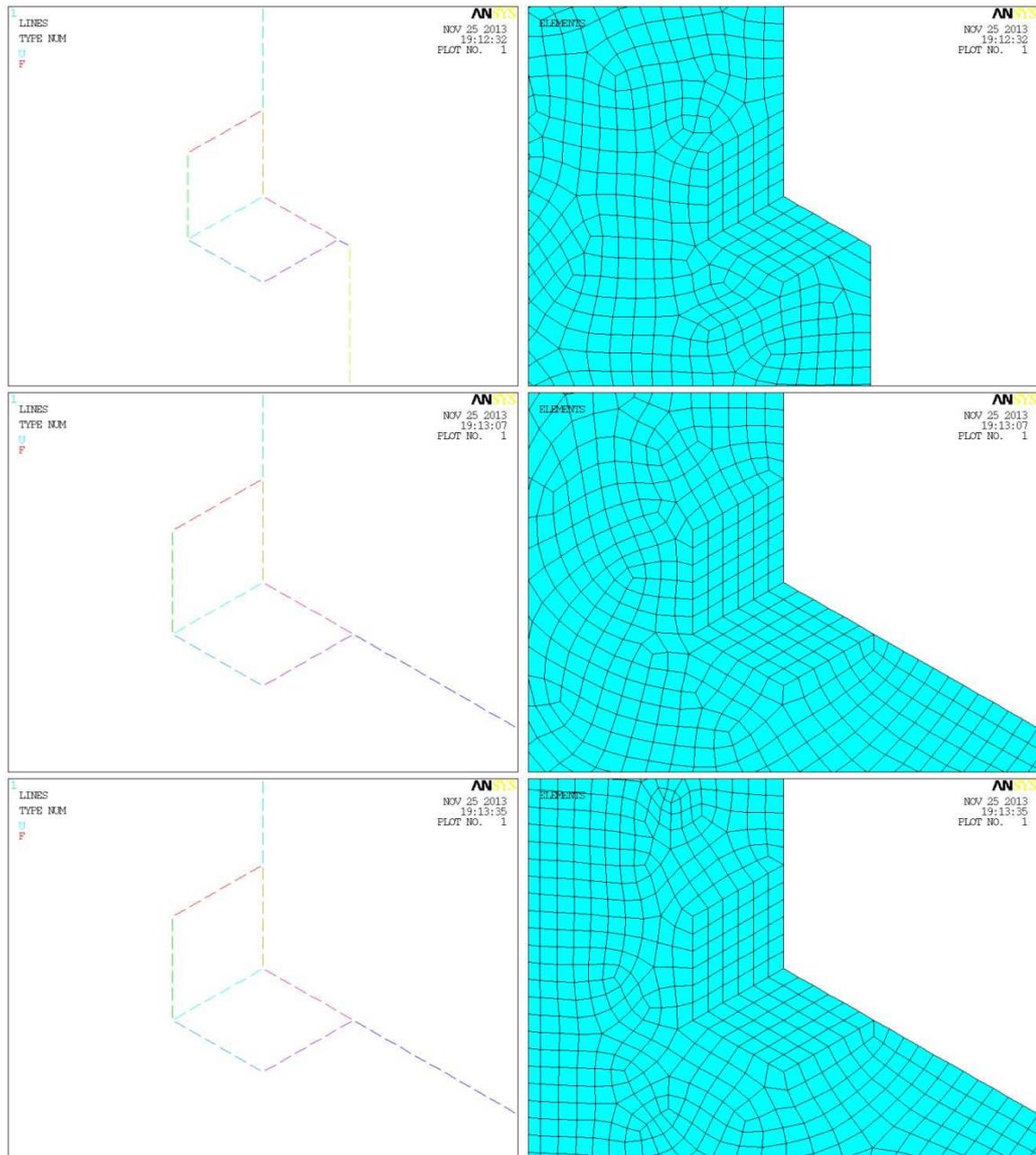


Figura 4.225: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm. Si noti che nel caso di dimensione caratteristica d'intaglio pari a 1 mm il programma automatico ha diminuito le dimensioni dell'areola a causa degli ingombri della stessa.

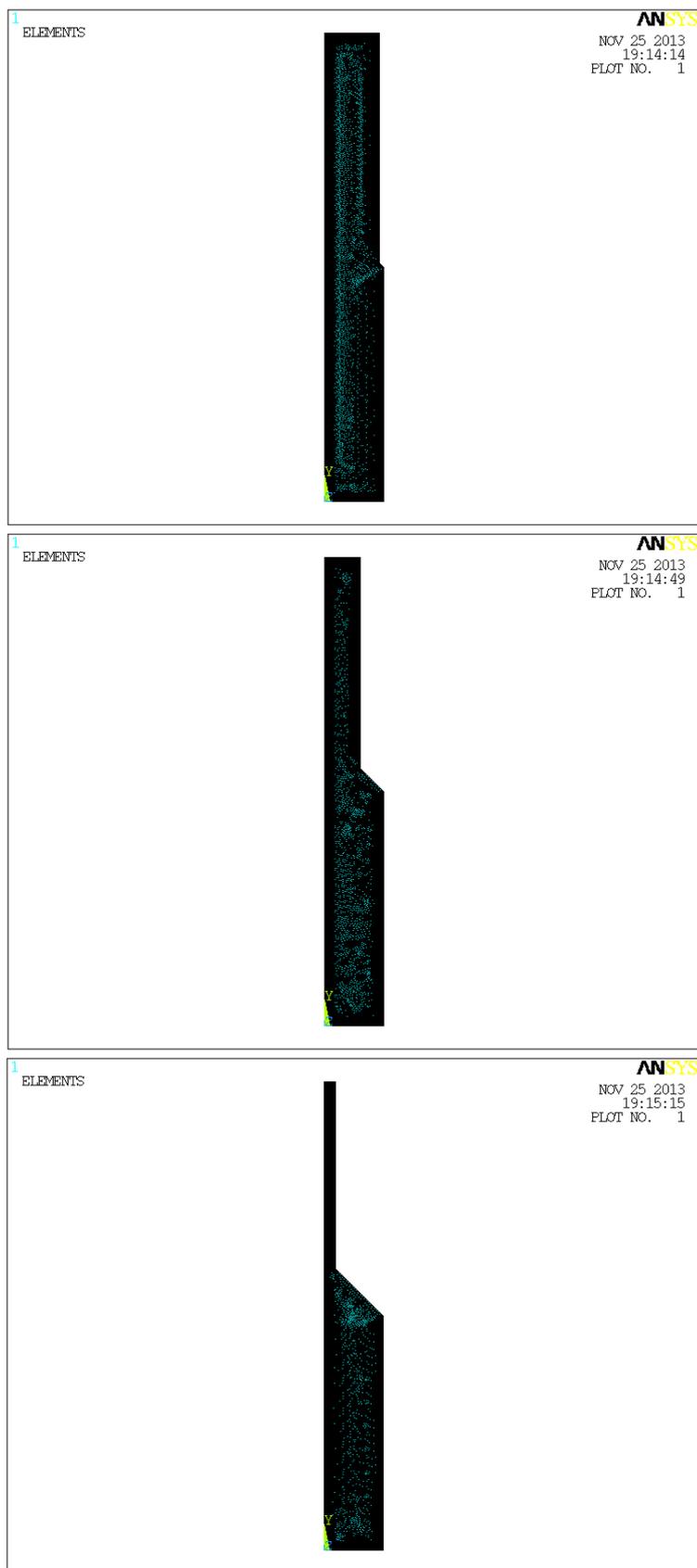


Figura 4.226: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

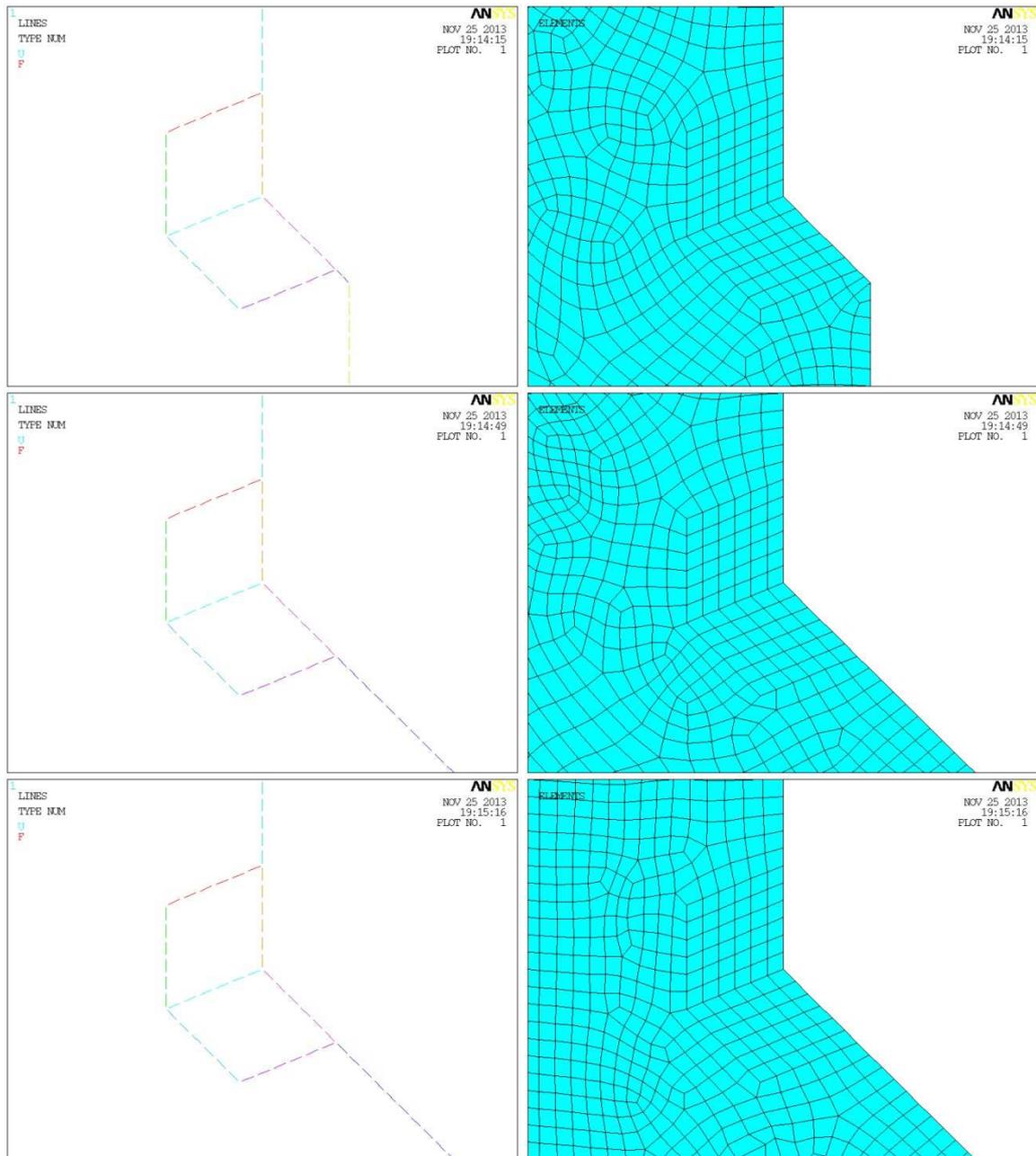


Figura 4.227: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'incisione. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'incisione $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un'incisione di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

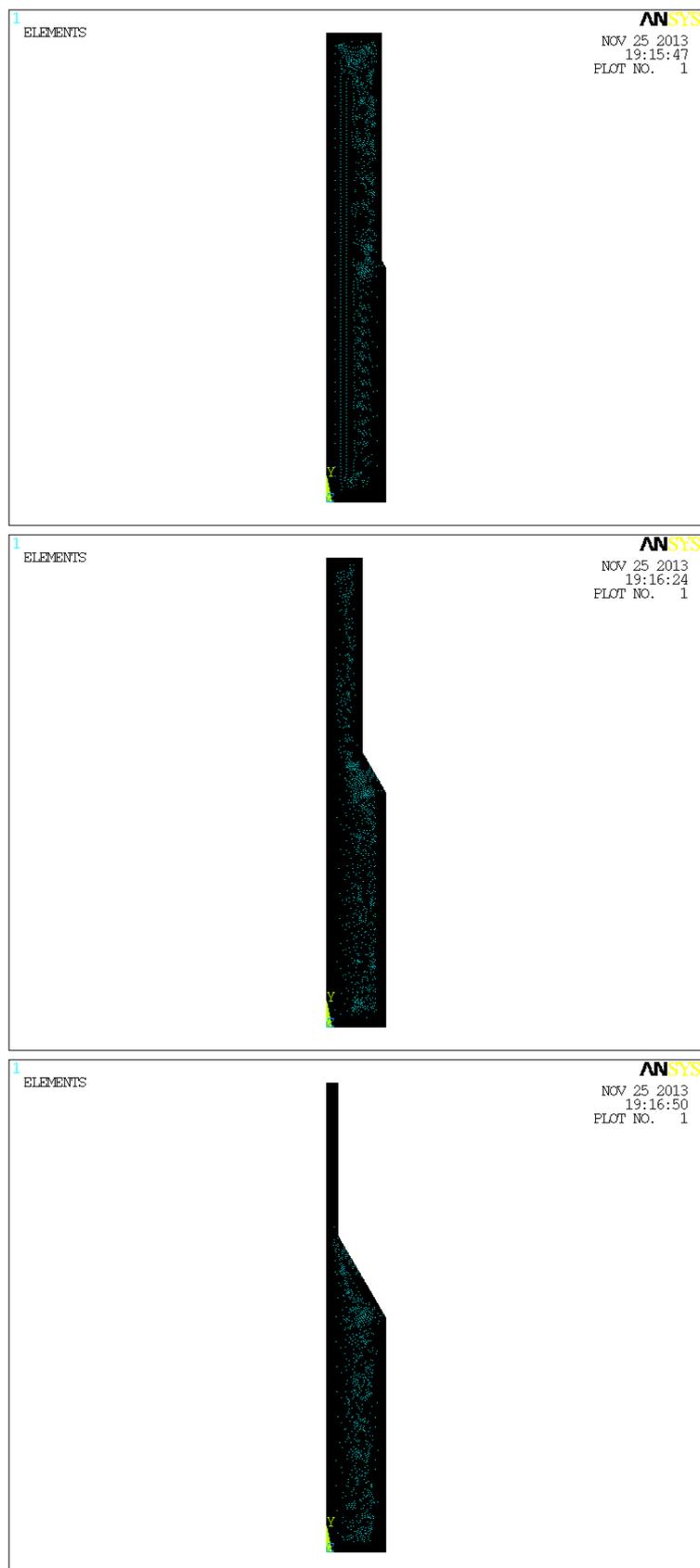


Figura 4.228: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

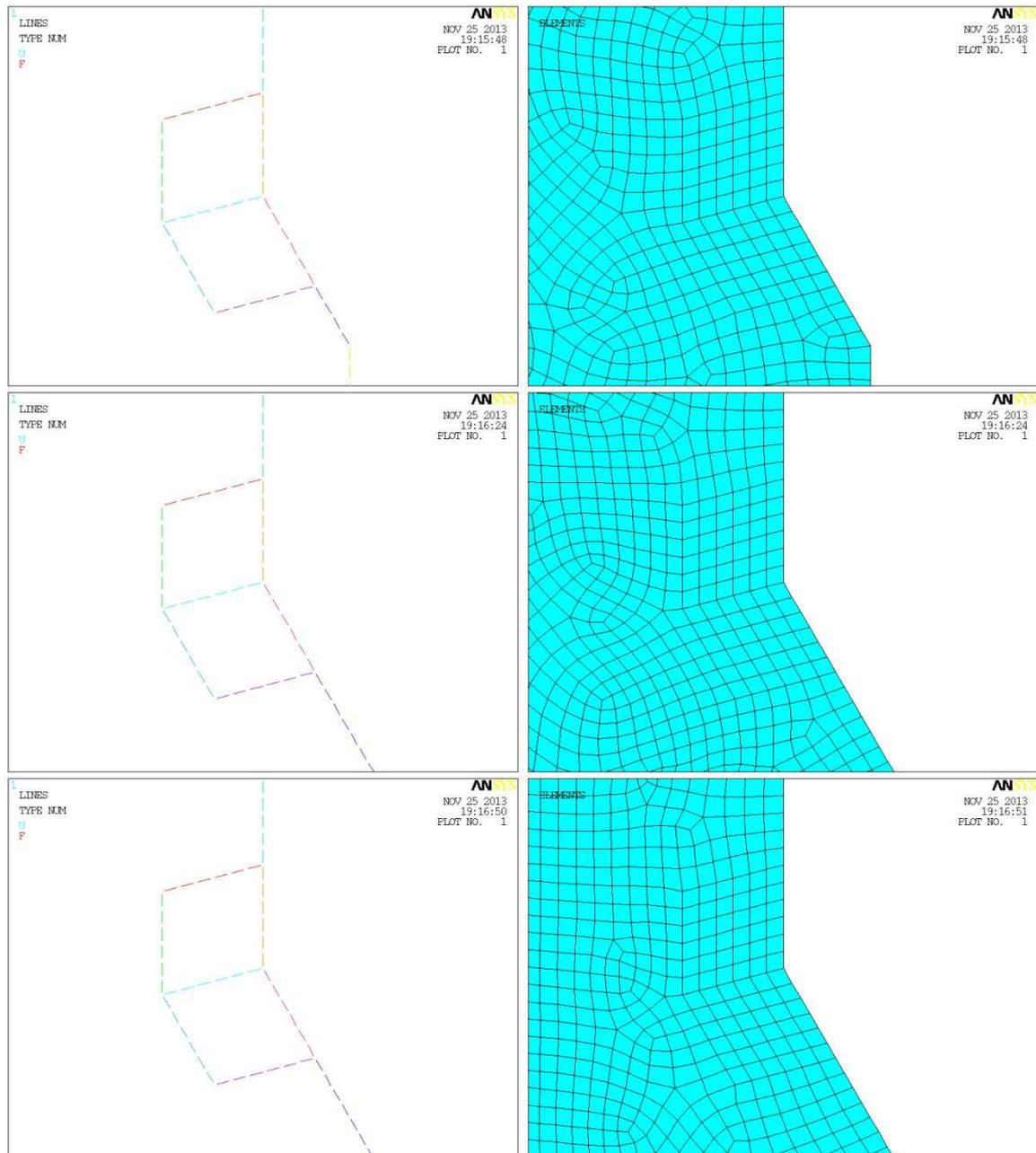


Figura 4.229: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

4.4.5.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

Si elencano di seguito i parametri presi in esame nel presente lavoro:

- Angoli d'apertura: 90° ; 120° ; 135° ; 150° .
- Dimensioni globali d'elemento: 0.5 mm; 0.4 mm; 0.3 mm; 0.2 mm; 0.1 mm.

- Dimensioni caratteristiche dell'intaglio: da 1 a 14 mm con passo 1 mm.

L'intera batteria d'analisi espressa in termini del parametro adimensionale "a/d" è riportata nella seguente tabella:

d [mm]	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
a [mm]	a/d				
1	2	2.5	3.333333	5	10
2	4	5	6.666667	10	20
3	6	7.5	10	15	30
4	8	10	13.33333	20	40
5	10	12.5	16.66667	25	50
6	12	15	20	30	60
7	14	17.5	23.33333	35	70
8	16	20	26.66667	40	80
9	18	22.5	30	45	90
10	20	25	33.33333	50	100
11	22	27.5	36.66667	55	110
12	24	30	40	60	120
13	26	32.5	43.33333	65	130
14	28	35	46.66667	70	140

Tabella 4.122: Valori del parametro adimensionale a/d per i vari casi analizzati.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal PSM riassumendo in ogni tabella una singola global element size; si è preferito suddividere i risultati riferiti ad ogni angolo d'apertura dell'intaglio in diversi sottoparagrafi.

In tutte le tabelle riportate si noti che:

- a è la dimensione dell'intaglio;
- d è la dimensione globale d'elemento imposta;
- x^* è l'estensione del campo locale di tensione valuta numericamente come già descritto;
- τ_{peak} è la tensione di picco misurata all'apice dell'intaglio e intesa come una τ_{yz} , dove y è la direzione ortogonale alla bisettrice dell'intaglio e z quella uscente dal piano 2D;
- K_{FE}^{***} è il valore adimensionale calcolato numericamente tramite la (1.6).

4.4.5.3.1 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 90°

Si ricorda che in questo caso l'areola ha una dimensione nominale di 6x6 elementi.

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	1.206	2.411	13.422	1.342	2.003	2
2	4	1.234	2.467	17.014	1.701	2.269	4
3	6	0.685	1.371	26.391	2.639	1.965	6
4	8	0.546	1.092	34.704	3.470	1.969	6
5	10	0.469	0.937	45.778	4.578	1.973	6
6	12	0.404	0.808	61.348	6.135	1.981	6
7	14	0.359	0.718	84.384	8.438	1.990	6
8	16	0.318	0.637	120.37	12.037	2.000	6
9	18	0.276	0.552	180.67	18.067	2.016	6
10	20	0.232	0.465	291.08	29.108	2.032	6
11	22	0.179	0.358	519.34	51.934	2.072	6
12	24	0.134	0.267	873.64	87.364	2.648	4
13	26	0.096	0.192	3481.6	348.160	1.951	3
14	28	0.045	0.090	16357	1635.700	2.679	1

Tabella 4.123: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	1.206	3.014	14.447	1.445	2.005	2
2	5	1.234	3.084	20.64	2.064	2.015	5
3	7.5	0.685	1.714	28.199	2.820	1.981	6
4	10	0.546	1.365	37.528	3.753	1.962	6
5	12.5	0.469	1.171	52.247	5.225	1.863	6
6	15	0.404	1.010	69.273	6.927	1.890	6
7	17.5	0.359	0.898	96.601	9.660	1.872	6
8	20	0.318	0.796	138.13	13.813	1.877	6
9	22.5	0.276	0.691	207.65	20.765	1.889	6
10	25	0.232	0.581	336.19	33.619	1.895	6
11	27.5	0.179	0.448	603.58	60.358	1.921	6
12	30	0.134	0.334	1149.1	114.910	2.169	5
13	32.5	0.096	0.239	3516.9	351.690	2.081	3
14	35	0.045	0.113	18896	1889.600	2.498	1

Tabella 4.124: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	1.206	4.019	16.52	1.652	1.930	3
2	6.666666667	1.234	4.112	23.552	2.355	1.943	6
3	10	0.685	2.285	31.561	3.156	1.949	6
4	13.33333333	0.546	1.820	41.116	4.112	1.971	6
5	16.66666667	0.469	1.562	57.793	5.779	1.853	6
6	20	0.404	1.346	77.603	7.760	1.857	6
7	23.33333333	0.359	1.197	106.99	10.699	1.861	6
8	26.66666667	0.318	1.061	151.25	15.125	1.887	6
9	30	0.276	0.921	230.75	23.075	1.871	6
10	33.33333333	0.232	0.775	370.11	37.011	1.895	6
11	36.66666667	0.179	0.597	665.83	66.583	1.916	6
12	40	0.134	0.445	1410.4	141.040	1.945	6
13	43.33333333	0.096	0.319	3590.6	359.060	2.243	5
14	46.66666667	0.045	0.150	20912	2091.200	2.484	2

Tabella 4.125: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	1.206	6.029	17.785	1.779	2.052	5
2	10	1.234	6.168	27.058	2.706	1.936	6
3	15	0.685	3.427	38.089	3.809	1.848	6
4	20	0.546	2.730	47.844	4.784	1.939	6
5	25	0.469	2.343	63.159	6.316	1.941	6
6	30	0.404	2.019	88.327	8.833	1.868	6
7	35	0.359	1.796	117.13	11.713	1.946	6
8	40	0.318	1.592	167.07	16.707	1.955	6
9	45	0.276	1.381	266.05	26.605	1.858	6
10	50	0.232	1.162	410.42	41.042	1.956	6
11	55	0.179	0.896	738.89	73.889	1.977	6
12	60	0.134	0.668	1577.4	157.740	1.990	6
13	65	0.096	0.479	4551.8	455.180	2.025	6
14	70	0.045	0.225	28153	2815.300	2.112	3

Tabella 4.126: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	1.206	12.057	24.76	2.476	1.857	6
2	20	1.234	12.336	35.892	3.589	1.839	6
3	30	0.685	6.854	48.183	4.818	1.841	6
4	40	0.546	5.461	63.532	6.353	1.839	6
5	50	0.469	4.685	84.064	8.406	1.838	6
6	60	0.404	4.038	111.76	11.176	1.860	6
7	70	0.359	3.592	154.3	15.430	1.861	6
8	80	0.318	3.183	223.73	22.373	1.840	6
9	90	0.276	2.762	338.02	33.802	1.842	6
10	100	0.232	2.324	549.49	54.949	1.841	6
11	110	0.179	1.792	994.49	99.449	1.850	6
12	120	0.134	1.336	2133.3	213.330	1.854	6
13	130	0.096	0.958	6171	617.100	1.882	6
14	140	0.045	0.451	38075	3807.500	1.968	6

Tabella 4.127: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 90°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

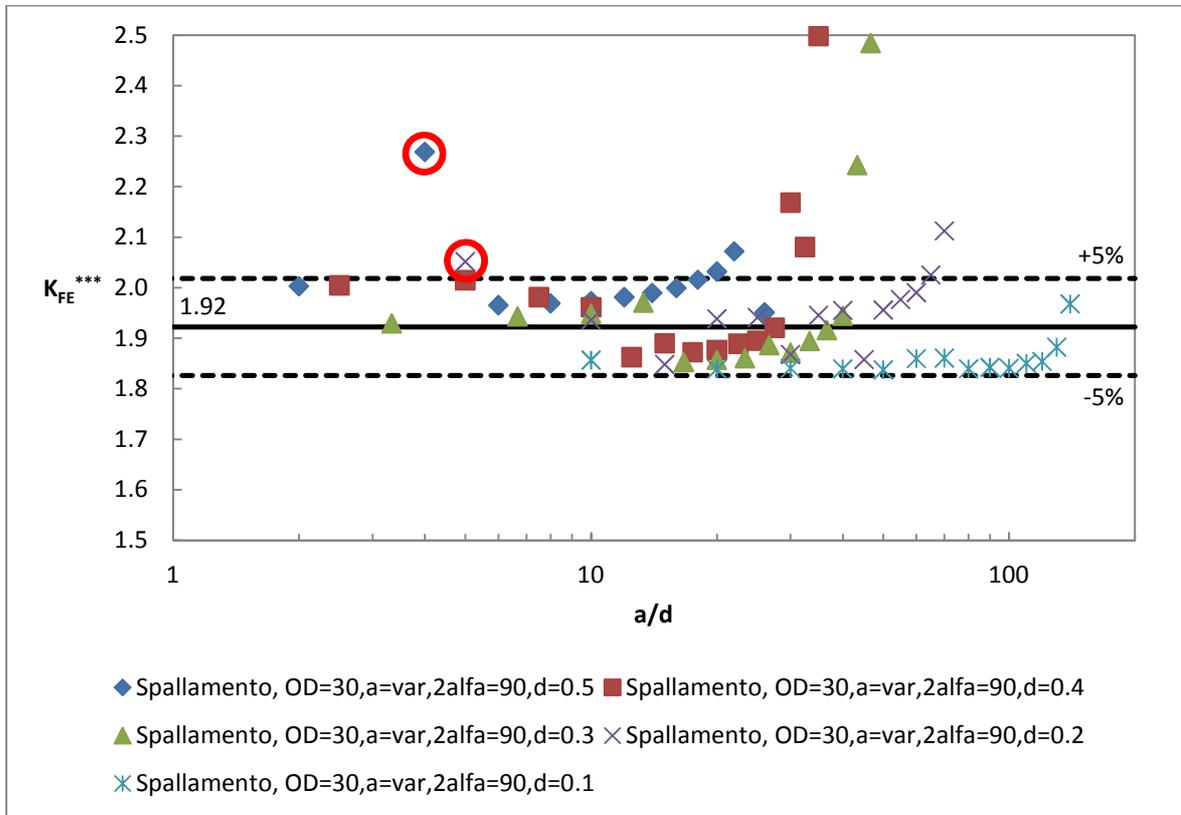


Figura 4.230: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, e in questo caso è coerente con il valore di riferimento calcolato numericamente uguale a 1.92; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato.

Anche in questo caso si riconfermano gli andamenti del K_{FE}^{***} uscenti dalle bande d'accettabilità per i motivi già discussi in precedenza; diagrammando gli stessi risultati in termini di x^*/d si ha quindi:

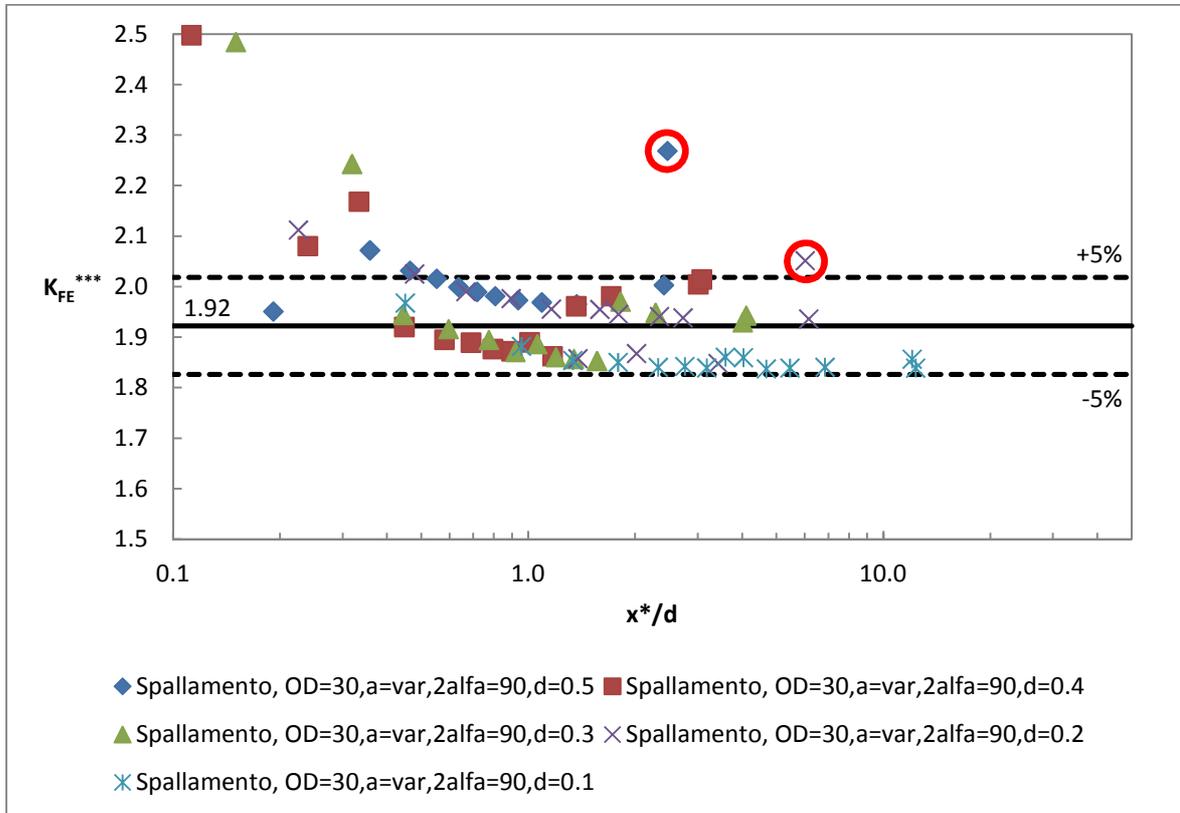


Figura 4.231: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, ed è coerente con il valore di riferimento calcolato numericamente uguale a 1.92; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato.

Da quest'ultimo diagramma si osserva quindi che la convergenza del metodo è ripristinata grazie a questa nuova definizione riguardo il fattore di convergenza a meno dei punti segnalati in rosso; in questi, infatti, a causa della piccola dimensione dell'intaglio e dell'elevata dimensione globale d'elemento, il programma automatico è costretto a ridurre le dimensioni dell'areola, distorcendo la mesh.

Di seguito si riporta la mesh di entrambi i punti in esame:

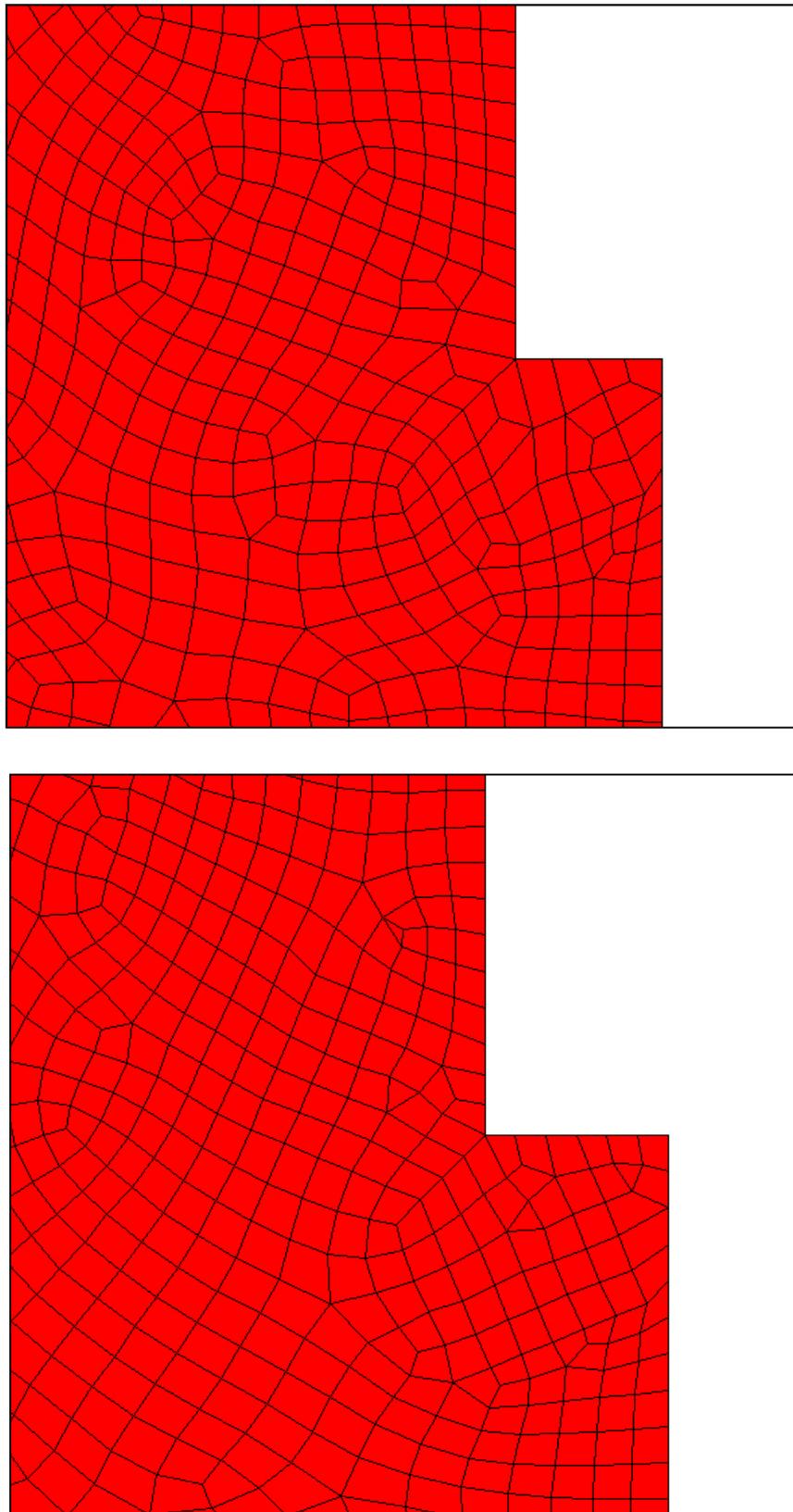


Figura 4.232: Mesh di entrambi i punti segnalati in rosso nei diagrammi dei risultati; la mesh superiore è relativa al punto segnalato con una global element size di 0.5 mm, mentre quella inferiore di 0.2 mm.

In conclusione per questo angolo d'apertura, depurando dall'analisi dei risultati i casi segnalati in rosso nei diagrammi, si osserva che:

- Il valore di riferimento di convergenza è pari a 1.92;
- Le bande di dispersione sono di ampiezza pari al 5% del valore di riferimento ricavato;
- La convergenza è assicurata per un x^*/d maggiore di 0.6.

4.4.5.3.2 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 120°

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	4.072	8.143	16.591	1.659	1.868	2
2	4	0.675	1.350	22.897	2.290	1.881	4
3	6	0.581	1.162	29.995	3.000	1.862	6
4	8	0.531	1.061	39.055	3.906	1.855	6
5	10	0.460	0.920	51.395	5.140	1.858	6
6	12	0.396	0.792	69.096	6.910	1.864	6
7	14	0.359	0.719	95.791	9.579	1.865	6
8	16	0.312	0.623	138.41	13.841	1.864	6
9	18	0.264	0.528	211.38	21.138	1.865	6
10	20	0.221	0.442	348.46	34.846	1.869	6
11	22	0.179	0.357	641.74	64.174	1.875	6
12	24	0.134	0.268	1408.1	140.810	1.885	6
13	26	0.093	0.186	4239.6	423.960	1.903	4
14	28	0.042	0.083	29211	2921.100	1.885	2

Tabella 4.128: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	4.072	10.179	17.539	1.754	1.868	2
2	5	0.675	1.688	24.247	2.425	1.879	5
3	7.5	0.581	1.453	31.747	3.175	1.860	6
4	10	0.531	1.327	41.336	4.134	1.853	6
5	12.5	0.460	1.149	54.388	5.439	1.857	6
6	15	0.396	0.991	73.144	7.314	1.862	6
7	17.5	0.359	0.898	101.41	10.141	1.862	6
8	20	0.312	0.779	146.57	14.657	1.862	6
9	22.5	0.264	0.660	223.9	22.390	1.862	6
10	25	0.221	0.553	369.23	36.923	1.865	6
11	27.5	0.179	0.447	680.66	68.066	1.869	6
12	30	0.134	0.336	1495.4	149.540	1.877	6
13	32.5	0.093	0.232	4519.2	451.920	1.888	5
14	35	0.042	0.104	31493	3149.300	1.849	2

Tabella 4.129: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	4.072	13.572	18.899	1.890	1.863	3
2	6.666666667	0.675	2.250	26.071	2.607	1.877	6
3	10	0.581	1.937	34.139	3.414	1.859	6
4	13.33333333	0.531	1.769	44.44	4.444	1.853	6
5	16.66666667	0.460	1.533	58.489	5.849	1.856	6
6	20	0.396	1.321	78.649	7.865	1.861	6
7	23.33333333	0.359	1.198	109.07	10.907	1.861	6
8	26.66666667	0.312	1.039	157.68	15.768	1.860	6
9	30	0.264	0.880	240.96	24.096	1.859	6
10	33.33333333	0.221	0.737	397.5	39.750	1.862	6
11	36.66666667	0.179	0.596	733.34	73.334	1.864	6
12	40	0.134	0.447	1613.4	161.340	1.869	6
13	43.33333333	0.093	0.310	4889.9	488.990	1.875	6
14	46.66666667	0.042	0.139	32161	3216.100	1.945	3

Tabella 4.130: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	4.072	20.359	20.955	2.096	1.860	5
2	10	0.675	3.375	28.873	2.887	1.876	6
3	15	0.581	2.905	37.806	3.781	1.858	6
4	20	0.531	2.653	49.215	4.922	1.851	6
5	25	0.460	2.299	64.776	6.478	1.854	6
6	30	0.396	1.981	87.097	8.710	1.860	6
7	35	0.359	1.797	120.81	12.081	1.859	6
8	40	0.312	1.559	174.66	17.466	1.858	6
9	45	0.264	1.319	266.97	26.697	1.857	6
10	50	0.221	1.105	440.67	44.067	1.859	6
11	55	0.179	0.894	813.46	81.346	1.860	6
12	60	0.134	0.671	1791.7	179.170	1.863	6
13	65	0.093	0.464	5445	544.500	1.863	6
14	70	0.042	0.208	36155	3615.500	1.915	5

Tabella 4.131: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	4.072	40.717	24.945	2.495	1.858	6
2	20	0.675	6.750	34.36	3.436	1.875	6
3	30	0.581	5.810	44.981	4.498	1.857	6
4	40	0.531	5.306	58.555	5.856	1.850	6
5	50	0.460	4.598	77.072	7.707	1.853	6
6	60	0.396	3.962	103.65	10.365	1.858	6
7	70	0.359	3.594	143.76	14.376	1.858	6
8	80	0.312	3.117	207.89	20.789	1.856	6
9	90	0.264	2.639	317.8	31.780	1.855	6
10	100	0.221	2.211	524.69	52.469	1.856	6
11	110	0.179	1.787	969.02	96.902	1.857	6
12	120	0.134	1.342	2136.5	213.650	1.858	6
13	130	0.093	0.929	6507.2	650.720	1.854	6
14	140	0.042	0.416	43560	4356.000	1.890	6

Tabella 4.132: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 120°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

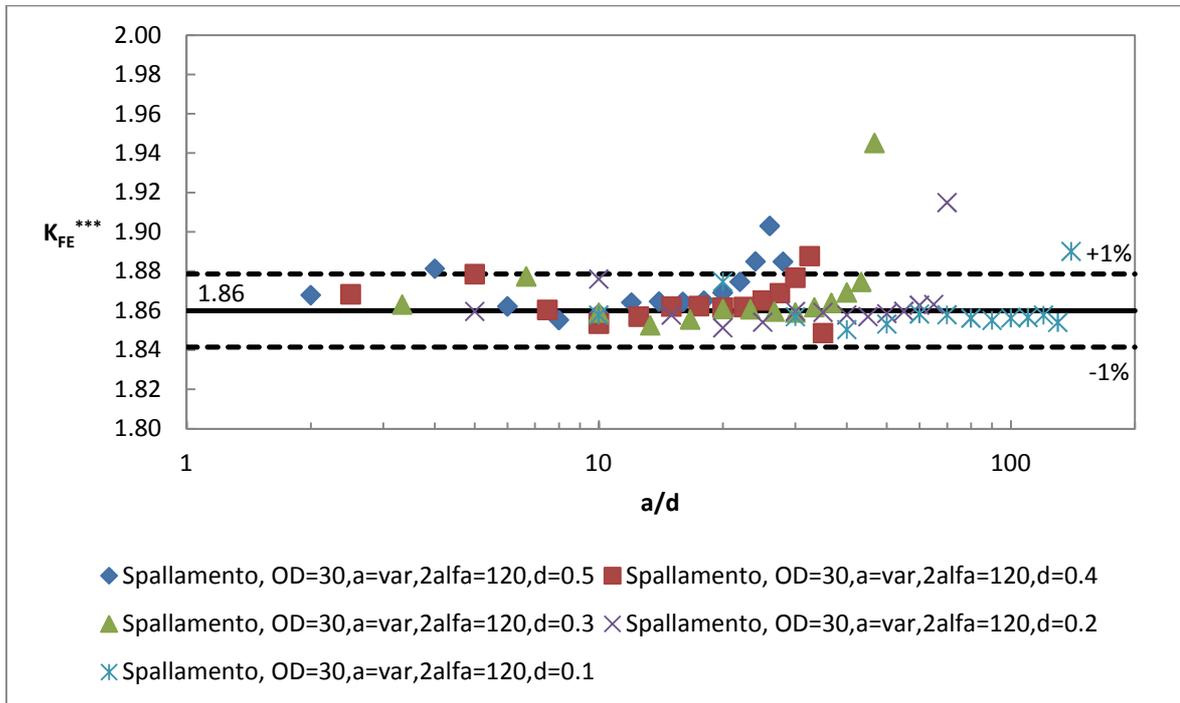


Figura 4.233: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.86; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d si ottiene:

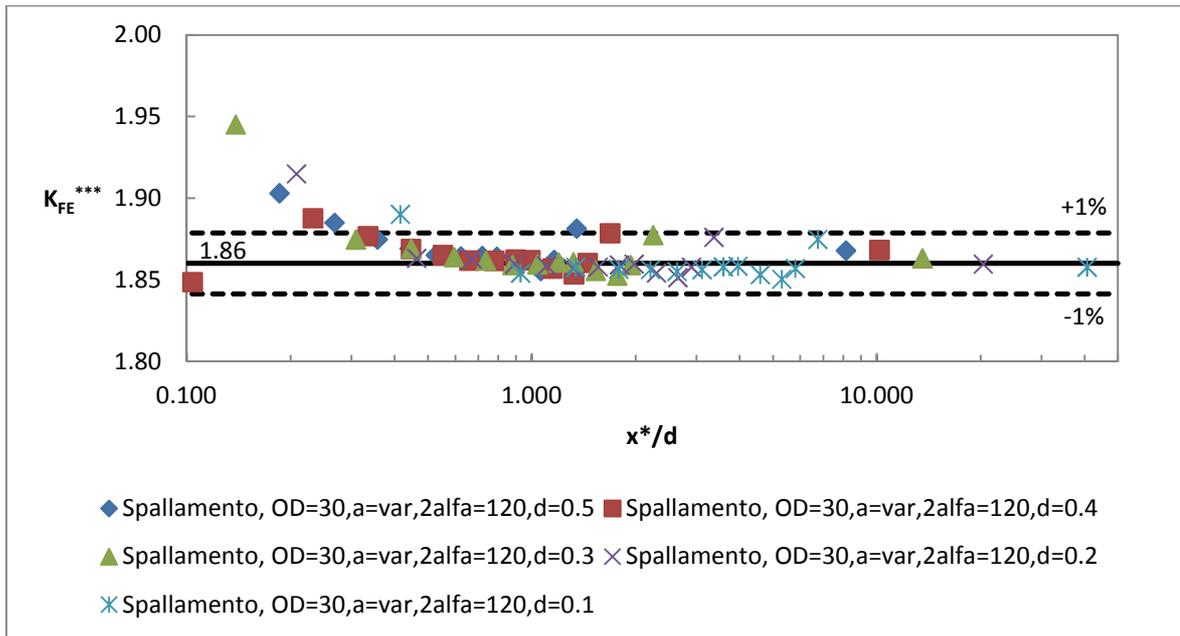


Figura 4.234: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento uguale a 1.86; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Si osserva quindi che con la seconda definizione in x^*/d la convergenza del metodo è ripristinata; si noti inoltre che:

- Il valore di riferimento di convergenza è pari a 1.86;
- Le bande di dispersione hanno ampiezza pari all'1% del valore di riferimento suddetto;
- Il limite di convergenza in termini di x^*/d è pari a 2 circa; si noti che un'ampiezza di banda leggermente più elevata avrebbe permesso di spostare tale limite a valori molto inferiori all'unità.

4.4.5.3.3 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 135°

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	1.520	3.040	16.477	1.648	1.996	2
2	4	0.643	1.285	22.053	2.205	1.992	5
3	6	0.534	1.069	28.496	2.850	1.992	6
4	8	0.489	0.978	36.876	3.688	1.991	6
5	10	0.429	0.857	48.467	4.847	1.994	6
6	12	0.394	0.788	65.28	6.528	1.991	6
7	14	0.358	0.716	90.876	9.088	1.990	6
8	16	0.299	0.598	132.1	13.210	1.993	6
9	18	0.250	0.500	203.29	20.329	1.997	6
10	20	0.213	0.426	338.41	33.841	1.997	6
11	22	0.167	0.335	631.03	63.103	2.004	6
12	24	0.130	0.260	1407.6	140.760	2.008	6
13	26	0.092	0.184	4345.9	434.590	2.022	4
14	28	0.045	0.089	30574	3057.400	2.002	2

Tabella 4.133: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	1.520	3.800	17.235	1.724	1.995	3
2	5	0.643	1.606	23.069	2.307	1.991	6
3	7.5	0.534	1.336	29.808	2.981	1.991	6
4	10	0.489	1.223	38.57	3.857	1.990	6
5	12.5	0.429	1.072	50.703	5.070	1.993	6
6	15	0.394	0.985	68.292	6.829	1.990	6
7	17.5	0.358	0.895	95.073	9.507	1.989	6
8	20	0.299	0.748	138.21	13.821	1.992	6
9	22.5	0.250	0.625	212.75	21.275	1.995	6
10	25	0.213	0.532	354.27	35.427	1.995	6
11	27.5	0.167	0.418	660.96	66.096	2.001	6
12	30	0.130	0.325	1475.8	147.580	2.003	6
13	32.5	0.092	0.230	4567	456.700	2.012	5
14	35	0.045	0.111	32377	3237.700	1.977	2

Tabella 4.134: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	1.520	5.067	18.274	1.827	1.993	4
2	6.666666667	0.643	2.142	24.447	2.445	1.990	6
3	10	0.534	1.781	31.58	3.158	1.991	6
4	13.33333333	0.489	1.630	40.873	4.087	1.989	6
5	16.66666667	0.429	1.429	53.713	5.371	1.992	6
6	20	0.394	1.314	72.355	7.236	1.990	6
7	23.33333333	0.358	1.193	100.74	10.074	1.988	6
8	26.66666667	0.299	0.997	146.47	14.647	1.991	6
9	30	0.250	0.834	225.52	22.552	1.994	6
10	33.33333333	0.213	0.710	375.61	37.561	1.993	6
11	36.66666667	0.167	0.558	701.1	70.110	1.998	6
12	40	0.130	0.433	1566.8	156.680	1.998	6
13	43.33333333	0.092	0.306	4858.4	485.840	2.003	6
14	46.66666667	0.045	0.148	33334	3333.400	2.034	3

Tabella 4.135: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	1.520	7.601	19.831	1.983	1.990	6
2	10	0.643	3.213	26.518	2.652	1.988	6
3	15	0.534	2.671	34.253	3.425	1.989	6
4	20	0.489	2.445	44.323	4.432	1.987	6
5	25	0.429	2.143	58.255	5.826	1.990	6
6	30	0.394	1.971	78.479	7.848	1.987	6
7	35	0.358	1.790	109.27	10.927	1.985	6
8	40	0.299	1.495	158.88	15.888	1.988	6
9	45	0.250	1.251	244.67	24.467	1.991	6
10	50	0.213	1.065	407.6	40.760	1.990	6
11	55	0.167	0.837	761.02	76.102	1.994	6
12	60	0.130	0.649	1702	170.200	1.993	6
13	65	0.092	0.459	5287.8	528.780	1.994	6
14	70	0.045	0.223	36536	3653.600	2.010	5

Tabella 4.136: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

PSM $d = 0.1$ mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	1.520	15.202	22.796	2.280	1.991	6
2	20	0.643	6.426	30.467	3.047	1.989	6
3	30	0.534	5.343	39.35	3.935	1.990	6
4	40	0.489	4.891	50.919	5.092	1.989	6
5	50	0.429	4.286	66.933	6.693	1.992	6
6	60	0.394	3.942	90.164	9.016	1.989	6
7	70	0.358	3.579	125.55	12.555	1.987	6
8	80	0.299	2.991	182.55	18.255	1.990	6
9	90	0.250	2.502	281.13	28.113	1.992	6
10	100	0.213	2.130	468.43	46.843	1.991	6
11	110	0.167	1.673	874.94	87.494	1.994	6
12	120	0.130	1.298	1957.6	195.760	1.992	6
13	130	0.092	0.918	6089.7	608.970	1.991	6
14	140	0.045	0.445	42304	4230.400	1.996	6

Tabella 4.137: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 135°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

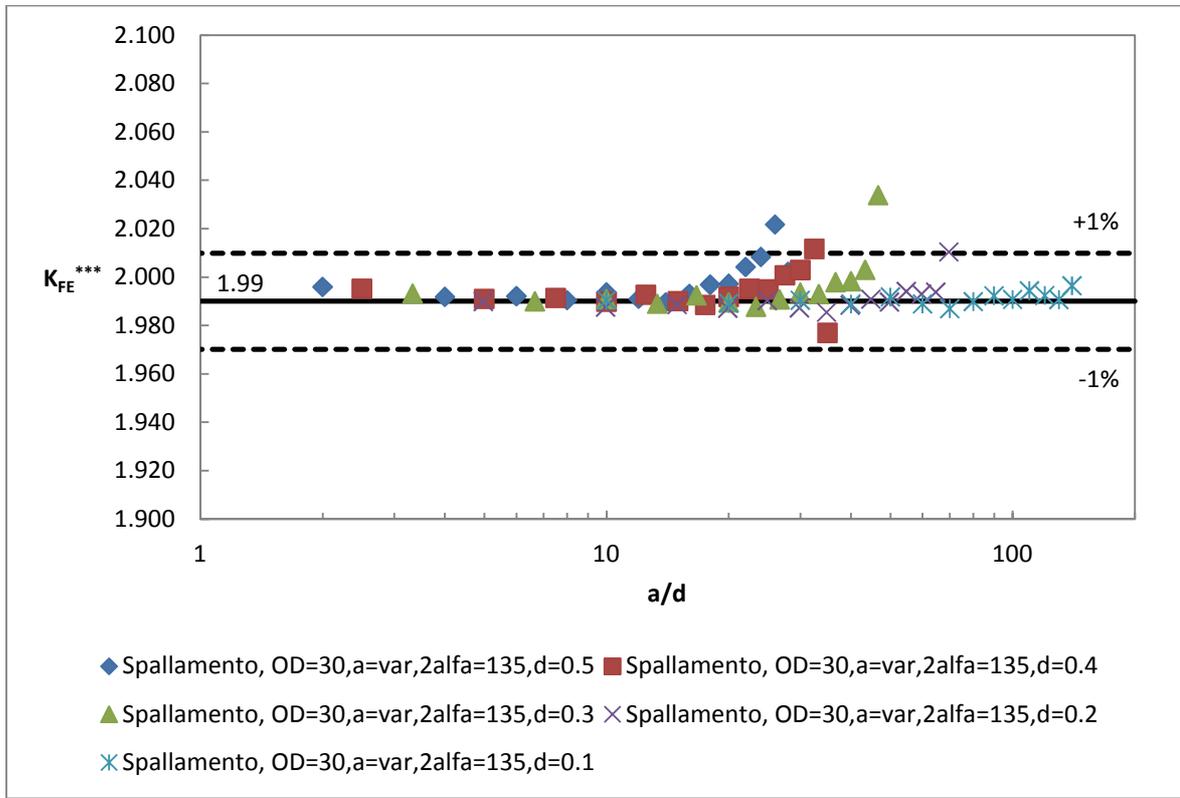


Figura 4.235: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 1.99; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , cioè del numero d'elementi che sono posizionati nella zona d'estensione del campo locale di tensione, si ha:

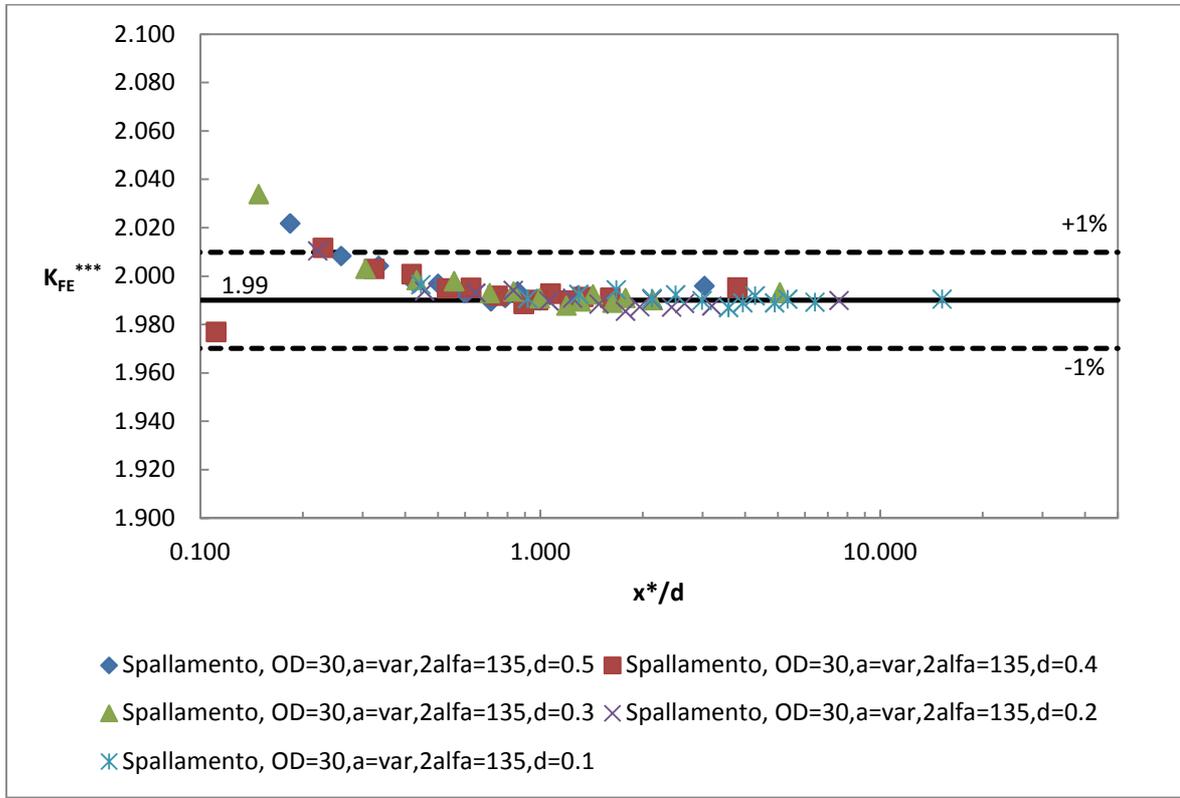


Figura 4.236: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è assunto un valore di riferimento pari a 1.99; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Ancora una volta la convergenza del metodo è ripristinata; si osserva inoltre che:

- Il valore di riferimento assunto è pari a 1.99;
- Le bande di convergenza hanno un'ampiezza dell'1% rispetto al valore di riferimento suddetto;
- Il valore limite di convergenza del parametro x^*/d è sensibilmente inferiore all'unità e pari a circa 0.3.

4.4.5.3.4 - Risultati ottenuti per angolo d'apertura pari a 150°

PSM d = 0.5 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2	0.767	1.535	15.853	1.585	2.137	3
2	4	0.590	1.179	20.549	2.055	2.135	6
3	6	0.542	1.084	26.211	2.621	2.133	6
4	8	0.501	1.002	33.79	3.379	2.131	6
5	10	0.440	0.881	44.447	4.445	2.135	6
6	12	0.393	0.787	60.109	6.011	2.135	6
7	14	0.367	0.735	84.168	8.417	2.130	6
8	16	0.332	0.664	123.27	12.327	2.130	6
9	18	0.293	0.585	191.47	19.147	2.130	6
10	20	0.224	0.448	322.27	32.227	2.133	6
11	22	0.187	0.374	609.32	60.932	2.130	6
12	24	0.136	0.272	1384.2	138.420	2.138	6
13	26	0.093	0.186	4391.3	439.130	2.146	4
14	28	0.046	0.092	31358	3135.800	2.177	1

Tabella 4.138: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.5 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.4 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	2.5	0.767	1.918	16.375	1.638	2.136	4
2	5	0.590	1.474	21.214	2.121	2.135	6
3	7.5	0.542	1.355	27.063	2.706	2.133	6
4	10	0.501	1.252	34.884	3.488	2.131	6
5	12.5	0.440	1.101	45.896	4.590	2.135	6
6	15	0.393	0.983	62.061	6.206	2.135	6
7	17.5	0.367	0.919	86.905	8.691	2.130	6
8	20	0.332	0.830	127.26	12.726	2.130	6
9	22.5	0.293	0.732	197.7	19.770	2.130	6
10	25	0.224	0.560	332.81	33.281	2.132	6
11	27.5	0.187	0.468	629.44	62.944	2.129	6
12	30	0.136	0.341	1430.7	143.070	2.135	6
13	32.5	0.093	0.233	4545.3	454.530	2.140	5
14	35	0.046	0.115	33228	3322.800	2.121	2

Tabella 4.139: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.4 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.3 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	3.333333333	0.767	2.557536	17.065	1.707	2.135	6
2	6.666666667	0.590	1.965468	22.105	2.211	2.135	6
3	10	0.542	1.806457	28.196	2.820	2.133	6
4	13.33333333	0.501	1.669569	36.341	3.634	2.132	6
5	16.66666667	0.440	1.468196	47.809	4.781	2.135	6
6	20	0.393	1.310851	64.652	6.465	2.136	6
7	23.33333333	0.367	1.224696	90.537	9.054	2.130	6
8	26.66666667	0.332	1.106594	132.61	13.261	2.130	6
9	30	0.293	0.97537	206.01	20.601	2.130	6
10	33.33333333	0.224	0.746233	346.81	34.681	2.132	6
11	36.66666667	0.187	0.623889	656.04	65.604	2.128	6
12	40	0.136	0.454052	1492	149.200	2.133	6
13	43.33333333	0.093	0.310814	4745.2	474.520	2.136	6
14	46.66666667	0.046	0.153782	34126	3412.600	2.151	3

Tabella 4.140: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.3 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.2 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	5	0.767	3.836	18.087	1.809	2.135	6
2	10	0.590	2.948	23.42	2.342	2.135	6
3	15	0.542	2.710	29.872	2.987	2.134	6
4	20	0.501	2.504	38.503	3.850	2.132	6
5	25	0.440	2.202	50.655	5.066	2.136	6
6	30	0.393	1.966	68.494	6.849	2.136	6
7	35	0.367	1.837	95.927	9.593	2.131	6
8	40	0.332	1.660	140.49	14.049	2.130	6
9	45	0.293	1.463	218.27	21.827	2.130	6
10	50	0.224	1.119	367.44	36.744	2.132	6
11	55	0.187	0.936	695.23	69.523	2.128	6
12	60	0.136	0.681	1581.5	158.150	2.133	6
13	65	0.093	0.466	5035.3	503.530	2.133	6
14	70	0.046	0.231	36362	3636.200	2.140	4

Tabella 4.141: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.2 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

PSM d = 0.1 mm							
a [mm]	$\frac{a}{d}$	x^* [mm]	$\frac{x^*}{d}$	τ_{peak} [MPa]	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{nom}}$	K_{FE}^{***}	N° effettivo elementi areola
1	10	0.767	7.673	19.97	1.997	2.135	6
2	20	0.590	5.896	25.854	2.585	2.136	6
3	30	0.542	5.419	32.978	3.298	2.134	6
4	40	0.501	5.009	42.506	4.251	2.132	6
5	50	0.440	4.405	55.914	5.591	2.136	6
6	60	0.393	3.933	75.603	7.560	2.137	6
7	70	0.367	3.674	105.89	10.589	2.131	6
8	80	0.332	3.320	155.08	15.508	2.131	6
9	90	0.293	2.926	240.92	24.092	2.130	6
10	100	0.224	2.239	405.61	40.561	2.133	6
11	110	0.187	1.872	767.46	76.746	2.128	6
12	120	0.136	1.362	1746.1	174.610	2.133	6
13	130	0.093	0.932	5561.8	556.180	2.132	6
14	140	0.046	0.461	40283	4028.300	2.132	6

Tabella 4.142: Riassunto dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM con una global element size pari a 0.1 mm e un angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150°.

Riassumendo in un grafico quanto ottenuto in termini di coefficiente adimensionale K_{FE}^{***} in funzione del rapporto a/d si ottiene:

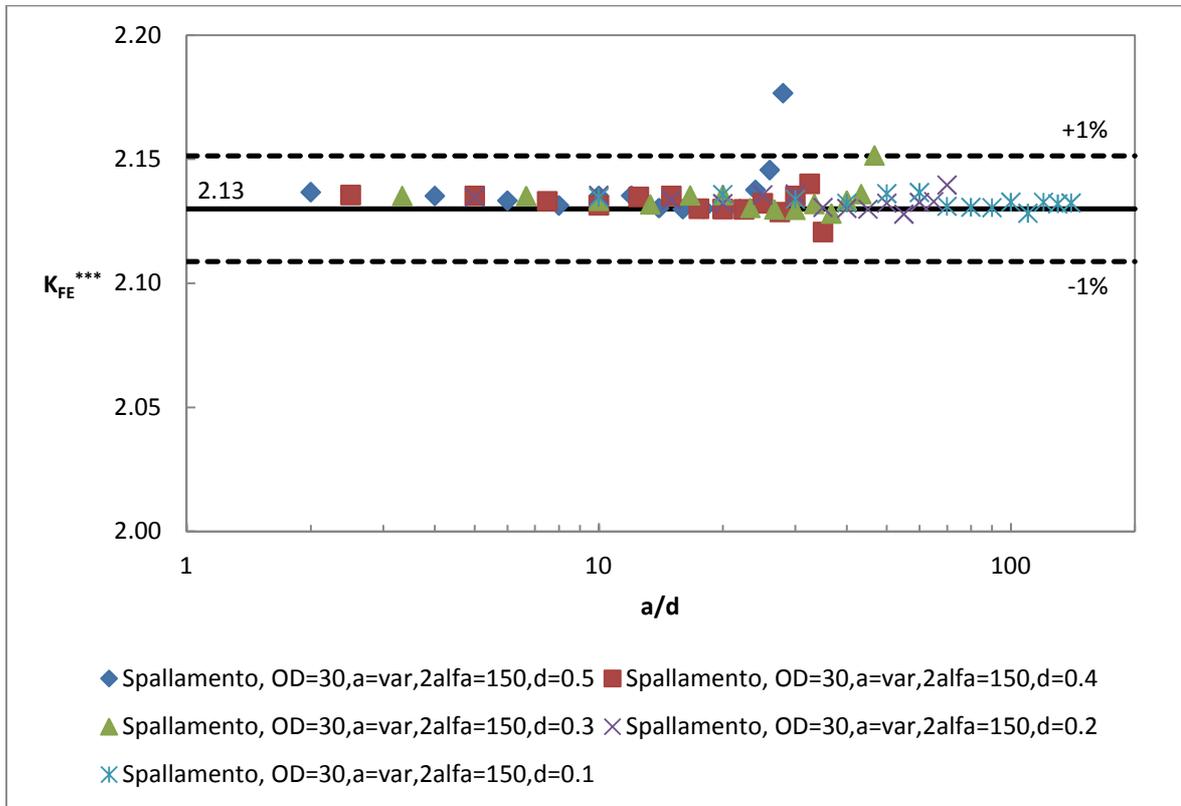


Figura 4.237: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 2.13; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d si ha:

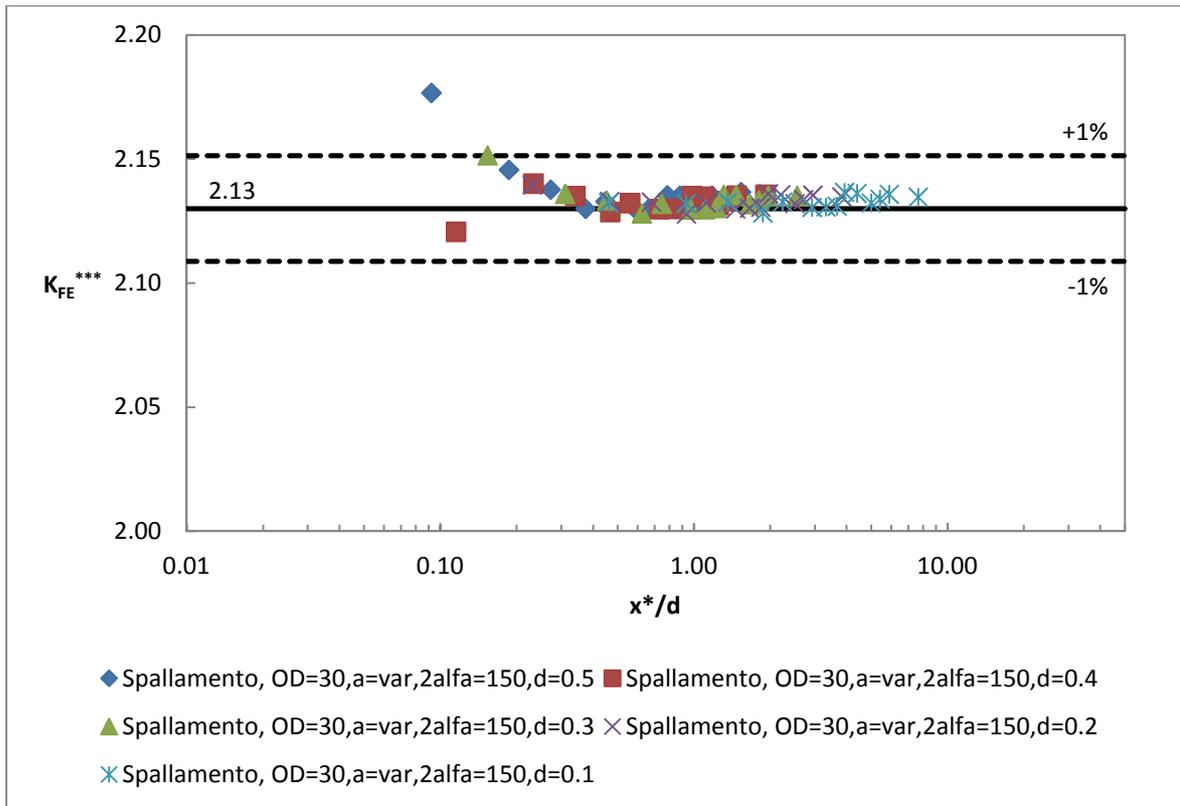


Figura 4.238: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è calcolato un valore di riferimento pari a 2.13; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 1% rispetto al valore calcolato.

Si osserva perciò che:

- Il valore di riferimento di convergenza è pari a 2.13, molto lontano dagli altri valori ricavati per gli altri angoli d'apertura ma coerente con tutti i risultati ricavati finora per ogni geometria nel caso d'angolo d'apertura di 150° ;
- Le bande di dispersione hanno ampiezza pari all'1% del valore di riferimento suddetto;
- Il limite di convergenza in termini di x^*/d è inferiore all'unità e pari a circa 0.2.

4.4.5.4 - Riassunto dei risultati ottenuti

In conclusione, dopo aver determinato per angolo d'apertura il valore di riferimento e la banda d'accettabilità nei vari casi d'applicazione del PSM con mesh controllata tramite l'utilizzo di un'areola centrata all'apice dell'intaglio, si vuole riassumere tutti i risultati in alcuni diagrammi dove si esprime il K_{FE}^{***} prima in funzione di a/d e poi di x^*/d .

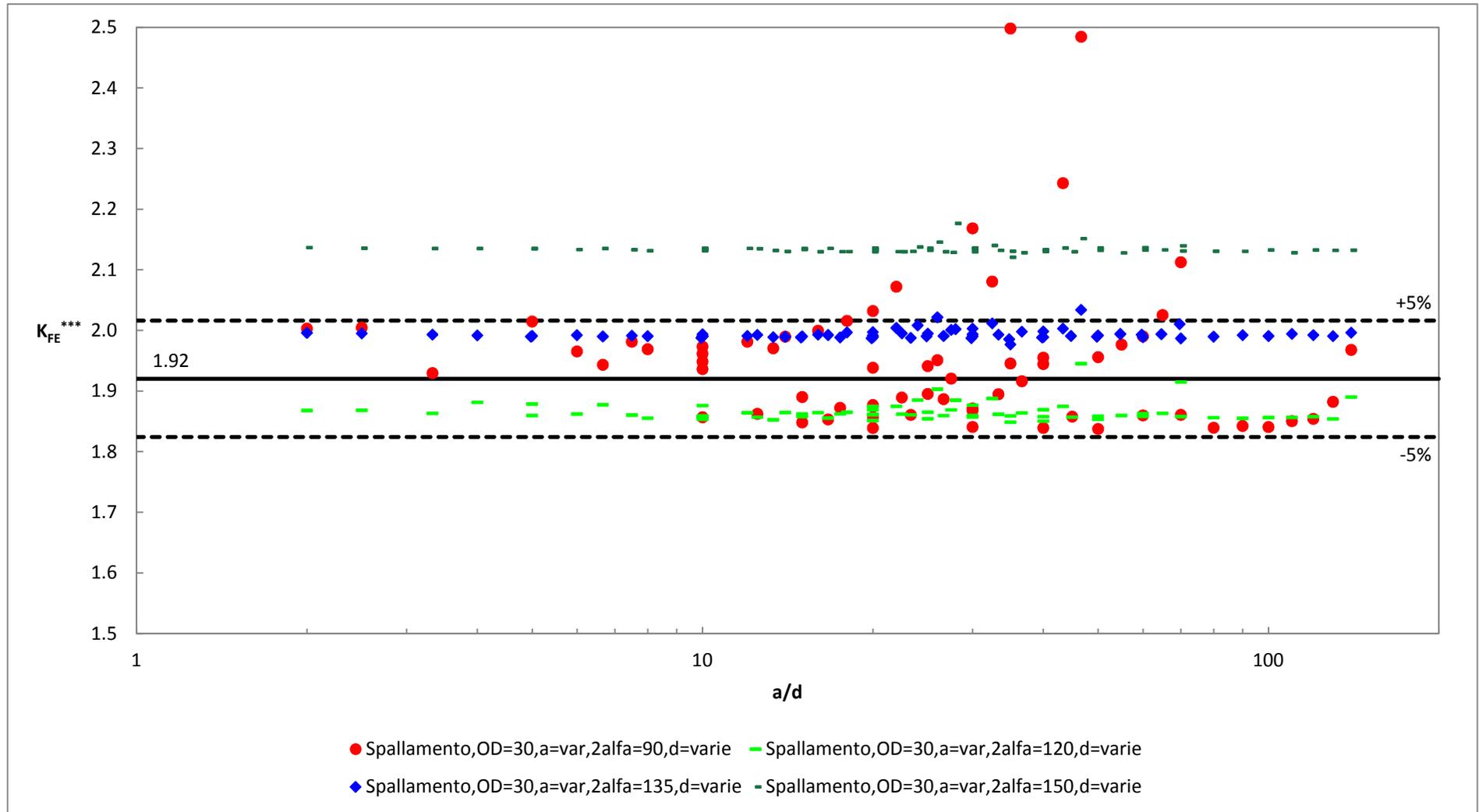


Figura 4.239: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.92; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

Si noti che con un singolo simbolo si sono indicate tutte le curve relative a diverse dimensioni globali d'elemento di un singolo angolo d'apertura.

Per i motivi già descritti durante la trattazione esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione del parametro a/d si ottengono delle curve che tendono ad uscire dalla banda d'accettabilità a causa della già menzionata interazione tra i campi di tensione locali. Come già osservato durante l'analisi dei singoli angoli d'apertura dell'intaglio per riportare il metodo a convergenza è utile esprimere il suddetto parametro adimensionale K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , dove si ricorda che con il simbolo x^* si intende l'estensione del campo locale di tensione calcolata numericamente.

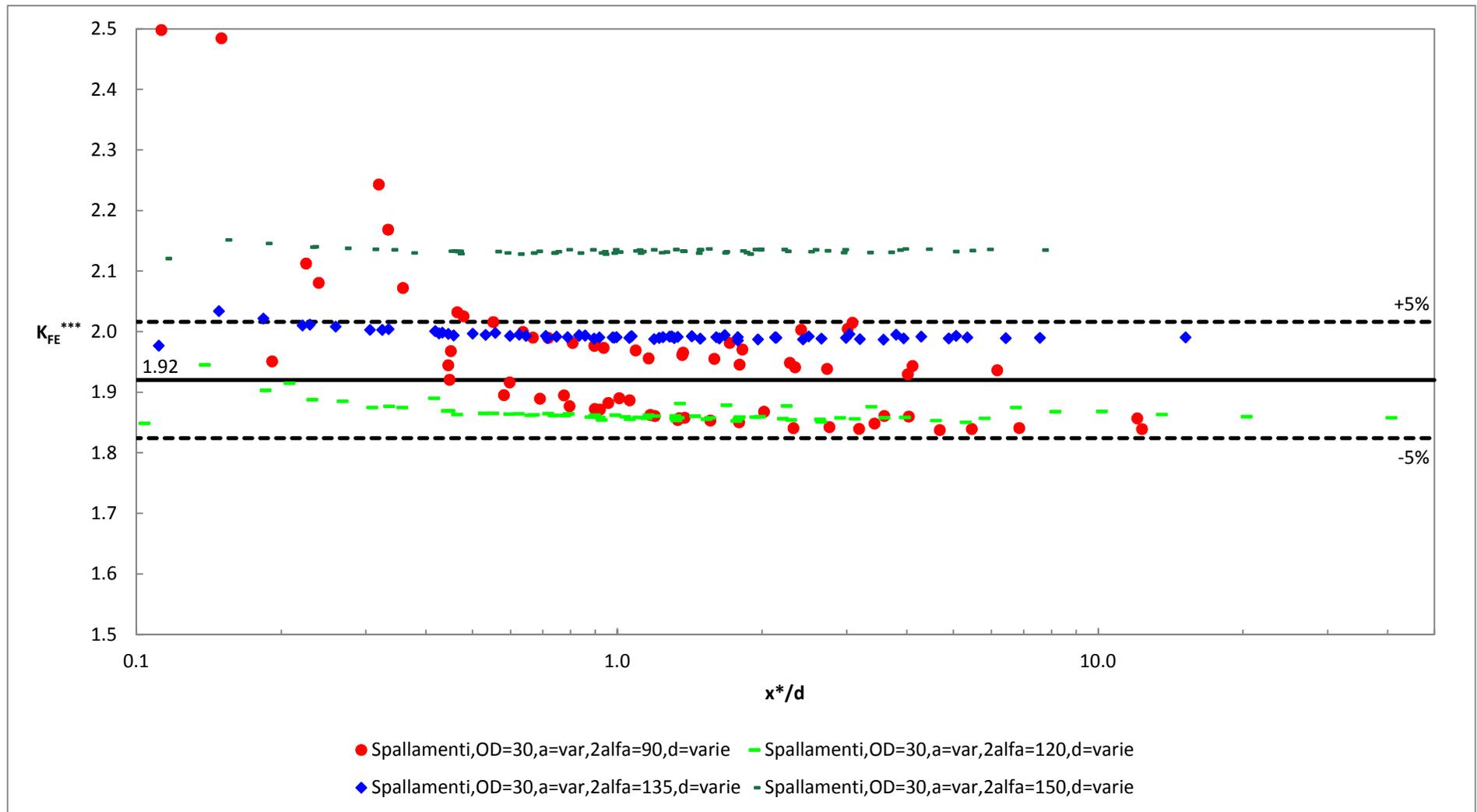


Figura 4.240: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.92; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

La nuova definizione per l'espressione di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d permette di far convergere in banda tutti i valori che con la precedente definizione, quella in a/d , uscivano anche per valori di quest'ultimo parametro nominalmente a convergenza; si noti inoltre che nei grafici riassuntivi i punti segnalati in rosso nei diagrammi dei singoli angoli d'apertura non sono stati riportati.

L'utilizzo dell'areola per il controllo della mesh nell'intorno del punto di singolarità ha consentito di aumentare il valore medio numerico calcolato ad 1.92, coerente col valore fissato in letteratura [4] pari a 1.93, e di diminuire l'ampiezza delle bande di dispersione dei risultati attorno al valore di riferimento al 5% di quest'ultimo. Per contro l'utilizzo dell'areola comporta un tempo d'applicazione del metodo maggiore che nel caso d'uso unicamente di una mesh senza controllo.

Si osserva inoltre che anche in questo caso, come in tutti gli altri finora trattati, ogni risultato relativo all'angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150° cade fuori dalla banda d'accettabilità; questo comportamento quindi si ripete per ogni configurazione geometrica (intagli, spallamenti) e per ogni modalità di mesh.

I limiti di convergenza complessivi del metodo, espressi in funzione del rapporto tra l'estensione del campo locale di tensione e la global element size della mesh, sono pari a:

$$\frac{x^*}{d} \geq 0.6 \quad (4.13)$$

4.4.6 - Mesh PSM controllata tramite areola centrata all'apice dell'intaglio e utilizzo dell' algoritmo di meshatura mapped all'interno dell'areola

Nel paragrafo precedente si è applicato il PSM utilizzando un'areola centrata all'apice dell'intaglio per il controllo della mesh nell'intorno dello stesso e si è osservato che in due casi, entrambi a convergenza in termini di x^*/d , la mesh ottenuta non è conforme a quanto definito dalla letteratura in [7]. Per cercare di uniformare maggiormente le mesh ottenute attraverso l'applicazione del metodo si è quindi sperimentato l'utilizzo dell'algoritmo di meshatura mapped internamente all'areola già definita precedentemente; si noti però che in questo caso non tutti layout delle mesh ottenuti al variare delle grandezze geometriche saranno coerenti con quanto richiesto dalla letteratura [7].

Per le configurazioni dell'areola adottate al variare dell'angolo d'apertura dell'intaglio si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 4.3.5; in questo caso si è costruita un'areola 6x6 per ogni apertura analizzata. Si faccia attenzione che nel caso d'angolo d'apertura uguale a 90° si utilizza un'areola da 5 lati; per utilizzare la metodologia mapped è necessario concatenare la due linee inferiori dell'areola.

Anche in questo caso, a causa del fatto che non si assegna alcuna informazione alla linee di contorno dell'areola, è necessario applicare una delle due procedure descritte nel paragrafo 4.3.5 per evitare che l'algoritmo automatico assegni un numero errato d'elementi ai lati e quindi possa fallire la meshatura di tipo mapped; si è scelto ancora una volta di aumentare leggermente la global element size assegnata poiché lo si ritiene il metodo più rapido in fase applicativa. Si noti che ancora una volta che l'aumento sufficiente è dello 0.1% rispetto al valore nominale, e risulta completamente trascurabile in fase d'analisi dei risultati.

4.4.6.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Il programma automatico utilizzato in questo caso è lo stesso già descritto nel paragrafo precedente; le uniche differenze riguardano la variabile "free" che è posta uguale a 0 per ottenere una mesh mapped internamente all'areola.

4.4.6.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

Si riportano di seguito alcuni esempi delle mesh ottenute attraverso questo modo di procedere.

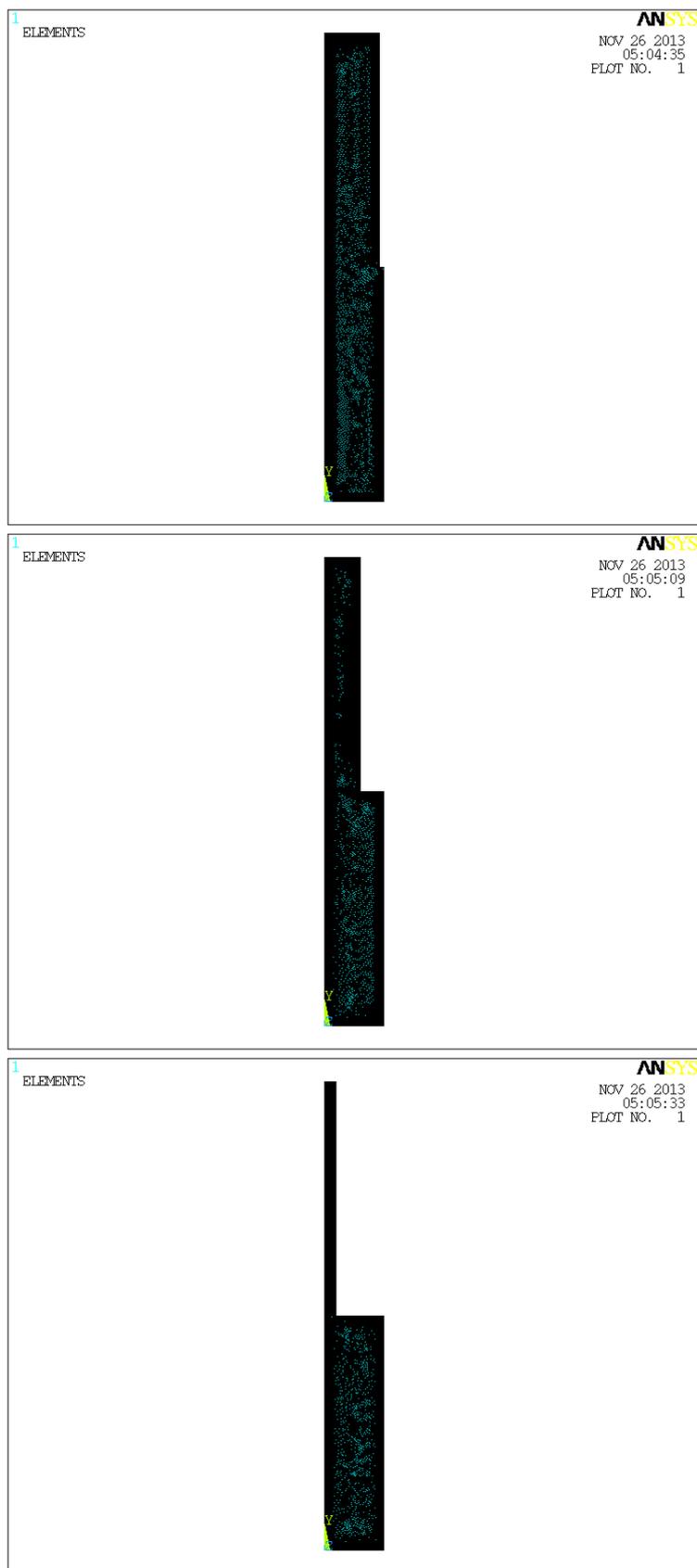


Figura 4.241: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

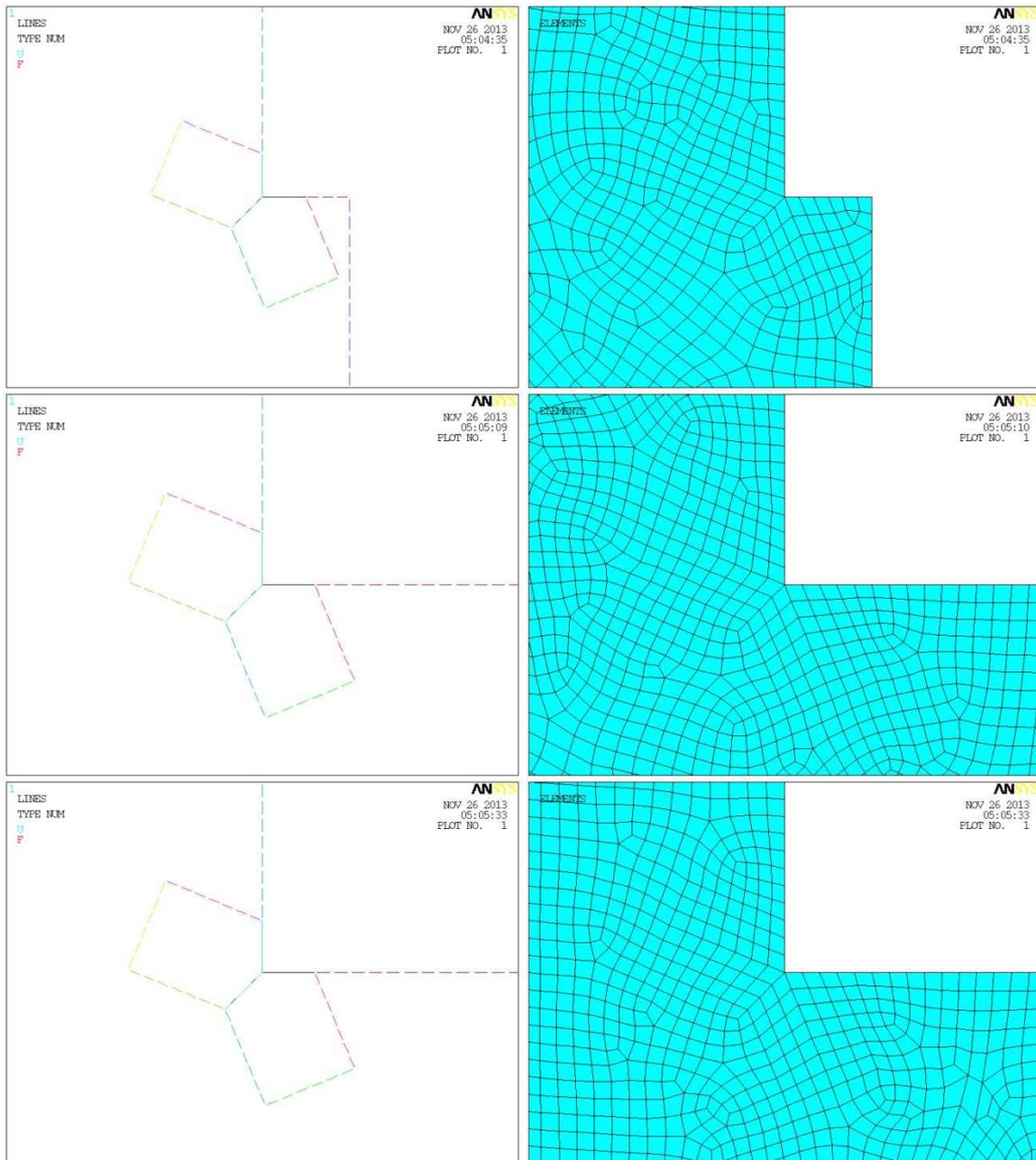


Figura 4.242: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 90^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm. Si noti che nel primo caso il programma automatico è stato costretto a ridurre le dimensioni dell'areola per questioni d'ingombro della stessa.

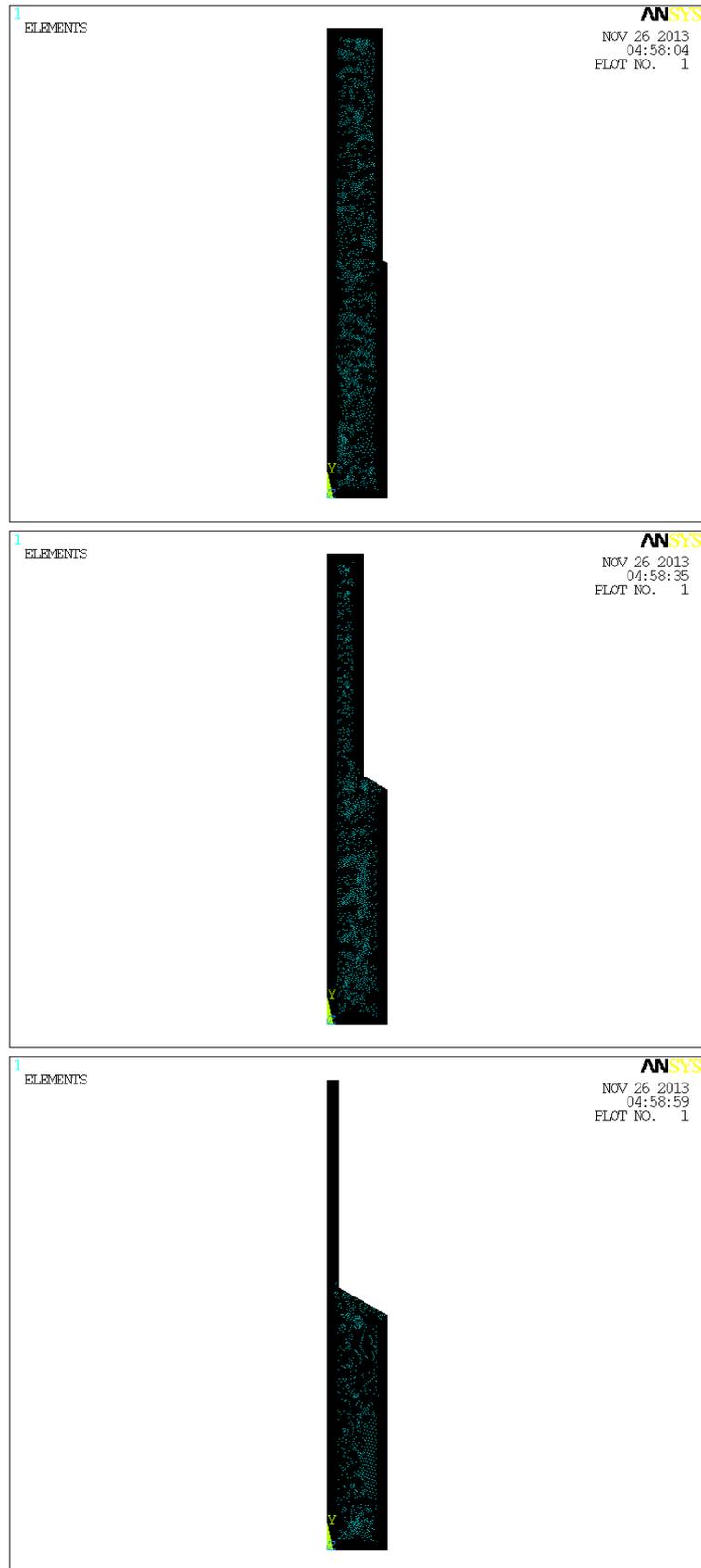


Figura 4.243: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

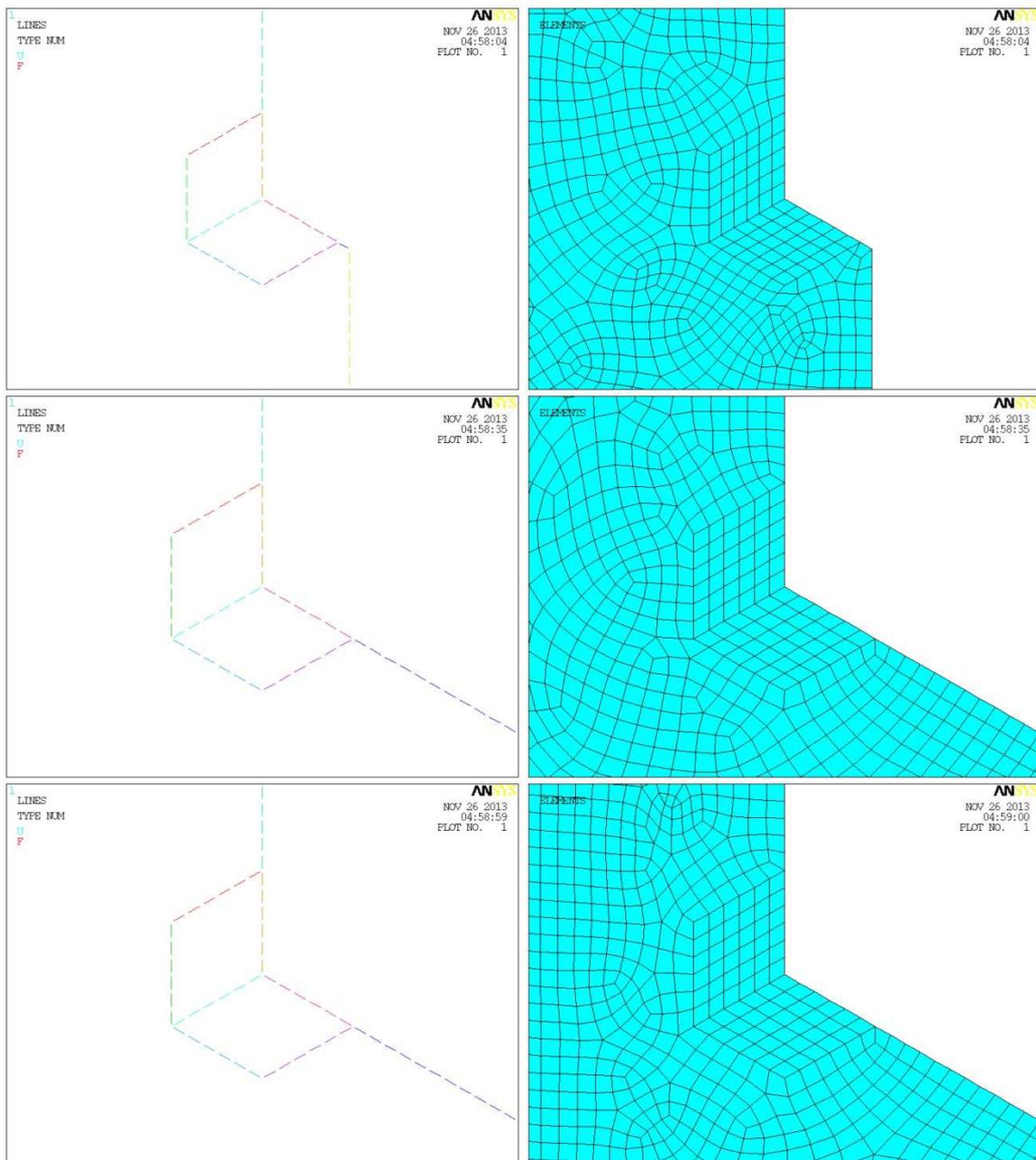


Figura 4.244: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 120^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

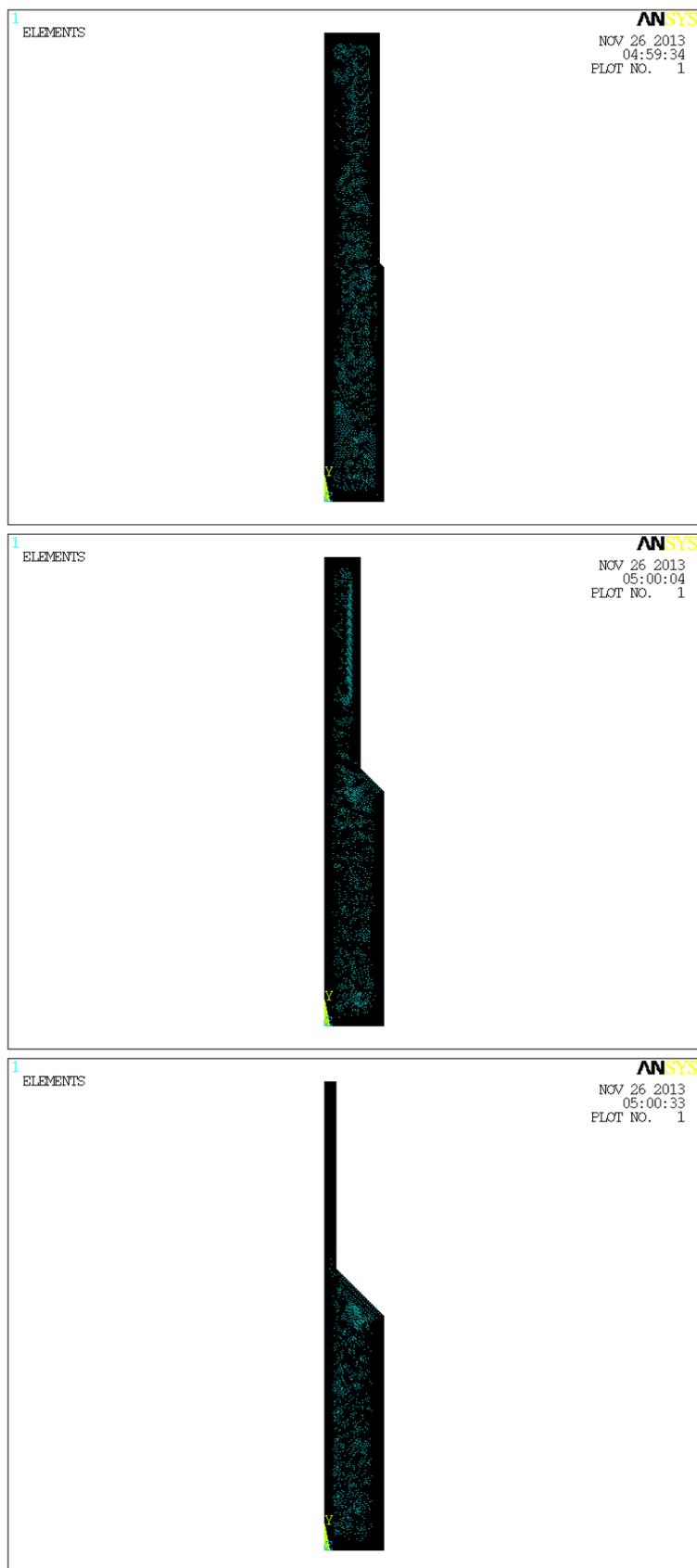


Figura 4.245: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

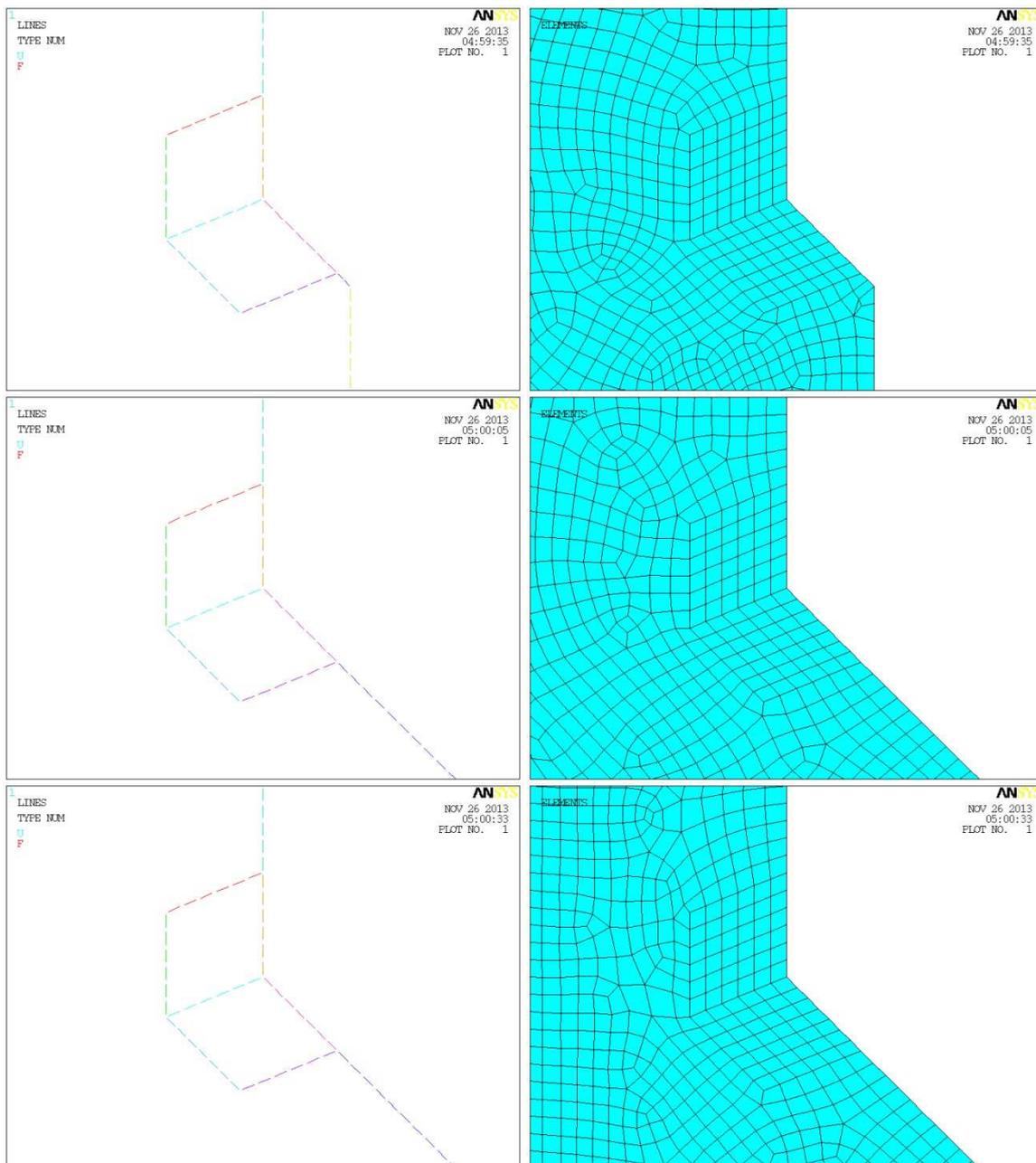


Figura 4.246: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 135^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.



Figura 4.247: Vista globale della mesh ottenuta con l'approccio controllato con areola all'apice dell'intaglio e algoritmo mapped. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

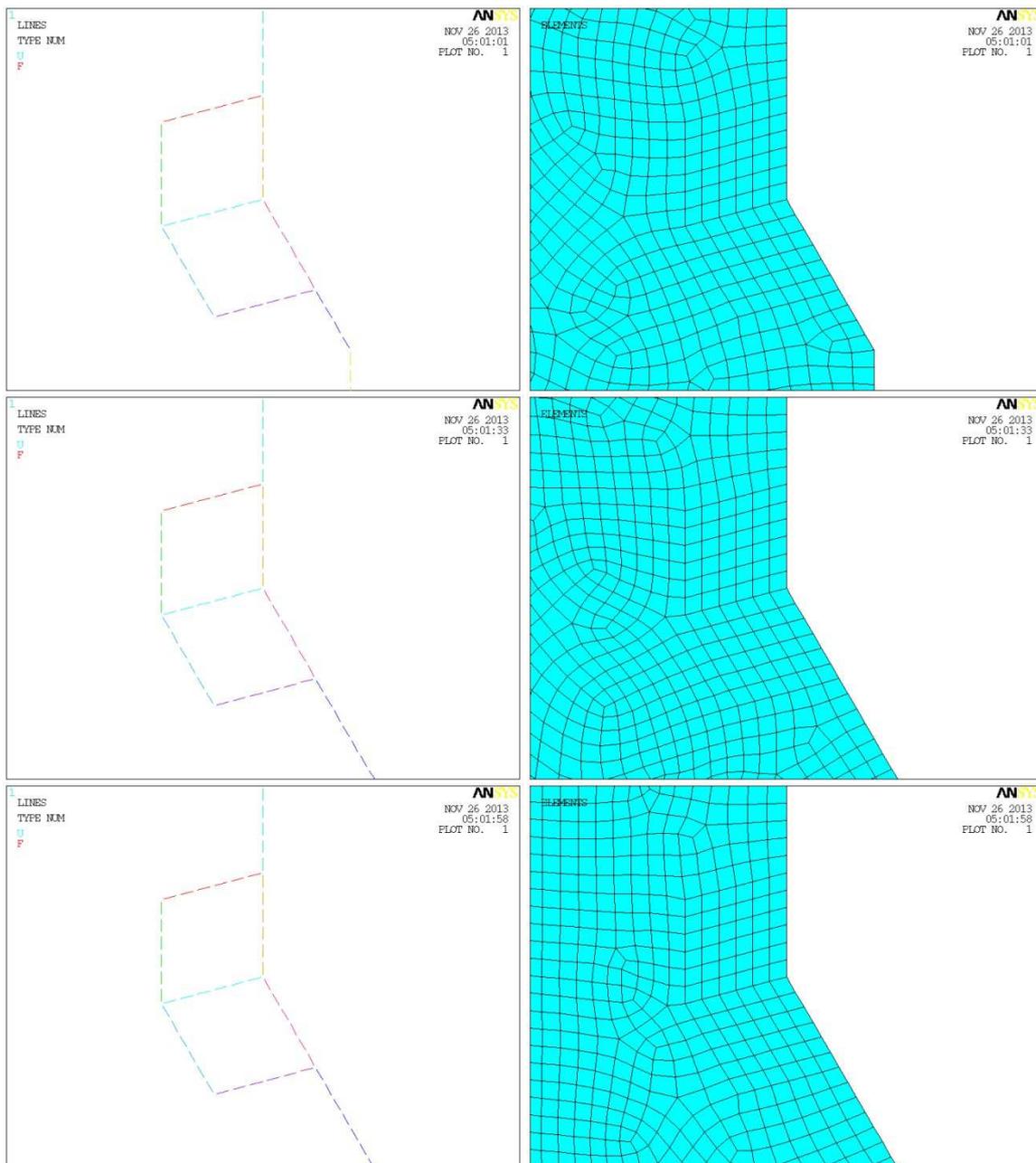


Figura 4.248: A sinistra sono riportate le linee che compongono l'areola e a destra una vista di dettaglio della mesh ottenuta con l'approccio controllato mapped; l'immagine è centrata all'apice dell'intaglio. Il caso in figura si riferisce a un angolo d'apertura dell'intaglio $2\alpha = 150^\circ$, una dimensione d'elemento pari a 0.2 mm e, dall'alto verso il basso, un intaglio di dimensione caratteristica rispettivamente 1, 6 e 12 mm.

4.4.6.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

L'applicazione del metodo PSM sfruttando l'areola centrata all'apice dell'intaglio e una mesh mapped internamente alla stessa non è un approccio consigliato dallo scrittore, principalmente a causa della complessità che si ritrova in ambito applicativo nella creazione di tali tipologie di mesh per le quali, si ricorda, si devono utilizzare aree a quattro

lati mantenendo vincoli relativi al numero d'elementi dei lati opposti del quadrilatero. Tale metodo risulta utile quindi nel momento in cui le metodologie non controllata o con areola free falliscono in termini di layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità, ma non è inteso per l'utilizzo individuale. Per questo motivo non si riportano tutti i risultati per ogni singola apertura, ma si riassumono tutti in un unico grafico.

4.4.6.4 - Riassunto dei risultati ottenuti

In conclusione, dopo aver applicato il PSM con mesh controllata tramite l'utilizzo di un'areola centrata all'apice dell'intaglio e dell'algoritmo di meshatura mapped, si vuole riassumere tutti i risultati in alcuni diagrammi dove si esprime il K_{FE}^{***} prima in funzione di a/d e poi di x^*/d .

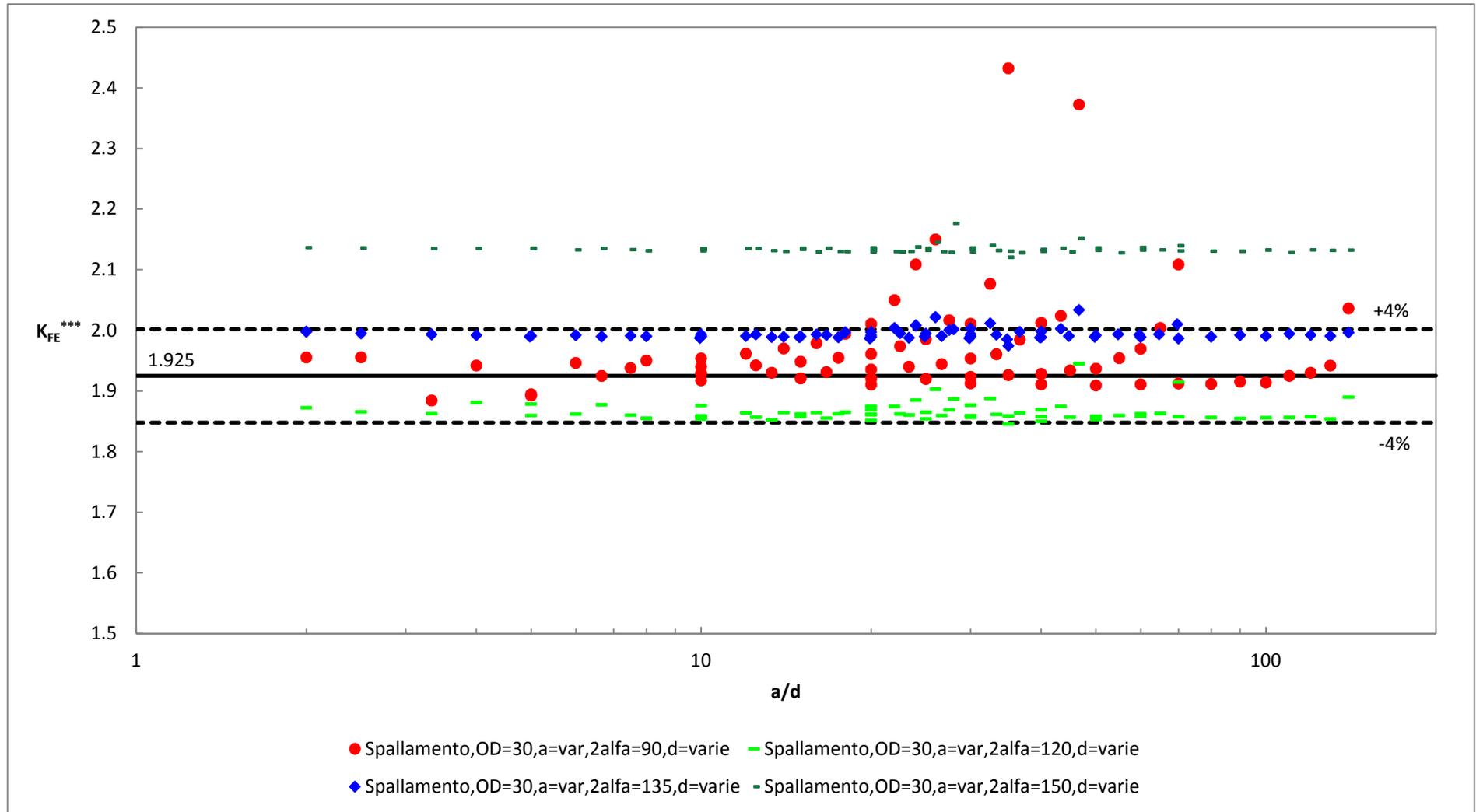


Figura 4.249: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di a/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.925; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

Si noti che con un singolo simbolo si sono indicate tutte le curve relative a diverse dimensioni globali d'elemento di un singolo angolo d'apertura.

Per i motivi già descritti durante la trattazione esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione del parametro a/d si ottengono delle curve che tendono ad uscire dalla banda d'accettabilità a causa della già menzionata interazione tra i campi di tensione locali. Come già osservato oramai numerose volte per riportare il metodo a convergenza è utile esprimere il suddetto parametro adimensionale K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , dove si ricorda che con il simbolo x^* si intende l'estensione del campo locale di tensione calcolata numericamente.

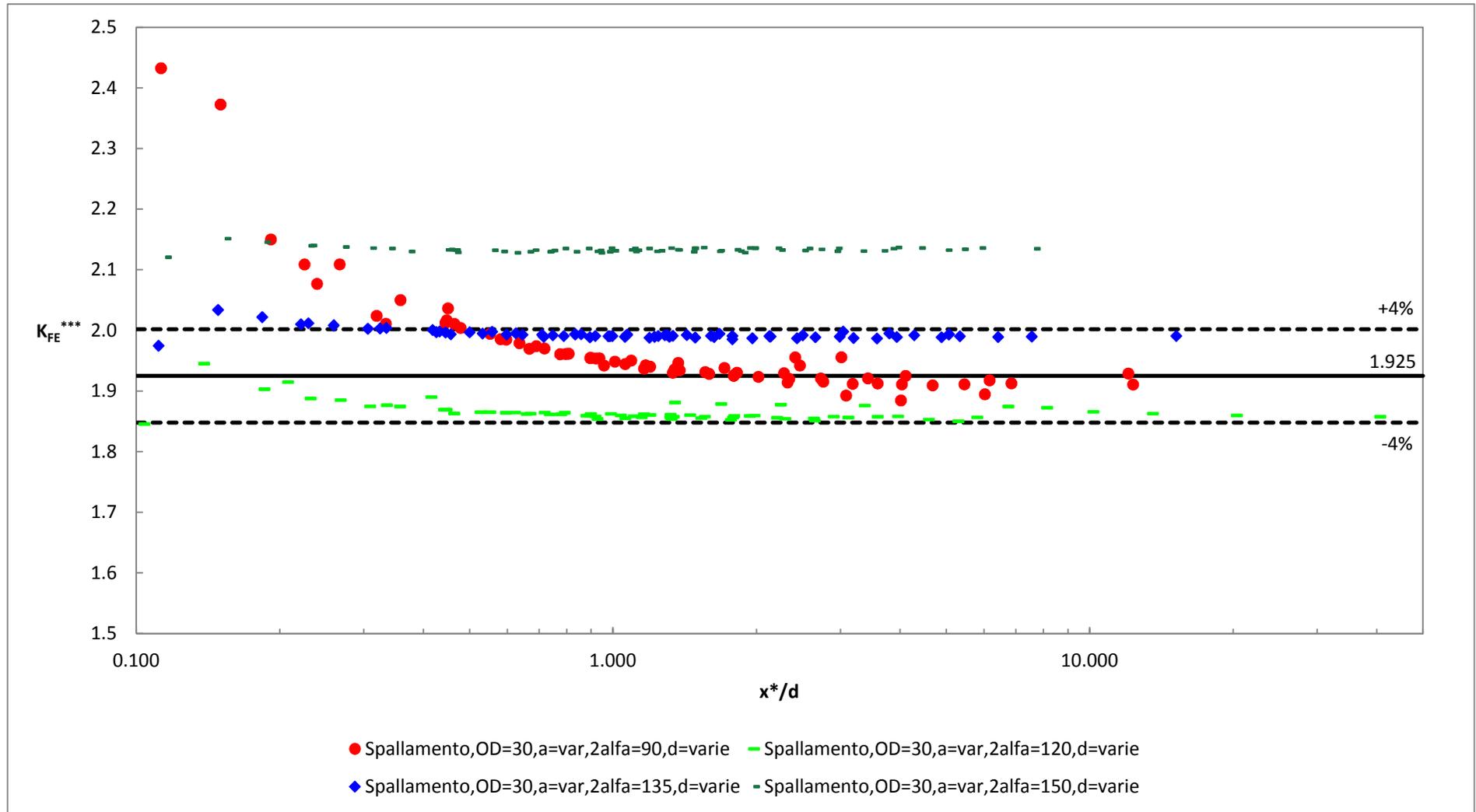


Figura 4.250: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.925; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

La nuova definizione per l'espressione di K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d permette di far convergere in banda tutti i valori che con la precedente definizione, quella in a/d , escono nonostante si trovino a convergenza.

L'utilizzo dell'areola centrata all'apice dell'intaglio porta gli stessi vantaggi e svantaggi già descritti nel caso di mesh free interna alla stessa; nel caso mapped si osserva una dispersione dei valori relativi a ogni singolo grado d'apertura inferiore, legata al fatto che in questo modo l'algoritmo non ha possibilità di scelta per il layout della mesh che è sempre uniforme. Globalmente però si osserva che il valore di riferimento e l'ampiezza delle bande di dispersione sono coerenti con quanto già ricavato per areola con mesh free interna; si ha quindi un valore medio di 1.925 con bande di dispersione di ampiezza pari al 4% di quest'ultimo.

Anche in questo caso il limite di convergenza in termini di x^*/d è inferiore all'unità e pari a 0.5 circa.

Ancora una volta si osserva che l'angolo d'apertura di 150° converge a valori molto più alti di quelli in banda; si noti che questi valori sono pressoché invariati in tutti i casi trattati e si può quindi dedurre che il problema è legato all'angolo d'apertura stesso e non al layout della mesh.

Concludendo, l'utilizzo dell'areola con mesh mapped è sconsigliato per la laboriosità che si presenta nel caso d'applicazione in ambito industriale; rimane comunque una valida soluzione nel qual caso non sia possibile ricavare un layout della mesh corretto nell'intorno del punto di singolarità con uno degli altri metodi precedentemente descritti.

4.5 - Riassunto dei risultati

Come ultimo passo si procedere a riassumere i risultati ottenuti per tutte le analisi di modo III svolte, siano essi riferiti ai giunti saldati ricavati dalla letteratura, alle cricche esterne su provino, ad intagli con vari angoli d'apertura o a spallamenti. Appurato che l'approccio classico per il quale si diagramma il K_{FE}^{***} in funzione di a/d non consente di ottenere informazioni a causa delle peculiarità già discusse, in questa sezione riassuntiva si riportano i risultati direttamente in termini di x^*/d . Tutti i seguenti risultati si riferiscono alla tipologia d'elemento PLANE25 con le corrette Key Options attivate, già precisate all'interno dei singoli paragrafi e all'inizio del capitolo.

4.5.1 - Riassunto dei risultati relativi agli intagli e agli spallamenti di vari angoli d'apertura ottenuti con l'ausilio di una mesh non controllata

Si riportano ora i risultati ottenuti dalle analisi PSM degli intagli e degli spallamenti al variare dell'angolo d'apertura, tutti relativi all'utilizzo di una mesh di tipo free senza ausilio dell'areola per l'ottenimento del corretto layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità.

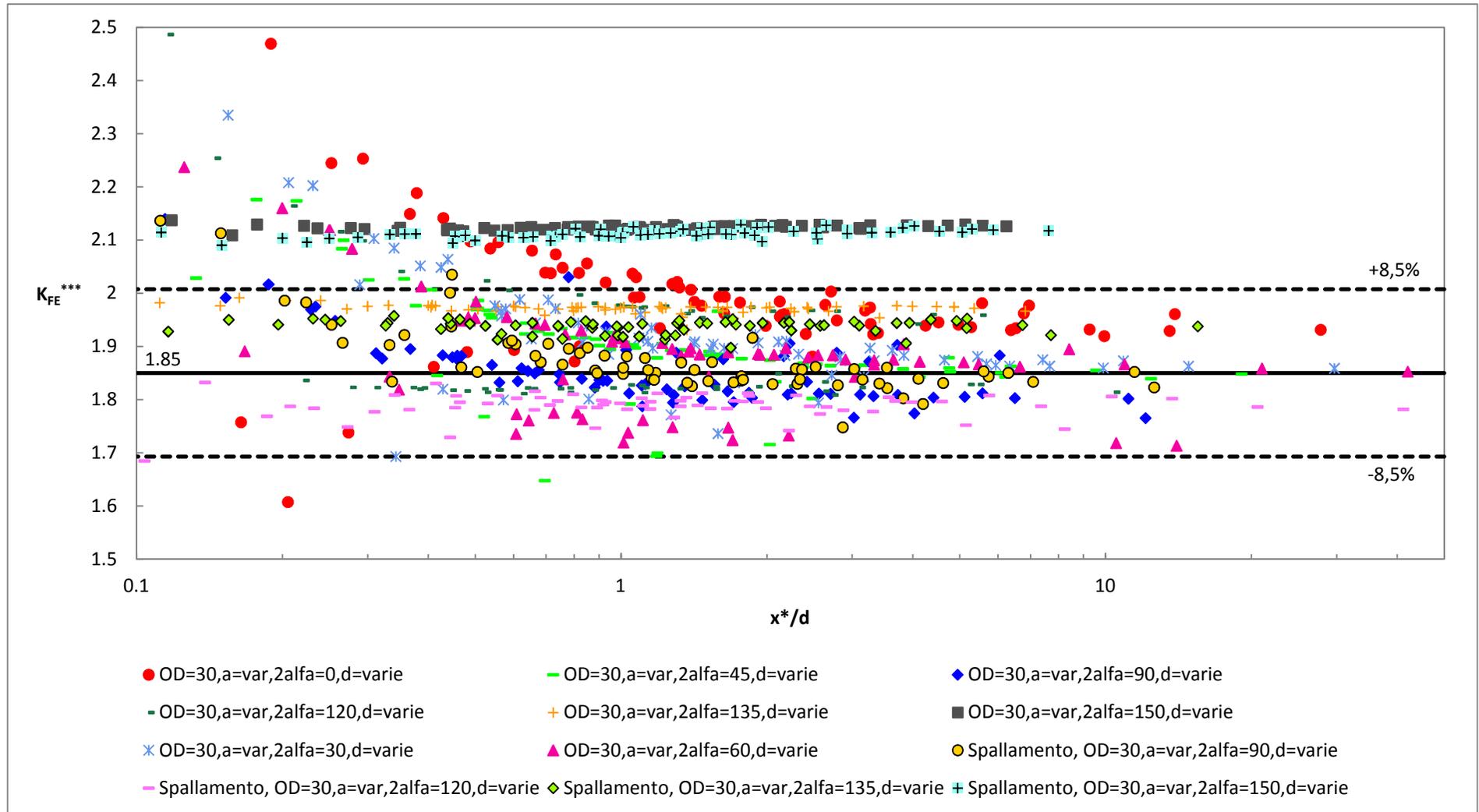


Figura 4.251: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.85; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 8.5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

Si osserva perciò che nel caso di mesh completamente free senza ausilio dell'areola centrata all'apice dell'intaglio il metodo converge ad un valore di riferimento pari a 1.85, con delle bande d'accettabilità d'ampiezza pari all'8.5% dello stesso.

Si conferma quindi la validità del metodo previa l'espressione del K_{FE}^{***} in funzione del parametro adimensionale x^*/d ; il limite di convergenza in termini di quest'ultimo parametro è pari a circa 1.5, che significa che è necessario inserire almeno un elemento e mezzo all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione.

Si osservi inoltre che con questo approccio, ma anche con gli altri che permettono di controllare la mesh, l'angolo d'apertura dell'intaglio pari a 150° converge ad un valore proprio, diverso da quello di riferimento proposto e perciò non deve essere incluso tra gli angoli per i quali il metodo è valido nel caso di modo III.

Il vantaggio dell'utilizzo di quest'approccio rispetto ad un altro che permetta di controllare il layout della mesh nelle vicinanze del punto di singolarità è legato alla velocità di applicazione; in questo caso infatti essa è molto alta, complice il fatto che per ottenere la tensione di picco e utilizzare il metodo è necessario solo scegliere una dimensione globale d'elemento, ponendo cura di essere sopra al limite minimo di convergenza, ed eseguire una mesh completamente free non curandosi del layout che la stessa assume nelle vicinanze del punto di singolarità.

Lo svantaggio risiede invece nell'elevata ampiezza delle bande di dispersione che è stato necessario accettare.

4.5.2 - Riassunto dei risultati relativi agli intagli e ai spallamenti di vari angoli d'apertura con mesh free controllata dall'areola

Si riportano ora i risultati ottenuti dall'analisi PSM degli intagli e dei spallamenti al variare dell'angolo d'apertura, tutti relativi all'utilizzo di una mesh di tipo free ma con l'ausilio dell'areola per l'ottenimento del corretto layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità.

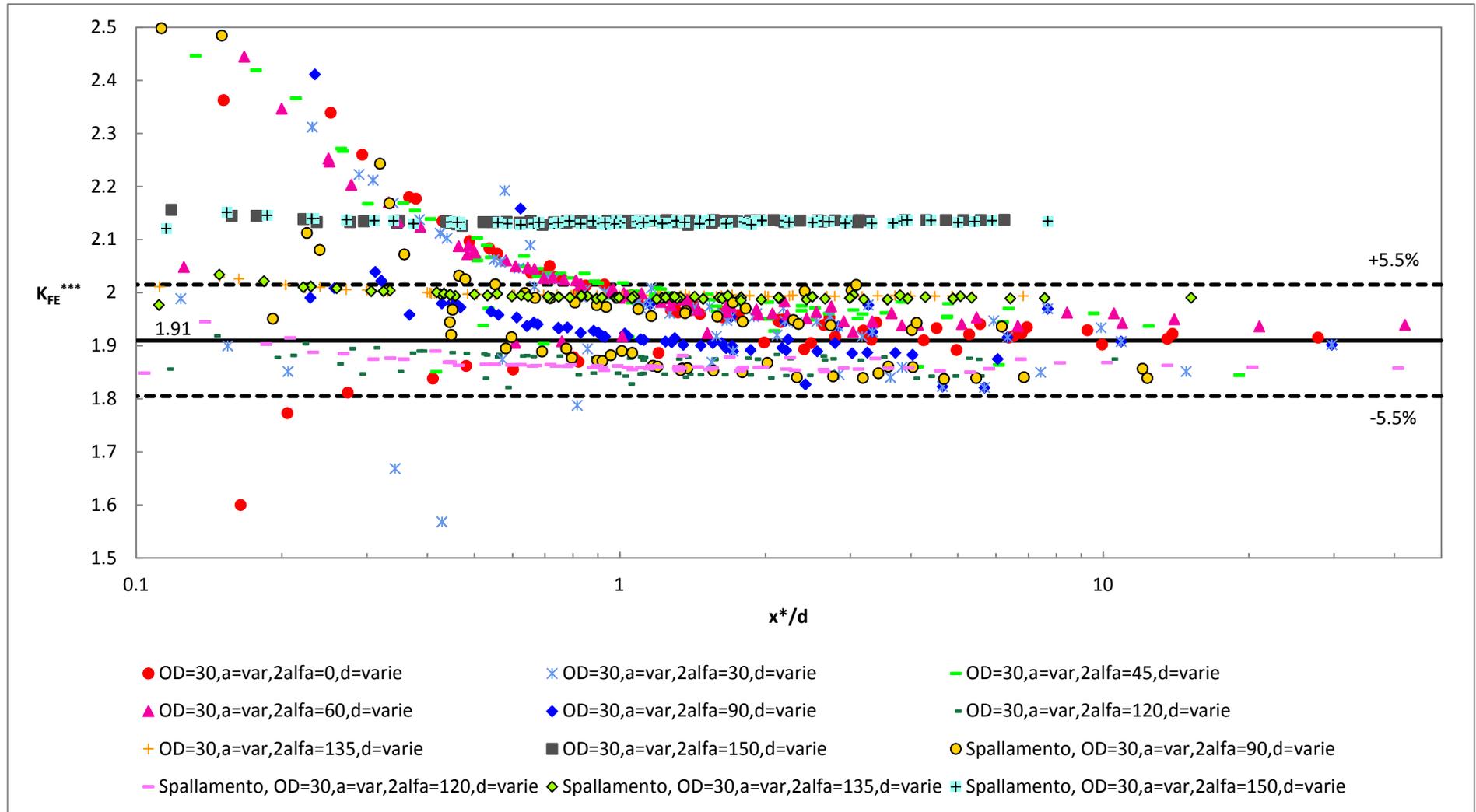


Figura 4.252: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5.5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

Tramite l'ausilio dell'areola centrata all'apice dell'intaglio si conferma ancora una volta la convergenza del metodo quando il K_{FE}^{***} è espresso in funzione del parametro adimensionale x^*/d ; i vantaggi nell'utilizzo dell'areola consistono in:

- Un aumento del valore di riferimento di convergenza rispetto al caso senza controllo della mesh; ora il metodo converge a 1.91, più vicino al valore espresso in letteratura [4] nel caso di modo III che è 1.93;
- Le bande di dispersione diminuiscono in ampiezza fino al 5.5% del valore di riferimento calcolato, mentre nel caso di mesh senza controllo si aveva un 8.5%;
- Il limite di convergenza del metodo si abbassa fino ad un x^*/d pari a 1, mentre nel caso di mesh senza controllo questo è uguale a 1.5.

Si noti però che nel diagramma sono stati riportati i risultati relativi all'utilizzo di un'areola 6x6 elementi per tutti gli angoli d'apertura a meno del 60°, per il quale si sono riportati i risultati dell'areola 4x4 elementi; come già descritto all'interno del paragrafo attinente un'areola da 6x6 elementi con un angolo d'apertura di 60° fornisce risultati scadenti.

Ancora una volta si conferma la non convergenza in banda dell'angolo d'apertura 150°, che raggiunge pressoché gli stessi valori ricavati nel caso di mesh non controllata.

Lo svantaggio principale di questa modalità di procedere consiste nel tempo speso per la creazione dell'areola utilizzata per il controllo della mesh.

4.5.3 - Riassunto dei risultati relativi agli intagli e agli spallamenti di vari angoli d'apertura con mesh mapped interna all'areola

Si riportano ora i risultati ottenuti dall'analisi PSM degli intagli e degli spallamenti al variare dell'angolo d'apertura, tutti relativi all'utilizzo dell'areola con mesh interna mapped per l'ottenimento del corretto layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità.

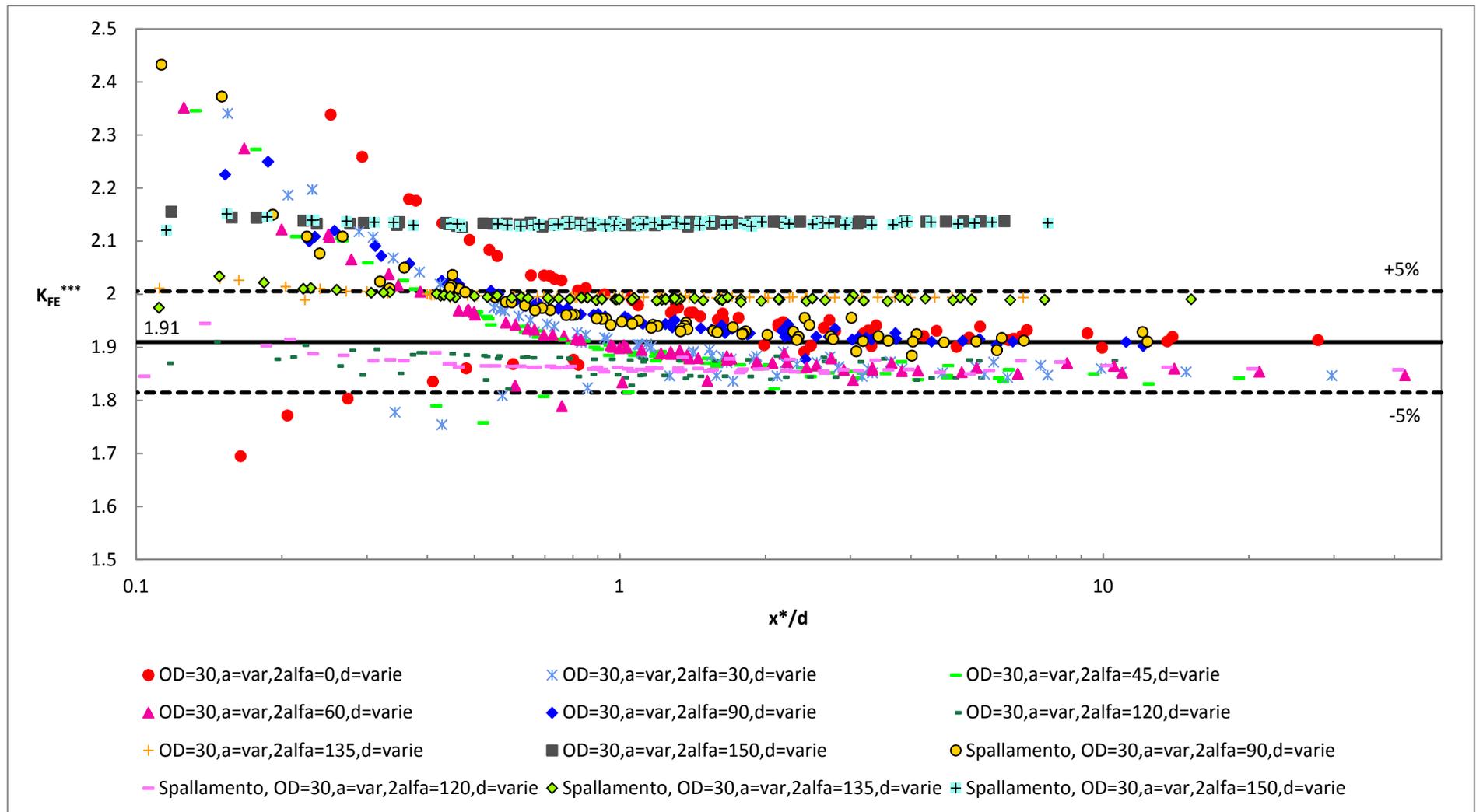


Figura 4.253: Andamento del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato. Si noti che si è utilizzato un simbolo per ogni angolo d'apertura.

Ancora una volta si conferma la correttezza del metodo se si analizzano i risultati in termini di x^*/d ; si osserva inoltre che l'utilizzo dell'areola mapped per il controllo della mesh nell'intorno del punto di singolarità permette di mantenere lo stesso valore di riferimento ricavato nel caso di areola con mesh free, pari a 1.91, e di ridurre l'ampiezza delle bande di dispersione al 5% dello stesso. Il limite di convergenza in termini di x^*/d può essere assunto anche in questo caso, come in quello di areola con mesh free, pari a 1.

Quest'ultimo approccio restituisce risultati corretti utilizzando solamente areole 6x6 elementi; l'imposizione di utilizzare una mesh mapped consente di uniformare tutti gli angoli e di evitare le problematiche di layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità che si sono ottenute per areole con mesh free nel caso d'angolo d'apertura di 60° e in pochi altri casi.

Anche in questa sede l'angolo d'apertura 150° non rientra nella banda sopracitata, ma converge allo stesso valore già ricavato in precedenza.

Al vantaggio della riduzione delle bande di dispersione dei risultati e dell'uniformazione della mesh per ogni angolo d'apertura, che permette di risolvere i problemi incontrati soprattutto nel caso a 60°, si contrappone lo svantaggio temporale per l'esecuzione della mesh di tipo mapped.

4.5.4 - Riassunto complessivo di tutti i risultati ottenuti con l'ausilio di una mesh free senza controllo

In questo paragrafo si riportano tutti i risultati raccolti in termini di K_{FE}^{***} grazie all'ausilio di mesh completamente free senza avvalersi di alcun metodo di controllo; in quest'ultimo grafico si riassumono i risultati relativi agli intagli, agli spallamenti, ai provini testati in letteratura, ai provini a sovrapposizione e a quelli circolari con cricche esterne.

Lo scopo di questo paragrafo è puramente la raccolta dei risultati; a causa dell'elevata quantità di quest'ultimi si preferisce non riportare la legenda e diagrammare tutti quanti i dati raccolti; per ulteriori informazioni sui singoli casi riferirsi all'apposito paragrafo dedicato.

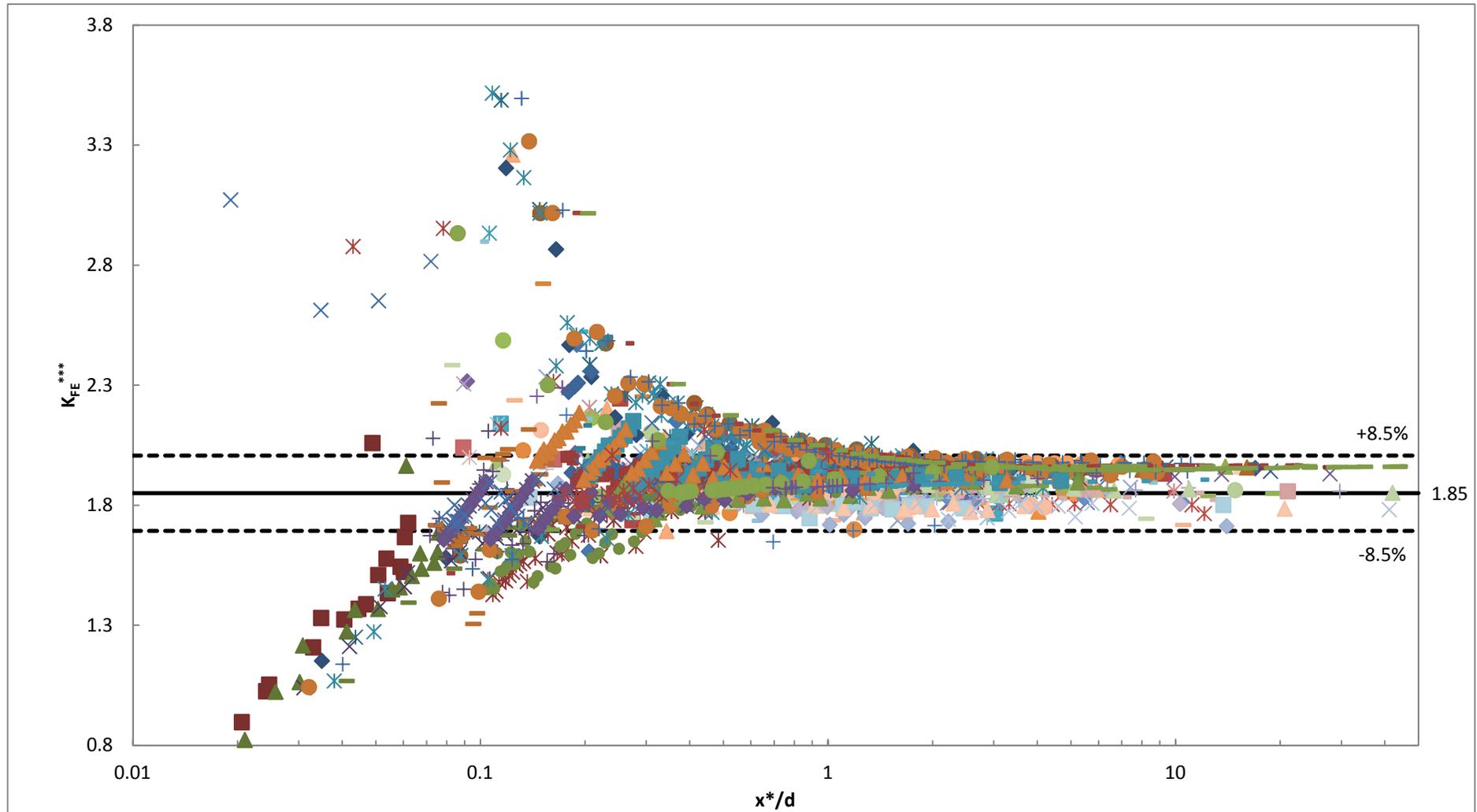


Figura 4.254: Andamento complessivo del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; in questo diagramma sono riassunte tutte le geometrie analizzate. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.85; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento dell'8.5% rispetto al valore calcolato.

Si osserva perciò che tutti i risultati ricavati grazie all'ausilio di mesh free non controllate convergono allo stesso valor medio pari a 1.85 con una banda di dispersione d'ampiezza dell'8.5% dello stesso; la convergenza del metodo è assicurata da un $x^*/d \geq 2$, posizionando cioè almeno 2 elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione.

Dai risultati sono stati rimossi i casi con angolo d'apertura a 150° per maggior chiarezza del diagramma poiché, si ricorda, essi convergono ad un valore medio maggiore rispetto a quello relativo a tutti gli altri.

4.5.5 - Riassunto complessivo di tutti i risultati ottenuti con l'ausilio della mesh controllata e free

In questo paragrafo si riportano tutti i risultati raccolti in termini di K_{FE}^{***} dove per gli intagli e gli spallamenti si sono utilizzati i dati raccolti con mesh controllate dall'areola free, mentre per tutti gli altri casi si sono riportati i risultati ottenuti con mesh free senza controllo; questa assunzione è motivata dal fatto che tutti gli altri casi sono relativi a cricche o cordoni di saldatura, e si è osservato che in queste due eventualità le mesh ottenute senza areola di controllo sono molto simili a quelle ottenute attraverso l'utilizzo della stessa.

Lo scopo di questo paragrafo è puramente la raccolta dei risultati; a causa dell'elevata quantità di quest'ultimi si preferisce non riportare la legenda e diagrammare tutti quanti i dati raccolti; per ulteriori informazioni sul singolo caso riferirsi all'apposito paragrafo dedicato.

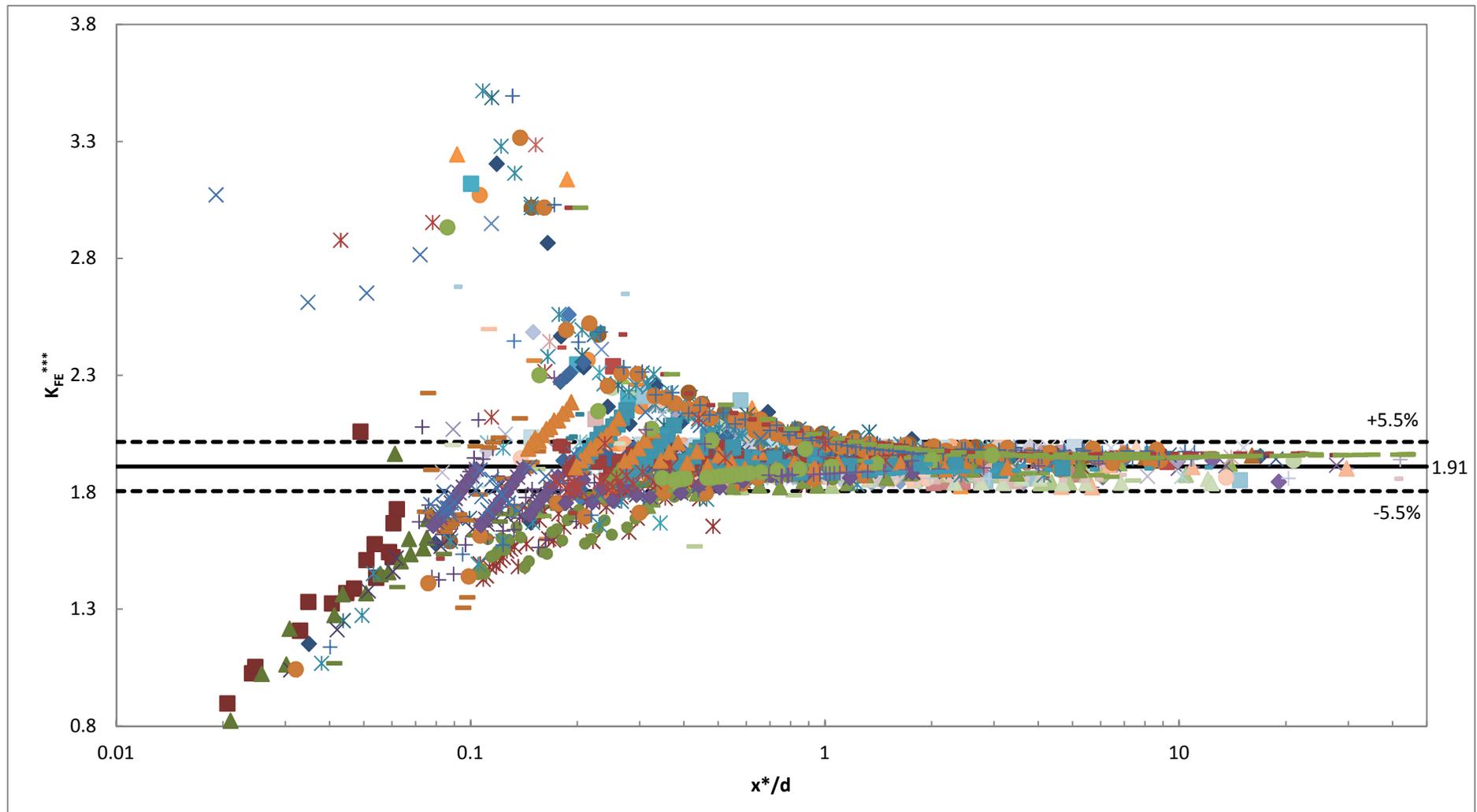


Figura 4.255: Andamento complessivo del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; in questo diagramma sono riassunte tutte le geometrie analizzate. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5.5% rispetto al valore calcolato.

Ancora una volta si osserva la convergenza di tutti i valori in banda grazie all'ausilio del parametro adimensionale x^*/d ; il valore medio di convergenza è pari a 1.91 e le bande d'accettabilità hanno ampiezza pari al 5.5% di quest'ultimo. Si osserva quindi che l'utilizzo dell'areola free per il controllo del layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità permette di alzare lievemente il valore di riferimento avvicinandosi a quello suggerito in letteratura [4] e di diminuire l'ampiezza delle bande di convergenza rispetto al caso di mesh completamente free senza alcun controllo.

La convergenza del metodo è assicurata da un $x^*/d \geq 2$, posizionando cioè almeno 2 elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione.

Purtroppo l'analisi complessiva dei risultati è legata al fatto che insieme agli intagli e agli spallamenti con areola mapped sono stati inseriti altri dati ottenuti con mesh free non controllate; senza quest'ultimi, come già analizzato, è possibile diminuire il limite di convergenza in termini di x^*/d fino ad 1 adottando lo stesso valore di convergenza del K_{FE}^{***} e la stessa ampiezza per le bande di dispersione.

Dai risultati sono stati rimossi i casi con angolo d'apertura a 150° per maggior chiarezza del diagramma poiché, si ricorda, essi convergono ad un valore medio maggiore rispetto a quello relativo a tutti gli altri angoli d'apertura.

4.5.6 - Riassunto complessivo di tutti i risultati ottenuti con l'ausilio della mesh controllata mapped e free

In questo paragrafo si riportano tutti i risultati raccolti in termini di K_{FE}^{***} dove per gli intagli e gli spallamenti si sono utilizzati i dati raccolti con mesh controllate dall'areola mapped, mentre per tutti gli altri casi si sono riportati i risultati ottenuti con mesh free senza controllo; questa assunzione è motivata dal fatto che tutti gli altri casi sono relativi a cricche o cordoni di saldatura, e si è osservato che in queste due eventualità le mesh ottenute senza areola di controllo sono compatibili con quelle ottenute attraverso l'utilizzo della stessa meshata mediante l'algoritmo mapped, almeno nell'intorno del punto di singolarità.

Lo scopo di questo paragrafo è puramente la raccolta dei risultati; a causa dell'elevata quantità di quest'ultimi si preferisce non riportare la legenda e diagrammare tutti quanti i dati raccolti; per ulteriori informazioni sul singolo caso riferirsi all'apposito paragrafo dedicato.

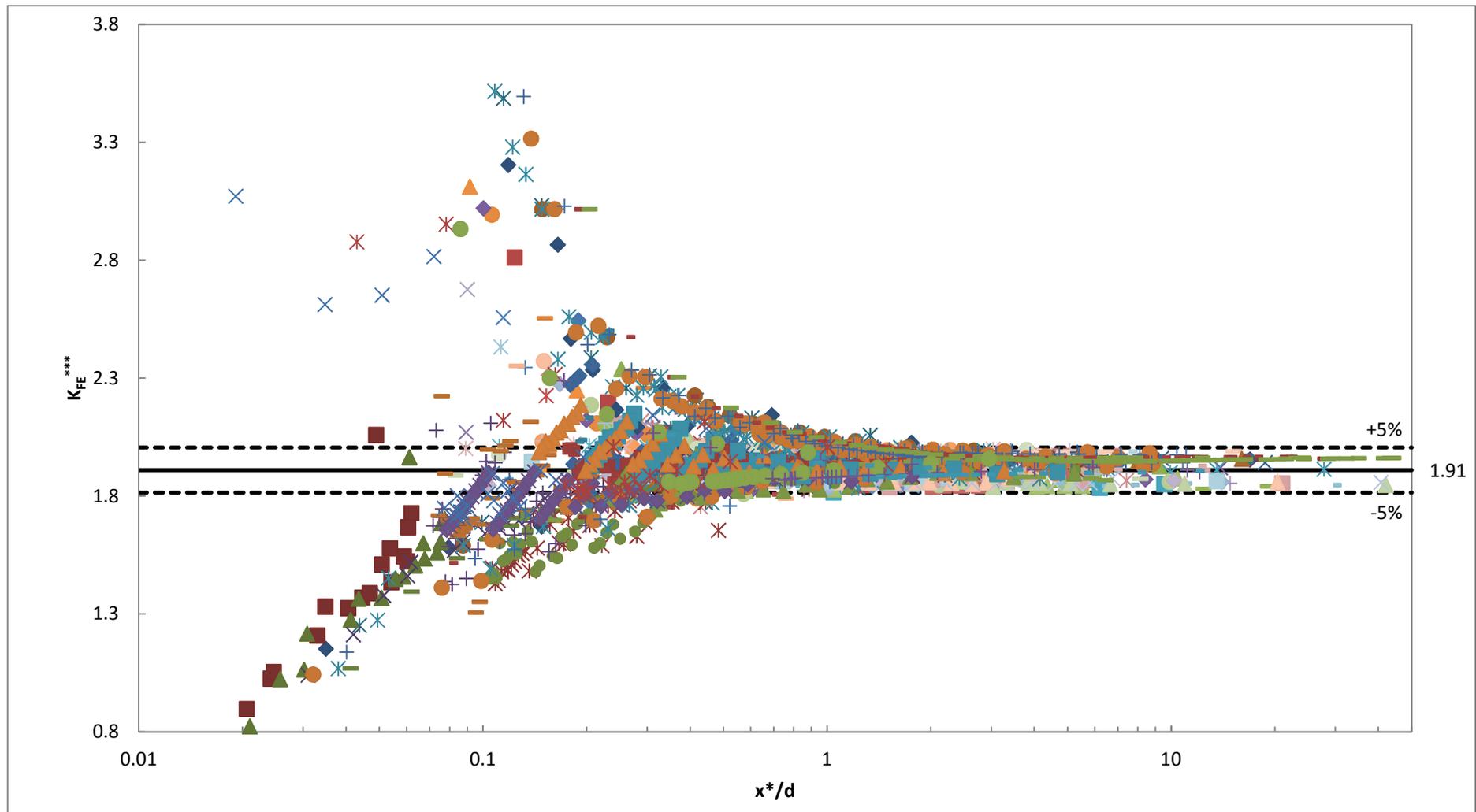


Figura 4.256: Andamento complessivo del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; in questo diagramma sono riassunte tutte le geometrie analizzate. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.91; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 5% rispetto al valore calcolato.

Valgono tutte le considerazioni già svolte nel paragrafo precedente; il valore di convergenza in termini di K_{FE}^{***} è pari a 1.91 anche in questo caso e l'ampiezza delle bande di dispersione è uguale al 5% di quest'ultimo. Il limite di convergenza in x^*/d è pari a 2.

Confrontando questi risultati con quelli ricavati nel paragrafo 4.5.5 si osserva che l'unico vantaggio nell'utilizzo di mesh mapped interne all'areola consiste nella diminuzione dell'ampiezza delle bande di dispersione. Purtroppo l'analisi complessiva dei risultati è legata al fatto che insieme agli intagli e agli spallamenti con areola mapped sono stati inseriti altri dati ottenuti con mesh free non controllate; senza quest'ultimi, come già analizzato, è possibile diminuire il limite di convergenza in termini di x^*/d fino ad 1 adottando lo stesso valore di convergenza del K_{FE}^{***} e la stessa ampiezza per le bande di dispersione.

Dai risultati sono stati rimossi i casi con angolo d'apertura a 150° per maggior chiarezza del diagramma poiché, si ricorda, essi convergono ad un valore medio maggiore rispetto a quello relativo a tutti gli altri angoli d'apertura.

4.6 - Definizione di un parametro di convergenza alternativo

Dal punto di vista teorico si è osservato che l'utilizzo di x^*/d al posto di a/d permette di riportare a convergenza il metodo e fornisce un criterio obiettivo per la determinazione della minima raffinatezza della mesh da utilizzare per le analisi PSM per poter dichiarare un K_{FE}^{***} costante; praticamente però la determinazione del valore di x^* legato ad una data geometria comporta l'esecuzione di un'analisi NSIF sullo stesso, rendendo vani i vantaggi di rapidità e leggerezza di calcolo presentati dal metodo PSM rispetto all'NSIF. Si propone di seguito una nuova definizione del parametro di convergenza che è possibile utilizzare in modo diretto senza ricavare l'estensione del campo locale di tensione.

Questo nuovo parametro viene dichiarato come:

$$\frac{a^*}{d} \tag{4.14}$$

Dove con a^* s'intende la minima lunghezza tra la dimensione dell'intaglio a e quella del ligament di sezione resistente b valutato rispetto all'asse del provino come riportato nella figura successiva:

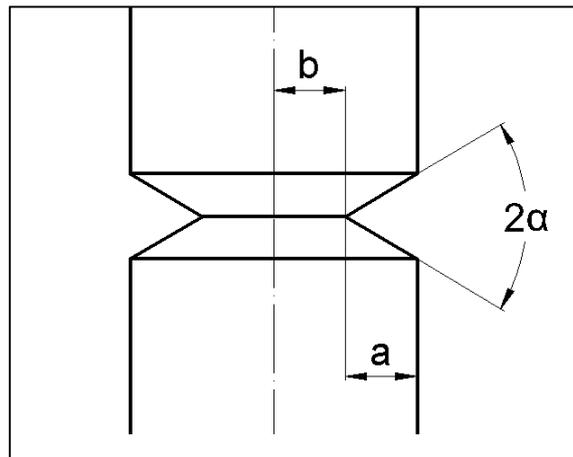


Figura 4.257: Definizione delle dimensioni utilizzate per il calcolo di a^* .

Perciò:

$$a^* = \min\{a; b\} \quad (4.15)$$

Si riassumono quindi tutti i risultati raccolti esprimendo il K_{FE}^{***} in funzione di quest'ultimo parametro; tutti i dati diagrammati sono stati ricavati attraverso delle mesh non controllate.

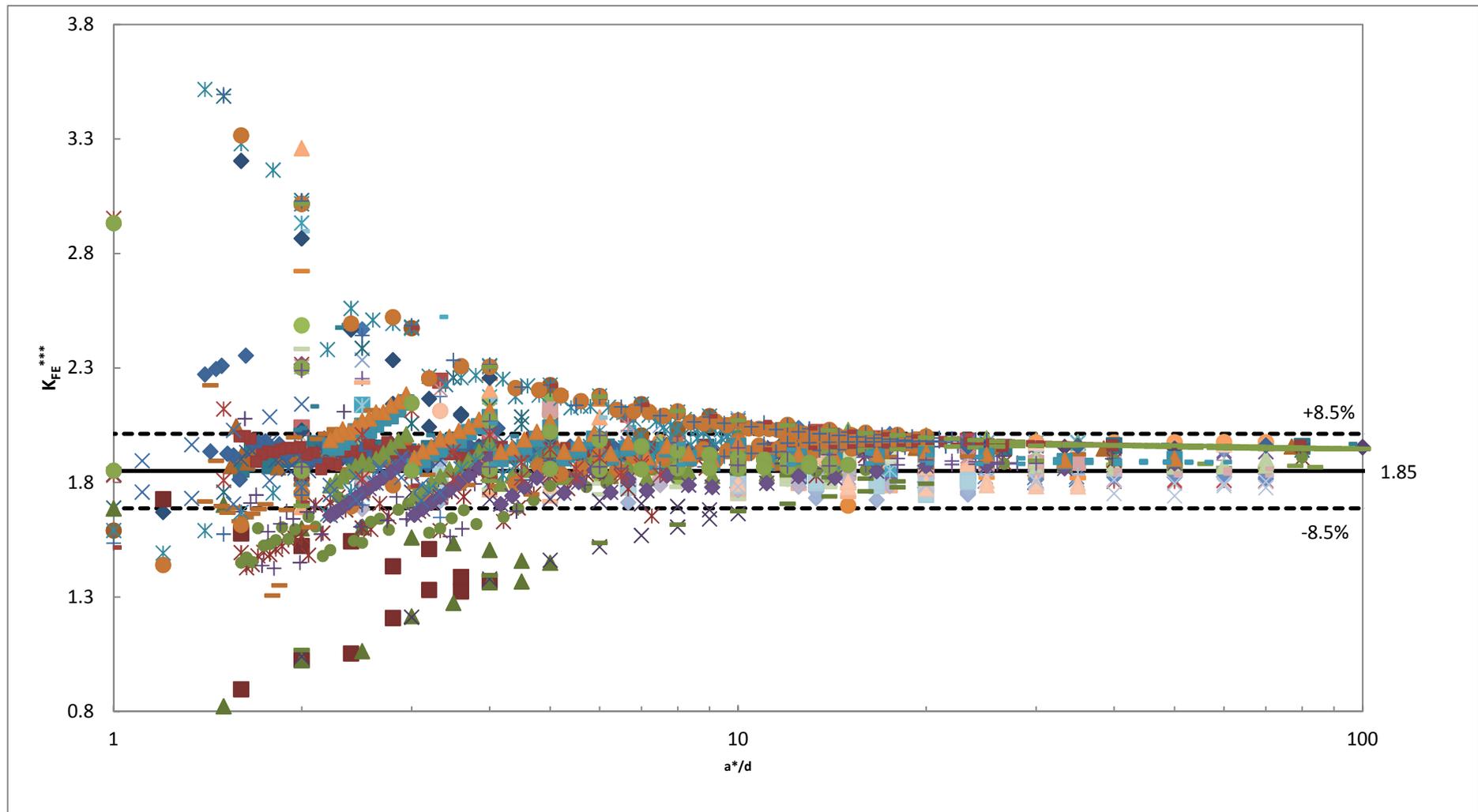


Figura 4.258: Andamento complessivo del K_{FE}^{***} in funzione di a^*/d ; in questo diagramma sono riassunte tutte le geometrie analizzate. Il valore medio ricavato dalla letteratura [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.85; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 8.5% rispetto al valore calcolato.

Si osserva perciò che anche quest'ultima definizione del parametro di convergenza permette di riportare il metodo al suo corretto funzionamento; come premesso i risultati diagrammati sono relativi all'utilizzo di mesh non controllate perciò, in coerenza con quanto assunto nel paragrafo 4.5.4, si è adottato un valore medio di riferimento per il K_{FE}^{***} pari a 1.85 e l'ampiezza delle bande di dispersione è stata mantenuta uguale all'8.5% di quest'ultimo.

Si conferma perciò la possibilità di utilizzo di questa definizione alternativa per un uso rapido del metodo PSM, ripristinando i vantaggi iniziali presentati dallo stesso; il limite di convergenza in questo caso è pari a $a^*/d \geq 16$.

Da un rapido confronto col medesimo diagramma espresso in funzione di x^*/d (figura 4.254) si osserva però che i valori che rientrano nella banda di convergenza in questo secondo caso sono in numero inferiore rispetto al primo; si faccia perciò attenzione al fatto che questo procedimento tende a fornire dei risultati valutati in eccesso di sicurezza rispetto all'approccio teorico in x^*/d , poiché il criterio di $a^*/d \geq 16$ risulta più stringente rispetto a quello di $x^*/d \geq 2$ ricavato precedentemente.

4.7 - Conclusioni del capitolo

In questo capitolo sono state analizzate col metodo del PSM alcune geometrie che presentano cricche o intagli di varia apertura, sempre sollecitate a modo III.

Si è quindi confermata la validità del metodo anche per gli angoli d'apertura diversi da 0° e 135° , sia utilizzando mesh free non controllate, sia controllando le stesse attraverso un'areola centrata sul punto di singolarità; si noti che quest'ultimo caso può essere collegato alla realtà applicativa all'utilizzo della tecnica della sottomodellazione, per la quale l'intero sistema da analizzare viene meshato con una mesh rada e successivamente si esegue un'analisi di una porzione limitata dello stesso che contiene l'intaglio in esame. L'areola in questione può essere meshata internamente con l'algoritmo free oppure quello mapped, fornendo in entrambi i casi dei buoni risultati.

Si è osservato inoltre che, a prescindere dalla tipologia di mesh utilizzata, l'angolo d'apertura di 150° non permette l'utilizzo del metodo PSM poiché esso converge ad un valore di K_{FE}^{***} differente da quello medio calcolato per tutte le altre aperture.

È stato inoltre proposto un'ulteriore criterio di convergenza in funzione di a^*/d (vedere paragrafo 4.6) che permette di ripristinare la velocità d'applicazione del metodo PSM, pagando però un costo maggiore in termini di limite minimo di convergenza rispetto al caso di x^*/d .

Capitolo 5: LINEE GUIDA PER L'APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO III - CASO: PLANE25

Di seguito si riportano, in maniera sintetica, le linee guida d'applicazione del metodo PSM nel caso d'intaglio sollecitato a modo III; tutti i risultati qui esposti sono ricavati dal capitolo precedente e si riferiscono all'utilizzo degli elementi PLANE25 della libreria di Ansys®14 con le opportune Key Options impostate, come indicate nella seguente tabella:

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0	0	0	0	0	0

Tabella 5.1: Riassunto delle Key Options impostate per le analisi con l'elemento PLANE25; per ulteriori informazioni riguardo quest'ultime riferirsi alla guida in linea di Ansys®.

Si noti che il metodo è valido per tutti gli angoli d'apertura trattati nel presente lavoro (cioè 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°) tranne che per i 150°.

Si propongono tre macrotipologie di analisi PSM da svolgere quando si affronta un problema di fatica per un intaglio aperto sollecitato a modo III:

1. Free;
2. Con areola free;
3. Con areola mapped.

Nel primo caso è sufficiente creare la geometria bidimensionale e avviare la creazione di una mesh free, senza preoccuparsi del layout degli elementi nell'intorno del punto di singolarità; le distorsioni che la mesh può presentare sono già tenute in conto all'interno del valore di riferimento di K_{FE}^{***} assunto e delle bande d'accettabilità applicate.

In questo caso si propone quindi:

- Un valore di riferimento del coefficiente K_{FE}^{***} pari a 1.85;
- Delle bande d'accettabilità d'ampiezza pari all'8.5% del valore suddetto.

L'unico vincolo di convergenza del metodo in questo caso è il seguente:

$$\frac{x^*}{d} \geq 2$$

Risulta quindi necessario posizionare almeno 2 elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione; questo approccio è il più semplice e veloce da utilizzare ma presenta lo svantaggio di possedere delle bande di dispersione di ampiezza significativa.

Nel secondo caso invece la procedura risulta intrinsecamente più lunga e complessa rispetto alla precedente, ma porta a migliori risultati in termini d'ampiezza delle bande di dispersione. Si illustra di seguito la metodologia da seguire.

1. Si isola un'areola centrata all'apice dell'intaglio, con layout descritto nella figura successiva in funzione dell'angolo d'apertura:

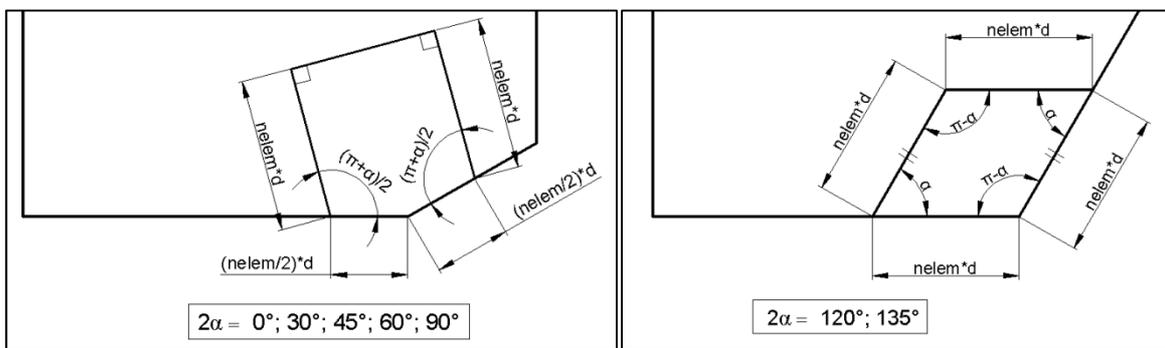


Figura 5.1: Layout delle areole di controllo posizionate all'apice dell'intaglio in funzione dell'angolo d'apertura. Si noti che α è il semiangolo d'apertura, d è la global element size e $nelem$ è il numero d'elementi scelto per lato dell'areola.

2. Si assegnano le dimensioni dell'areola in modo tale che, definita la global element size da utilizzare, essa presenti lati da 6 elementi ciascuno;
3. Si crea la mesh internamente all'areola sfruttando l'algoritmo di meshatura free; si noti che a causa di errori di approssimazione numerica è buona norma aumentare la global element size scelta di un 0.1% in questa fase per ottenere effettivamente il numero d'elementi desiderato interni all'areola, pari a 6. Si sottolinea fin da subito che questa imposizione sul numero d'elementi per lato non è una condizione minima, ma necessaria; un infittimento locale della mesh, ottenuto aumentando il numero d'elementi all'interno dell'areola, può comportare dei peggioramenti significativi in termini di layout della stessa. Una volta ottenuta la mesh essa deve essere confrontata con i layout desiderati riportati successivamente in questo capitolo; nel caso in cui quest'ultimo confronti evidenzi delle marcate differenze, evenienza riscontrata frequentemente per l'angolo d'apertura 60° e in altri casi eccezionali, è necessario utilizzare l'algoritmo mapped internamente all'areola.

Un'alternativa per riportare i layout del caso d'angolo d'apertura 60° alle configurazioni desiderate consiste nella creazione e meshatura di un'areola di 4×4 elementi anziché 6×6 ;

4. Si crea la mesh esterna all'areola attraverso l'algoritmo free.

Seguita quindi la procedura soprastante è possibile dichiarare che:

- Il valore di riferimento del coefficiente K_{FE}^{***} è pari a 1.91;
- Le bande di dispersione hanno ampiezza pari al 5.5% del valore sopraindicato.

Tutto ciò è ancora una volta sottoposto ai limiti di convergenza del metodo, cioè che:

$$\frac{x^*}{d} \geq 2$$

Risulta quindi necessario anche in questo caso posizionare almeno 2 elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione; si noti che quest'ultimo limite corrisponde a quello dichiarato poc'anzi per mesh non controllata ma, in quel caso, si adottano delle bande di dispersione di ampiezza sensibilmente maggiore.

L'ultima modalità utilizzabile in alternativa alle due precedentemente descritte è quella d'areola mapped; questa è consigliata qualora il risultato ottenuto attraverso la mesh non controllata non sia sufficientemente accurato e quello con areola free sia influenzato da un layout distorto della stessa. Si ripercorre il procedimento da utilizzare con quest'ultima modalità.

1. Si isola un'areola centrata all'apice dell'intaglio con layout descritto nella figura 5.1 in funzione dell'angolo d'apertura;
2. Si assegnano le dimensioni dell'areola in modo tale che, definita la global element size da utilizzare, essa presenti lati da 6 elementi ciascuno;
3. Si crea la mesh internamente all'areola sfruttando l'algoritmo di meshatura mapped; si noti che anche in questo caso a causa di errori di approssimazione numerica è buona norma aumentare la global element size scelta di un 0.1% per ottenere effettivamente il numero d'elementi desiderato interni all'areola, pari a 6. Si noti inoltre che, solo per questa modalità, è possibile diminuire la dimensione globale d'elemento internamente all'areola per ottenere una mesh più fitta nell'intorno del

punto di singolarità senza penalizzare il layout della stessa; quest'ultimo non deve essere confrontato con alcuna configurazione desiderata poiché attraverso una mesh mapped si rimuove ogni ambiguità sulla modalità di stesura degli elementi;

4. Si crea la mesh esterna all'areola attraverso l'algoritmo free.

Seguita quindi la procedura soprastante è possibile dichiarare che:

- Il valore di riferimento del coefficiente K_{FE}^{***} è pari a 1.91;
- Le bande di dispersione hanno ampiezza pari al 5% del valore sopraindicato.

Tutto ciò è ancora una volta sottoposto ai limiti di convergenza del metodo, cioè è necessario che:

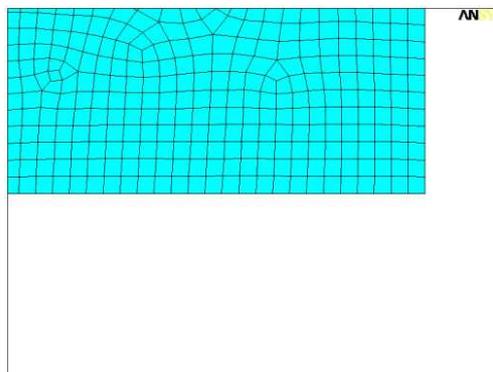
$$\frac{x^*}{d} \geq 2$$

Risulta quindi necessario anche in questo caso posizionare almeno 2 elementi all'interno della zona d'estensione del campo locale di tensione.

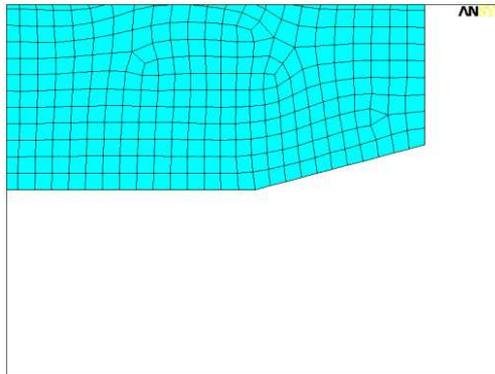
Si riportano infine i layout delle mesh desiderati nell'intorno del punto di singolarità al variare dell'angolo d'apertura; si sono divise in più sottosezioni le configurazioni relative alle tre metodologie precedentemente elencate.

A. Mesh non controllata

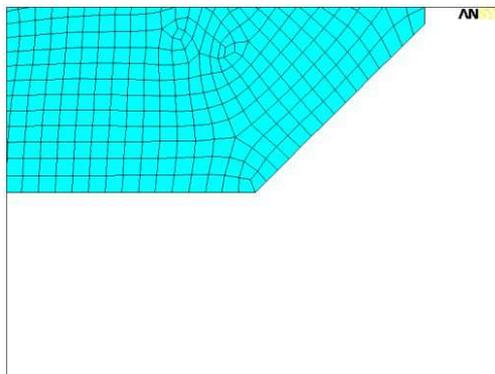
- Caso: $2\alpha = 0^\circ$



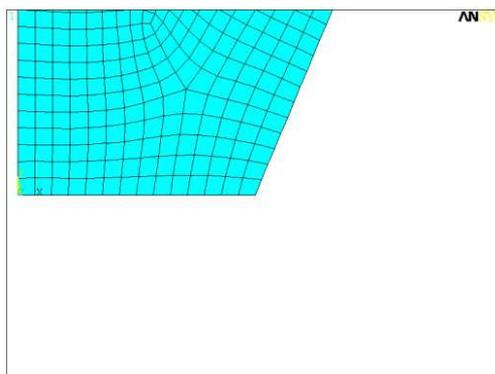
- Caso: $2\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$



- Caso: $2\alpha = 90^\circ$

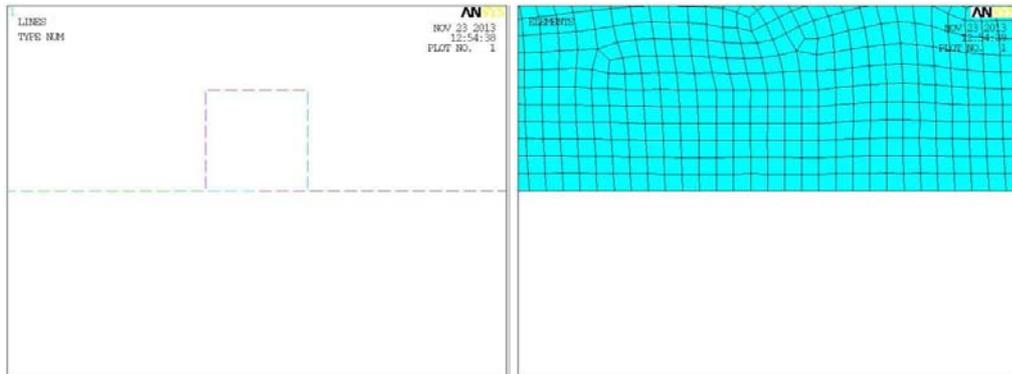


- Caso: $2\alpha = 120^\circ, 135^\circ$

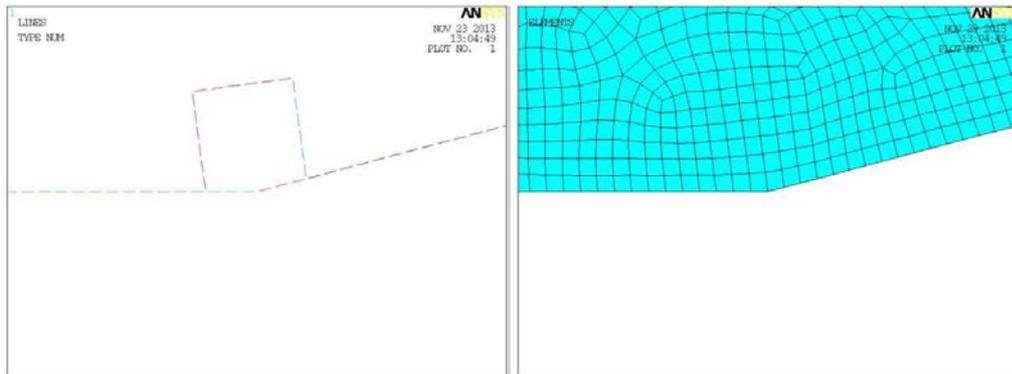


B. Mesh controllata tramite areola free

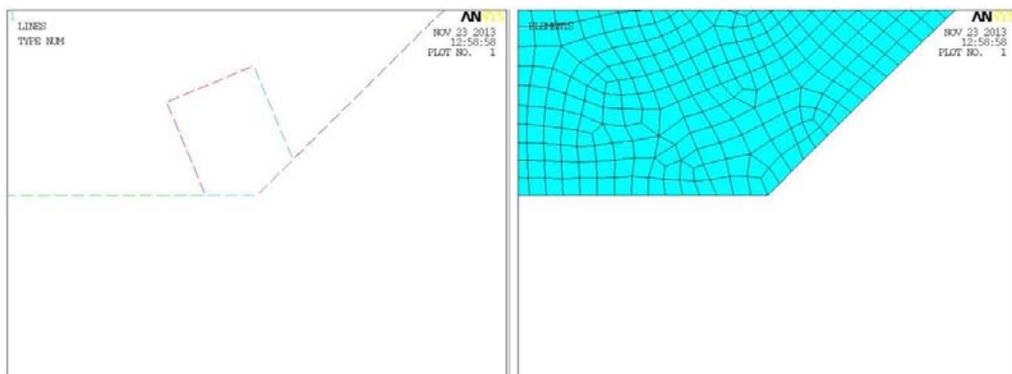
- Caso: $2\alpha = 0^\circ$



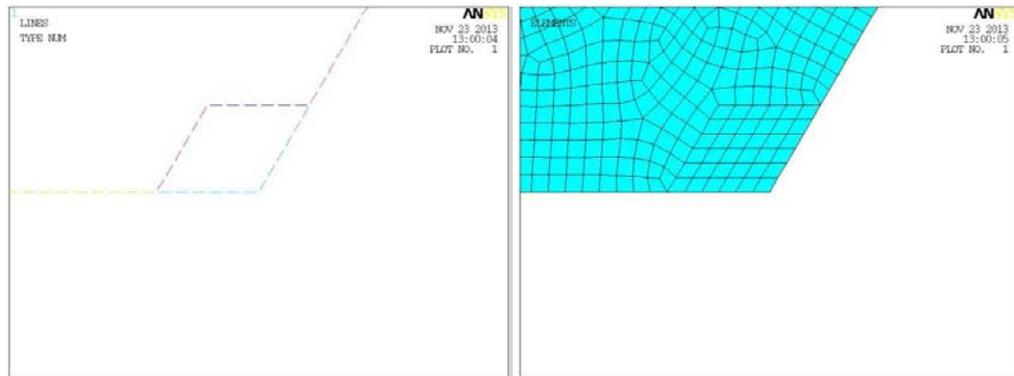
- Caso: $2\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$



- Caso: $2\alpha = 90^\circ$

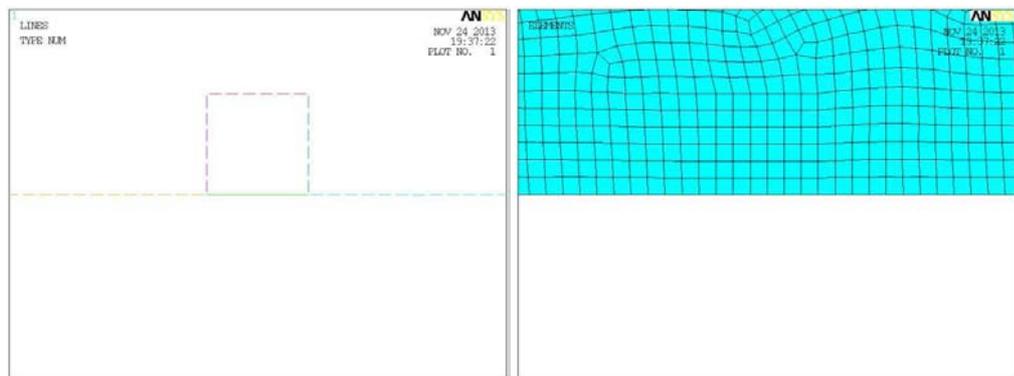


- Caso: $2\alpha = 120^\circ, 135^\circ$

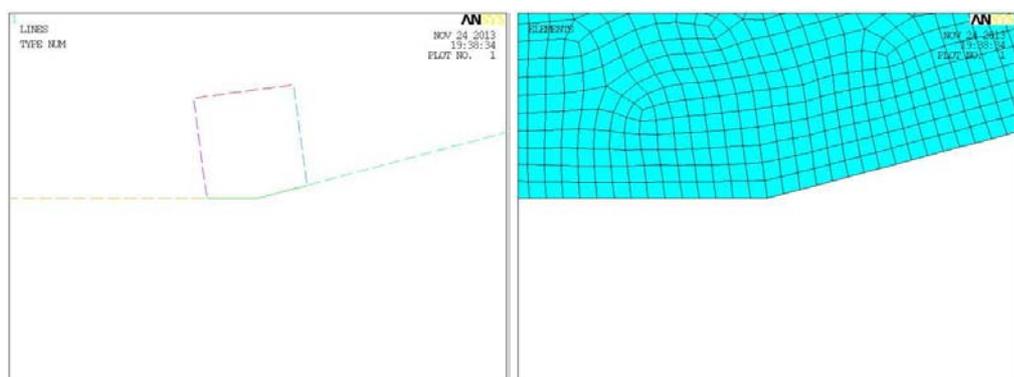


C. Mesh controllata tramite areola mapped

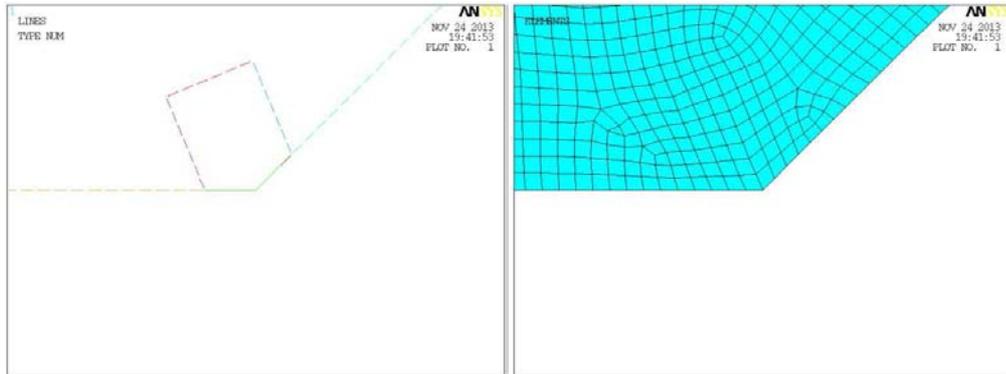
- Caso: $2\alpha = 0^\circ$



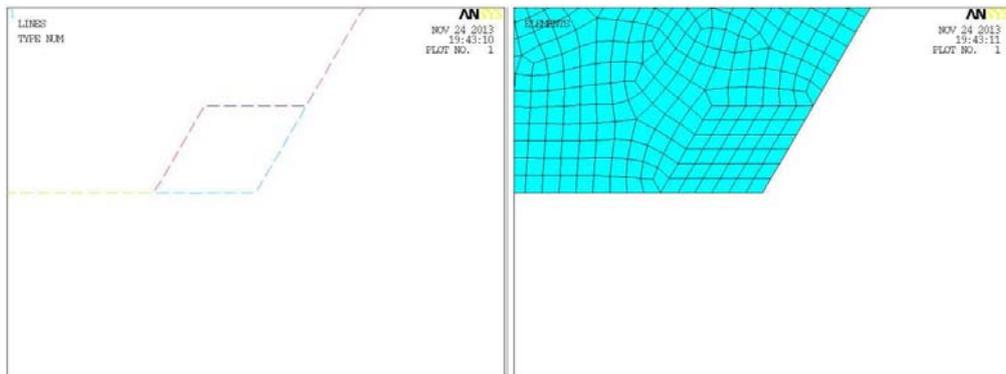
- Caso: $2\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$



- Caso: $2\alpha = 90^\circ$



- Caso: $2\alpha = 120^\circ, 135^\circ$



Capitolo 6: APPLICAZIONE DEL PSM NEL CASO DI SOLLECITAZIONE DI MODO III - CASO: PLANE83

Nella presente sezione si riportano i risultati ottenuti mediante l'applicazione del PSM nel caso di modo III e tramite l'utilizzo dell'elemento PLANE83 presente nella libreria di Ansys® 14; le Key Options impostate, che sono quelle utilizzate di default da Ansys®, sono le seguenti:

K1	K3	K4	K5	K6
0	0	0	0	0

Tabella 6.1: Riassunto delle Key Options impostate per le analisi svolte con l'elemento PLANE83; per ulteriori informazioni riguardo quest'ultime riferirsi alla guida in linea di Ansys®.

Nel presente capitolo si riportano solo i casi d'intaglio e di spallamento per vari angoli d'apertura; tutti i risultati delle analisi NSIF svolte nel capitolo 4 continuano ad essere validi, perciò si riportano solo quelli relativi al PSM.

6.1 - Provino circolare sollecitato a torsione con intaglio esteso a tutta la circonferenza

I modelli fisico e numerico adottati sono descritti all'interno del paragrafo 4.3.1; l'unica differenza nel caso in esame risiede nella scelta della tipologia d'elementi. Tutti i risultati ottenuti dalle analisi NSIF sono invece riportati all'interno dei paragrafi 4.3.2 e 4.3.3.

6.1.1 - Mesh PSM non controllata

In questa parte si riporta quanto ottenuto dall'applicazione del PSM per un provino circolare con un intaglio lungo tutta la circonferenza esterna e sollecitato a torsione; ogni risultato di questo sottoparagrafo è ottenuto attraverso l'ausilio di mesh non controllate. La filosofia alla base di questa tipologia di mesh consiste nel creare la stessa senza preoccuparsi del suo layout nelle zone vicine all'apice dell'intaglio che, si ricorda, è molto importante per la corretta applicazione del metodo.

6.1.1.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Per un'esaustiva descrizione del programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi in questione si faccia riferimento al paragrafo 4.1.2.1; in questo caso è sufficiente imporre un angolo d'apertura dell'intaglio diverso da 0° e impostare la variabile "plane" pari a 83.

6.1.1.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

I layout delle mesh ottenute utilizzando questa tipologia d'elementi è coerente con quanto già illustrato nel paragrafo 4.3.4.2; si faccia riferimento a tale paragrafo per un esempio dei layout ottenuti al variare delle dimensioni geometriche.

6.1.1.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

Si elencano di seguito i parametri presi in esame nel presente lavoro:

- Angoli d'apertura: 0°; 30°; 45°; 60°; 90°; 120°; 135°; 150°.
- Dimensioni globali d'elemento: 0.5 mm; 0.4 mm; 0.3 mm; 0.2 mm; 0.1 mm.
- Dimensioni caratteristiche dell'intaglio: da 1 a 14 mm con passo 1 mm.

L'intera batteria d'analisi espressa in termini del parametro adimensionale "a/d" è descritta nella seguente tabella:

d [mm]	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
a [mm]	a/d				
1	2	2.5	3.333333	5	10
2	4	5	6.666667	10	20
3	6	7.5	10	15	30
4	8	10	13.333333	20	40
5	10	12.5	16.666667	25	50
6	12	15	20	30	60
7	14	17.5	23.333333	35	70
8	16	20	26.666667	40	80
9	18	22.5	30	45	90
10	20	25	33.333333	50	100
11	22	27.5	36.666667	55	110
12	24	30	40	60	120
13	26	32.5	43.333333	65	130
14	28	35	46.666667	70	140

Tabella 6.2: Valori del parametro adimensionale a/d per i vari casi analizzati.

Di seguito si riportano dei diagrammi riassuntivi dei risultati ottenuti attraverso l'applicazione del metodo PSM; sono stati diagrammati i risultati direttamente in funzione

di x^*/d , che si è dimostrato essere il fattore di convergenza più favorevole tra i due analizzati.

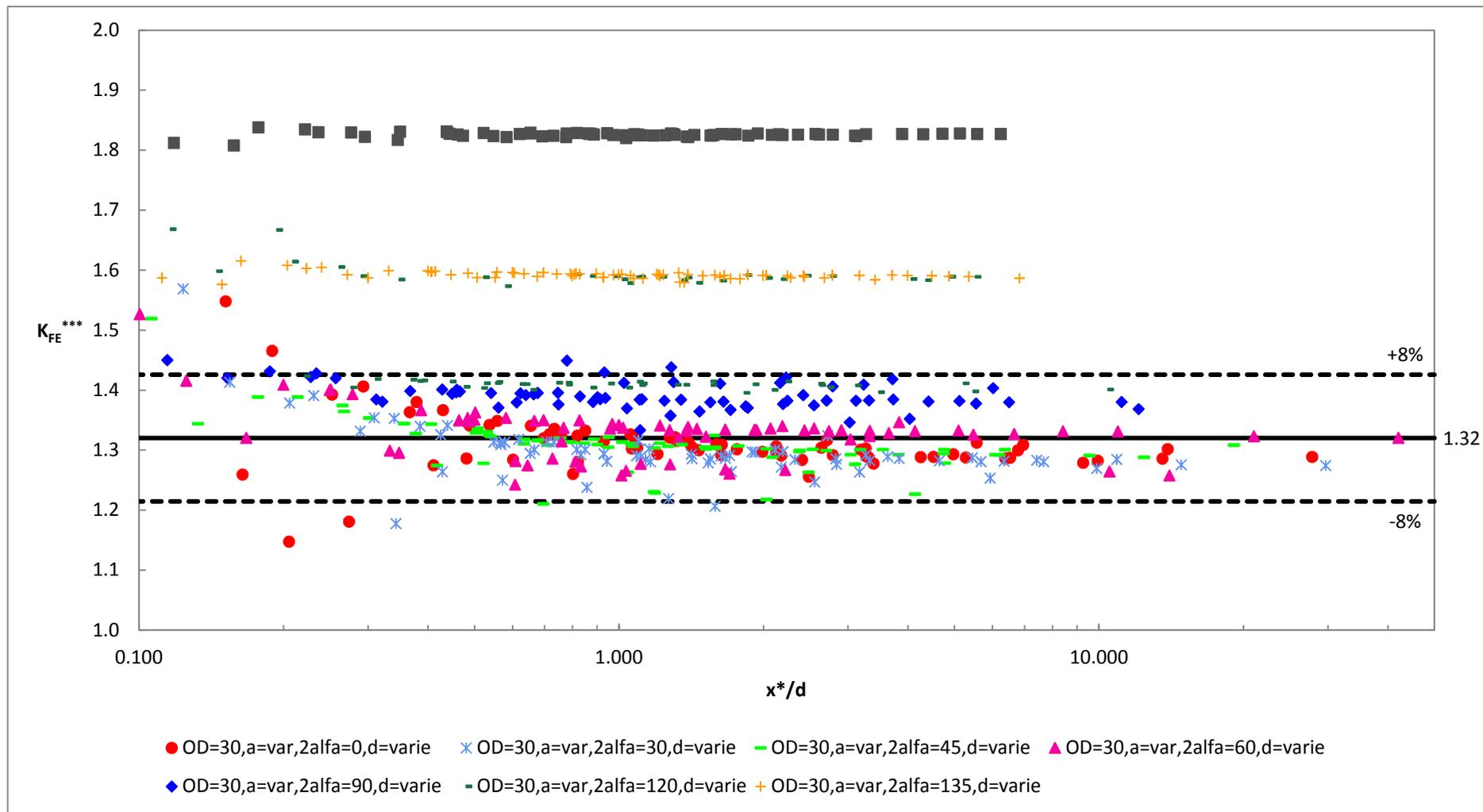


Figura 6.1: Andamento complessivo del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura utilizzando gli elementi PLANE25 [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso, mediante l'uso dei PLANE83, si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.32; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 8% rispetto al valore calcolato.

Il nuovo valore di riferimento adottato per la geometria in esame, espresso in termini di K_{FE}^{***} , è pari a 1.32; le bande d'accettabilità scelte hanno ampiezza pari all'8% del valore suddetto. Dapprima si osserva che alcuni punti relativi al caso d'apertura 120° convergono a valori superiori rispetto a quelli della banda; questi sono causati da un layout della mesh indesiderato e possono essere riportati all'interno della zona accettabile utilizzando l'approccio di controllo della mesh nell'intorno del punto di singolarità tramite areola free o mapped.

La maggiore problematica osservata nella precedente figura è che utilizzando gli elementi PLANE83, a differenza dei PLANE25, tutti i valori relativi all'angolo d'apertura 135°, fondamentale nel caso di modello di saldatura, convergono a un livello di riferimento fuori dalla banda dei valori considerati accettabili nonostante il layout della mesh nell'intorno del punto di singolarità sia coerente con quello desiderato.

Svolte quindi queste considerazioni non si ritiene opportuno sviluppare le analisi PSM con le altre tipologie di mesh controllate dall'areola all'apice dell'intaglio, poiché quest'ultime non fornirebbero informazioni aggiuntive.

Si conclude perciò che il metodo peggiora il proprio comportamento, in termini d'ampiezza del range degli angoli analizzabili, quando si utilizzano gli elementi PLANE83 ad 8 nodi rispetto ai PLANE25 lineari a 4 nodi; si sconsiglia pertanto l'utilizzo di tale tipologia d'elementi per analisi di provini intagliati.

6.2 - Provino con spallamento sollecitato a torsione

I modelli fisico e numerico adottati sono descritti all'interno del paragrafo 4.4.1; l'unica eccezione nel caso in esame risiede nella scelta della tipologia d'elementi. Tutti i risultati ottenuti dalle analisi NSIF sono invece riportati all'interno dei paragrafi 4.4.2 e 4.4.3.

6.2.1 - Mesh PSM non controllata

In questa parte si riporta quanto ottenuto dall'applicazione del PSM per la geometria in esame e con l'ausilio di mesh non controllate. La filosofia alla base di questa tipologia di mesh consiste nel lanciare la creazione della stessa senza preoccuparsi del suo layout nelle zone vicine all'apice dell'intaglio che, si ricorda, è molto importante per la corretta applicazione del metodo.

6.2.1.1 - Programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi

Per un'esaustiva descrizione del programma numerico Matlab® sviluppato per le analisi in questione si faccia riferimento al paragrafo 4.1.2.1, riferito al caso di provino intagliato; le uniche differenze del programma utilizzato rispetto al precedente sono localizzate nella parte di creazione della geometria. In questo caso è sufficiente imporre l'angolo d'apertura dell'intaglio corretto e impostare la variabile "plane" pari a 83.

6.2.1.2 - Layout delle mesh utilizzate per il PSM

I layout delle mesh ottenute utilizzando questa tipologia d'elementi è coerente con quanto già illustrato nel paragrafo 4.4.4.2; si faccia riferimento a tale paragrafo per un esempio delle configurazioni ottenute al variare delle dimensioni geometriche.

6.2.1.3 - Risultati ottenuti dall'applicazione del PSM

Si elencano di seguito i parametri presi in esame nel presente lavoro:

- Angoli d'apertura: 90°; 120°; 135°; 150°.
- Dimensioni globali d'elemento: 0.5 mm; 0.4 mm; 0.3 mm; 0.2 mm; 0.1 mm.
- Dimensioni caratteristiche dell'intaglio: da 1 a 14 mm con passo 1 mm.

L'intera batteria d'analisi espressa in termini del parametro adimensionale "a/d" è riportata nella tabella 6.2.

Di seguito si riportano dei diagrammi riassuntivi dei risultati ottenuti attraverso l'applicazione del metodo PSM; sono stati diagrammati i risultati direttamente in funzione di x^*/d , che si è dimostrato essere il fattore di convergenza più favorevole tra i due analizzati.

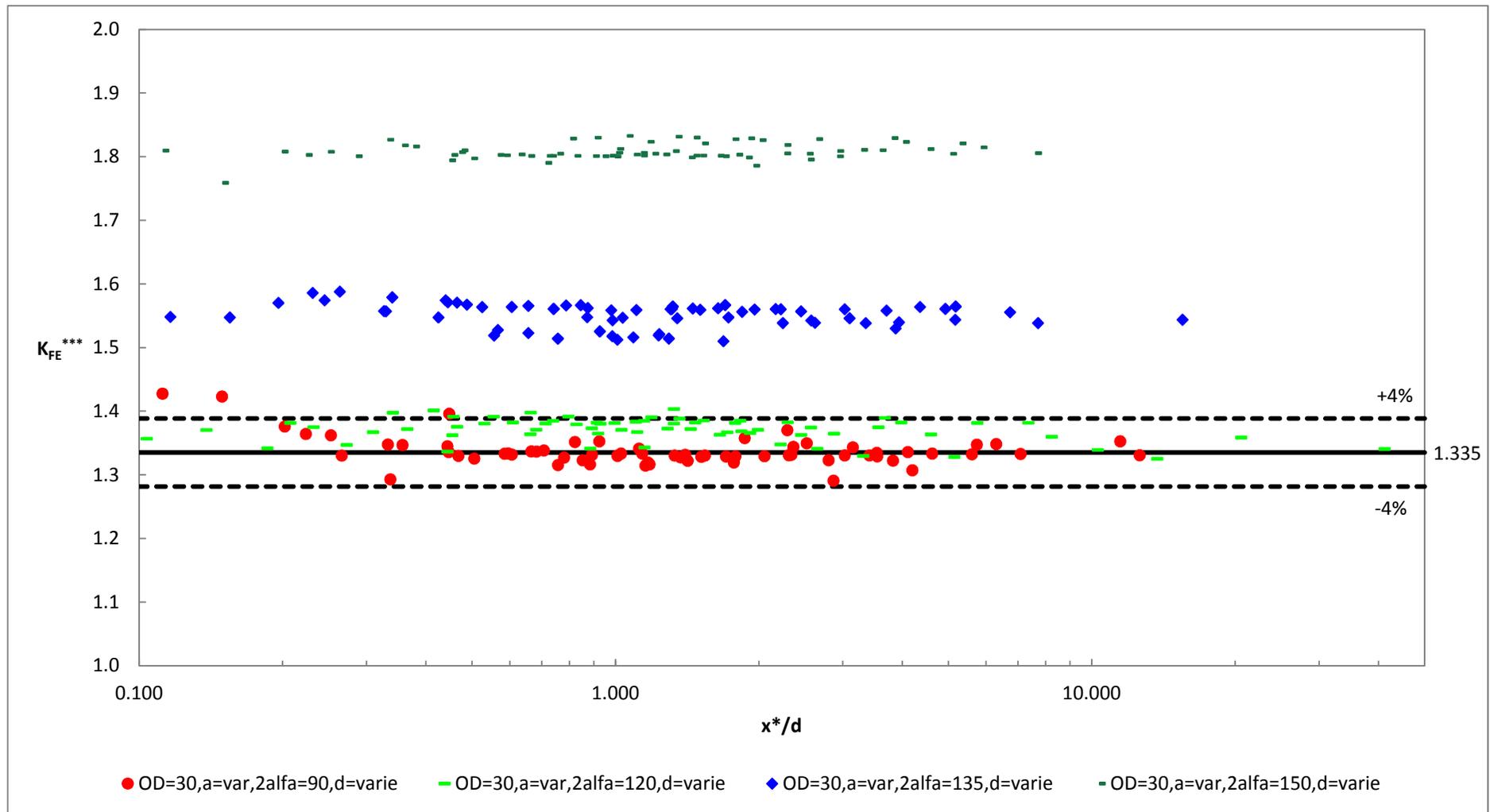


Figura 6.2: Andamento complessivo del K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d ; ogni curva è ottenuta fissando un valore della dimensione globale d'elemento costante e variando la lunghezza dell'intaglio. Il valore medio ricavato dalla letteratura utilizzando gli elementi PLANE25 [4] è pari a 1.93, mentre in questo caso, mediante l'uso dei PLANE83, si è ricavato un valore di riferimento uguale a 1.335; i valori minimi e massimi considerati accettabili nel caso in esame sono quelli contenuti all'interno della banda di scostamento del 4% rispetto al valore calcolato.

Il nuovo valore di riferimento adottato per la geometria in esame ed espresso in termini di K_{FE}^{***} è pari a 1.335; le bande d'accettabilità scelte hanno ampiezza pari al 4% del valore suddetto.

In questo caso tutti i punti relativi agli angoli d'apertura 90° e 120° rientrano nella banda di dispersione adottata; si nota però che, come nel caso di provino intagliato con elementi PLANE83, i punti riferiti all'angolo d'apertura 135° , utilizzato comunemente per modellare le saldature, convergono ad un valore esterno alla banda suddetta.

Anche per questa geometria quindi si osserva che i PLANE83 limitano il range degli angoli d'apertura analizzabili rispetto al caso d'uso dei PLANE25; si sconsiglia quindi l'utilizzo di tali elementi anche nel caso d'analisi di spallamenti.

Osservato inoltre che il layout delle mesh dei casi che fuoriescono dalla banda d'accettabilità è coerente con quello desiderato, non si ritiene utile procedere all'applicazione delle altre metodologie di controllo della mesh con areola free o mapped.

6.3 - Conclusioni del capitolo

Nel capitolo in esame sono state effettuate delle batterie d'analisi col metodo PSM utilizzando per la creazione della mesh gli elementi PLANE83, estensione parabolica dei lineari PLANE25.

Per entrambe le tipologie di geometria analizzate si è osservato che gli elementi PLANE83 limitano il range degli angoli d'apertura correttamente trattati dal metodo rispetto al caso d'uso dei PLANE25; se ne sconsiglia pertanto l'utilizzo poiché non presentano alcun vantaggio rispetto a quest'ultimi.

Capitolo 7: PROGETTO E UTILIZZO DELLA MACCHINA A FATICA

FATICA

Per ottenere una serie di dati sperimentali originali si è progettata una macchina a fatica a torsione con lo scopo testare dei giunti saldati sollecitati a modo III.

7.1 - Provini

I provini hanno una geometria semplice e sono composti da un tubo e due flange saldate alle estremità dello stesso. Entrambe le flange sono dotate di 8 fori diametro 16.5 mm per ospitare delle viti M16, mentre una sola delle due possiede un foro filettato al centro, con filettatura conica a gas da 1/4", che comunica con la parte interna del tubo e atto al collegamento dell'impianto pneumatico, descritto successivamente nel paragrafo 7.5.

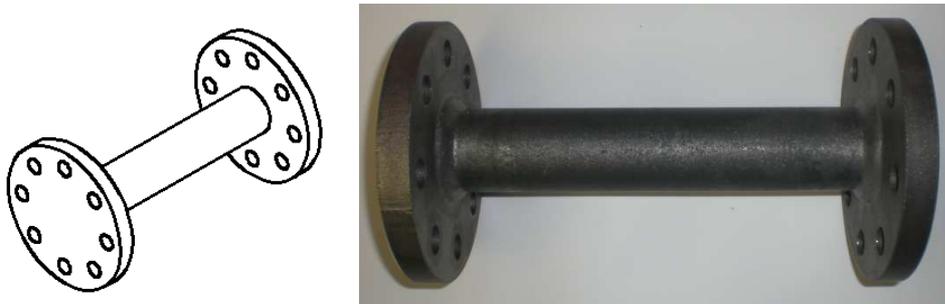


Figura 7.1 - Vista 3D semplificata del provino e provino realizzato.

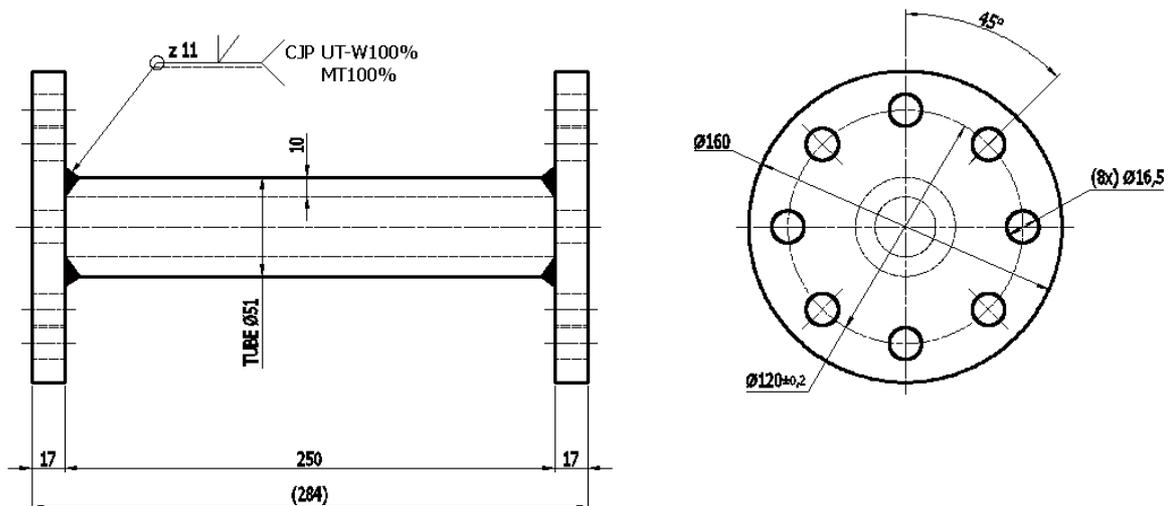


Figura 7.2 - Dimensioni di massima del provino, nel caso di cordone a piena penetrazione; per ulteriori informazioni riferirsi ai disegni tecnici allegati. Nel disegno non è riportato il foro centrale filettato poiché realizzato successivamente in corso d'opera.

Tutti i provini sono realizzati in acciaio Fe 510, attualmente designato come S 355 JR - EN 10025; nel caso del tubo intermedio esso è indicato con E 355 - EN10297-1, come da

norme attuali. La realizzazione dei provini è affidata all'azienda Antonio Zamperla®, che si è avvalsa della collaborazione di un suo fornitore.

La saldatura tra il tubo e le flange è effettuata mediante procedimento MIG (Metal-arc Inert Gas) per il quale il bagno di fusione è protetto dal gas inerte (argon o elio per esempio) che fuoriesce dalla pistola di saldatura; dalla stessa esce anche il filo metallico che andrà a formare il cordone di saldatura. Il materiale d'apporto è classificato come EN ISO 14341-A G 35/1 che indica l'attitudine alla saldatura con schermatura a gas e le seguenti proprietà meccaniche:

- Tensione di snervamento minima garantita di 355 MPa;
- Tensione di rottura da 440 a 570 MPa;
- Allungamento percentuale minimo del 22%.

Si osserva perciò che la tensione di snervamento minima garantita per il materiale d'apporto è coerente con quella dell'acciaio con il quale il provino è realizzato, cioè Fe510 (che possiede una σ_s di 355 MPa).

Con la tecnica di saldatura MIG è inoltre possibile eseguire più passate per ottenere più strati successivi sul giunto, com'è necessario nel caso dei giunti a piena penetrazione a causa delle notevoli dimensioni del cordone.

Particolare attenzione è posta sulla qualità della saldatura, che deve essere assicurata priva di difettosità mediante esame ultrasonoro (UNI EN ISO 17640 (2011)/ UNI EN 1166-2 (2011)) e magnetoscopico (UNI EN ISO 17638 (2010)/ 23278 (2010) lev.2X) sul 100% del cordone; è inoltre necessario garantire una continuità adeguata nel punto di start-stop dello stesso per evitare di creare una discontinuità che agirebbe da punto di concentrazione delle tensioni. Le saldature, inoltre, non devono essere molate per evitare l'introduzione di solchi su materiale che agirebbero come delle microcricche, diventando sede preferenziale per l'innescio della frattura che porta al cedimento del giunto.

Si riporta di seguito un riassunto schematico delle configurazioni scelte dei provini:

	Cordone d'angolo	Cordone a piena penetrazione
Stress relieved	20 provini	20 provini
As welded	4 provini	4 provini

TOT	24 provini	24 provini
-----	------------	------------

Tabella 7.1 Riassunto del numero e della tipologia dei provini testati.

Come si osserva dalla tabella, in totale sono stati programmati 48 provini di varia tipologia; sono stati previsti pochi componenti as welded perché, in letteratura, si osserva che quest'ultimi hanno una tendenza più marcata alla rottura sul tubo e non sulla saldatura come desiderato.

7.2 - Progetto della macchina di prova

7.2.1 - Calcolo delle dimensioni principali della macchina

Per la macchina di prova si è ideato un layout utilizzando due cilindri oleodinamici; quest'ultimi sono già presenti su uno dei banchi di lavoro del laboratorio del DII. Sono due martinetti marca Cabol, comandati da due servovalvole tipo "moog", sui quali sono installate due celle di carico con portata 10000 N. I cilindri sono comandati dalle servovalvole e, grazie alle celle di carico e ad altri sensori interni, hanno la possibilità di misurare la forza e lo spostamento istante per istante. Il tutto è collegato ad un server e controllato da un'interfaccia dedicata, manipolabile agendo attraverso un computer e l'apposito software di comando fornito da MTS.

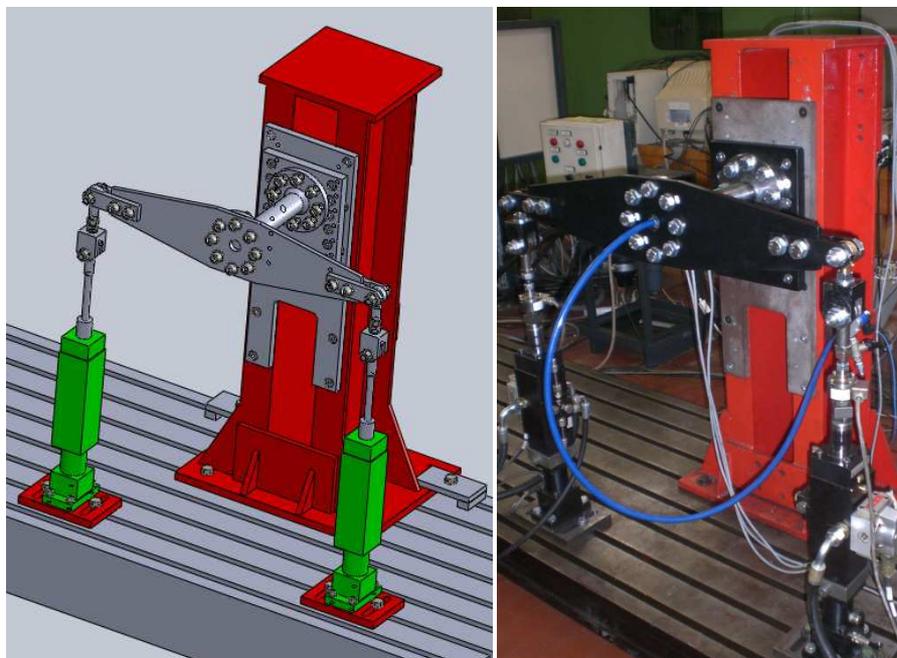


Figura 7.3 - Layout originariamente ideato per la macchina di prova.

In base al layout ideato per il banco (figura 7.3), i due cilindri devono essere disposti in verticale ad una determinata distanza uno dall'altro, calibrata in modo tale da ottenere il

momento torcente desiderato sul provino; il collegamento tra i due martinetti e il provino stesso avviene mediante un'asta. I due cilindri agiscono contemporaneamente, uno in tiro e l'altro in spinta, per avere a disposizione un momento torcente massimo dato da $2 \cdot 10000 \cdot b$ [$N \cdot mm$], dove b è la semilunghezza dell'asta suddetta espressa in [mm]. A causa degli spostamenti orizzontali delle estremità dell'asta rotante, di alcuni ordini di grandezza inferiori a quelli verticali ma non trascurabili, è necessario studiare un apposito sistema di collegamento tra gli steli dei cilindri e l'asta in modo tale da compensare tali spostamenti; tutto ciò al fine di evitare di indurre sollecitazioni trasversali alle celle di carico che non possono essere in alcun modo sopportate. Si è quindi proposta una soluzione di collegamento tra i martinetti e l'asta attraverso l'utilizzo di due uniball opportunamente collegati tra loro; in fase di collaudo dell'impianto si è però osservato che questa soluzione, sebbene vantaggiosa perché consente di assorbire eventuali flessioni dell'asta in tutte le direzioni, risulta inadatta al raggiungimento dello scopo prefissato per due motivi. Dapprima, nonostante gli uniball acquistati siano nominalmente adatti a sopportare carichi alterni di fatica e i carichi dinamici massimi tollerabili dagli stessi siano sensibilmente maggiori di quelli ai quali sono sottoposti durante le prove, si è osservato che essi tendono, se sollecitati a carichi elevati, a lavorare in modo discontinuo a causa di giochi interni dopo un numero modesto di cicli. Inoltre i cilindri, anche se fatti funzionare a vuoto in controllo di spostamento, presentano un urto nel momento d'inversione del carico che viene rilevato sia dalla cella di carico, che visualizza un sobbalzo, sia in maniera uditiva; questa problematica, intrinseca ai martinetti utilizzati, ha la conseguenza di propagare l'urto anche agli uniball che, dopo pochi cicli, tendono a grippare (eventualità riscontrata dopo una prova di 100000 cicli) e a portare alla rottura del proprio gambo.

Per ovviare alle limitazioni imposte dall'attrezzatura di prova è stata proposta sul campo una seconda soluzione di collegamento che, benché necessiti di una lubrificazione maggiore della prima, risulta più adatta allo scopo per la quale è stata pensata; infatti, in entrambi i casi, questi sottosistemi devono sopportare delle oscillazioni ad alta frequenza attorno alla stessa posizione e subire degli urti causati da problematiche interne ai martinetti già citate. Si è quindi realizzata una soluzione di collegamento con una biella tra il martinetto e l'asta; sulla biella sono montate a pressione due bronzine con foro interno alesato che permettono lo scorrimento della stessa su dei perni di diametro calibrato. La funzionalità di quest'ultima è uguale a quella del sistema a due uniball, cioè assorbire gli spostamenti orizzontali dell'asta, ma la maggior robustezza comporta una durata superiore;

il contro di questa soluzione è che non si ha più la possibilità di assorbire eventuali flessioni dell'asta fuori dal suo piano nominale di lavoro nel caso di malfunzionamenti della macchina e che, nonostante ad ogni cambio provino vengano ingrassati adeguatamente i perni e le sedi delle bronzine, è necessario lubrificare la zona di scorrimento.

Si è quindi utilizzata questa seconda soluzione per la macchina di prova; si noti però che il dimensionamento di tutti i componenti è legato agli ingombri della soluzione ad uniball, cioè quella originariamente pensata.

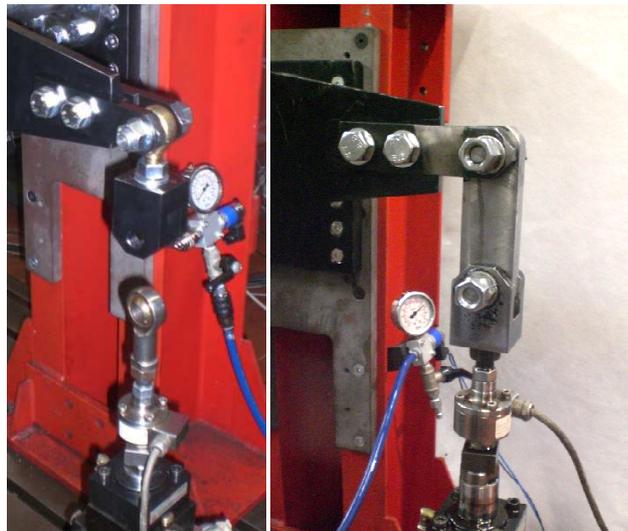


Figura 7.4 - A sinistra: collegamento cinematico ad uniball. A destra: collegamento cinematico a bielle.

In questo modo è possibile bloccare il provino alla colonna con un vincolo ideale d'incastro fissandolo attraverso una giunzione bullonata, e, grazie al movimento alternato dei martinetti, costringere alla rotazione l'estremità opposta del provino sollecitandolo a torsione e ottenendo la sollecitazione di modo III desiderata sull'intaglio formato dal cordone di saldatura.

Si riportano di seguito i calcoli preliminari eseguiti per il dimensionamento del banco:

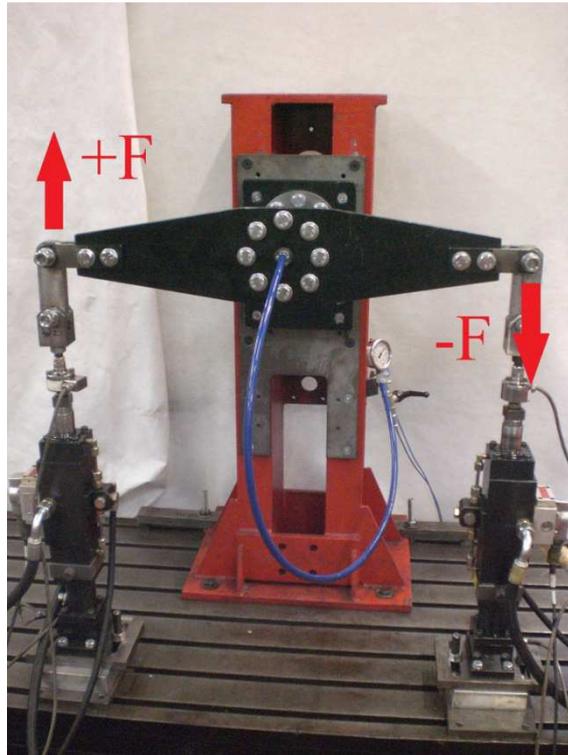


Figura 7.5 - Forze istantanee applicate dai martinetti.

Dati nominali del provino:

Diametro esterno tubo d_e [mm]	51
Diametro interno tubo d_i [mm]	31
Spessore tubo t [mm]	10
Lunghezza totale del provino L [mm]	284

Tabella 7.2 Dimensioni nominali del provino.

Il modulo di resistenza a torsione è:

$$W_t = \frac{\pi d_e^3}{16} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_i}{d_e}\right)^4\right) = \frac{\pi 51^3}{16} \cdot \left(1 - \left(\frac{31}{51}\right)^4\right) = 22490.42 \text{ mm}^3 \quad (7.1)$$

Si è deciso di effettuare il dimensionamento per ottenere un'ampiezza di tensione tangenziale massima $\tau_{a,max} = 300 \div 350 \text{ MPa}$; assunta quindi:

$$\tau_{a,max} = 350 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Si ottiene un momento torcente massimo di progetto:

$$M_{t,max} = \tau_{a,max} \cdot W_t = 350 \cdot 22490.42 = 7871647 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (7.3)$$

Ricordando che:

$$M_{t,max} = 2 \cdot F_{max} \cdot b^* \quad (7.4)$$

Si ottiene:

$$b^* = \frac{M_{t,max}}{2 \cdot F_{max}} = \frac{7871647}{2 \cdot 10000} \cong 393.58 \text{ mm} \quad (7.5)$$

Si sceglie un valore leggermente superiore a quello ricavato dal calcolo:

$$b = 395 \text{ mm} \quad (7.6)$$

L'interasse tra i fori dell'asta risulta quindi:

$$i = 2 \cdot b = 2 \cdot 395 = 790 \text{ mm} \quad (7.7)$$

Il nuovo momento torcente massimo applicabile è:

$$M_{t,max} = 2 \cdot F_{max} \cdot b = 2 \cdot 10000 \cdot 395 = 7900000 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (7.8)$$

Che corrisponde, in termini di sforzo massimo applicato, a:

$$\tau_{a,max} = \frac{M_{t,max}}{W_t} = \frac{7900000}{22490.42} = 351.26 \text{ MPa} \quad (7.9)$$

Si vuole ora stimare l'angolo d'oscillazione dell'asta di collegamento tra i martinetti e, conseguentemente, gli scostamenti verticali all'estremità della stessa.

Il momento d'inerzia polare della sezione tubolare è:

$$J_p = \left(\frac{\pi}{32}\right) \cdot (d_e^4 - d_i^4) = \left(\frac{\pi}{32}\right) \cdot (51^4 - 31^4) = 573505.6 \text{ mm}^4 \quad (7.10)$$

La rotazione per unità di lunghezza che subisce il provino in questa configurazione è:

$$\frac{\theta_{max}}{L} = \frac{M_{t,max}}{G \cdot J_p} = \frac{7900000}{80000 \cdot 573505.6} = 1.72187 \cdot 10^{-4} \frac{\text{rad}}{\text{mm}} \quad (7.11)$$

Accettando di valutare degli angoli di rotazione e spostamenti maggiori rispetto a quanto si otterrà realmente si assume che la lunghezza del tubo corrisponda a quella totale del provino:

$$L = 284 \text{ mm} \quad (7.12)$$

Quindi:

$$\theta_{max} = \frac{\theta_{max}}{L} \cdot L = 1.72187 \cdot 10^{-4} \cdot 284 = 4.89 \cdot 10^{-2} \text{ rad} = 2.80^\circ \quad (7.13)$$

Noto quindi il braccio dell'asta di collegamento tra i martinetti e il provino, pari a b , si ricava che il massimo spostamento verticale alle estremità, ottenuto per una tensione tangenziale applicata al provino di 350 MPa, è pari a:

$$\frac{y_{max}}{b} = \tan(\theta_{max}) \quad (7.14)$$

Cioè:

$$y_{max} = b \cdot \tan(\theta_{max}) = 395 \cdot \tan(4.89 \cdot 10^{-2}) \cong 19.33 \text{ mm} \quad (7.15)$$

Si consideri che un tale spostamento, valutato in eccesso di sicurezza poiché non si è tenuto conto delle piastre d'estremità, sarebbe idealmente raggiungibile solamente nel caso di prove a $R=0$ a vita a fatica limitata; nel caso $R=-1$ imporrebbe una tensione di questa entità significherebbe applicare una $\Delta\tau = 700 \text{ MPa}$, quando nel caso in esame si raggiungerà al massimo una $\Delta\tau = 350 \text{ MPa}$ che causa degli spostamenti d'estremità inferiori (circa la metà di quanto ricavato in (7.15)).

7.2.2 - Studio del layout della macchina di prova

In questo paragrafo si riporta la configurazione scelta per la macchina di prova; questo è il risultato ottenuto dopo alcune iterazioni e prevede la configurazione del collegamento tra i martinetti e l'asta attraverso le bielle, come descritto nel paragrafo 7.2.1:

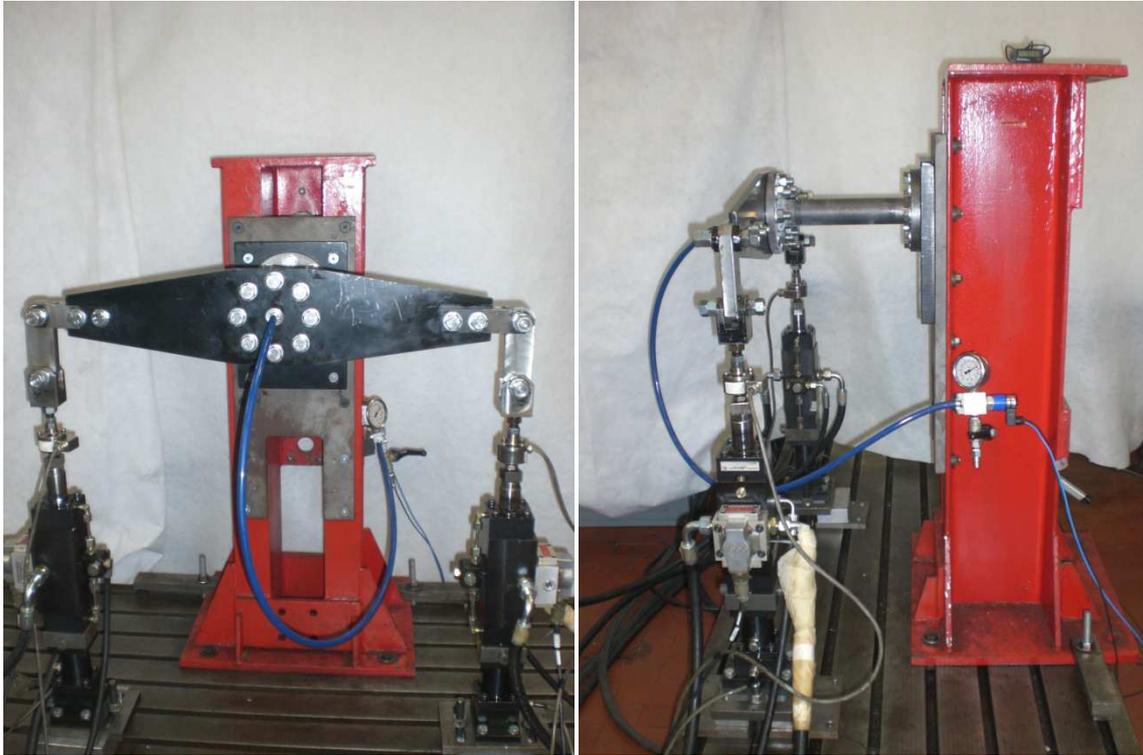


Figura 7.6 - Layout della macchina di prova.

Definito quindi il layout della macchina ci si appresta al calcolo dei vari componenti della stessa e delle giunzioni bullonate che la costituiscono.

7.2.3 - Verifica dei singoli componenti

7.2.3.1 - Braccetto

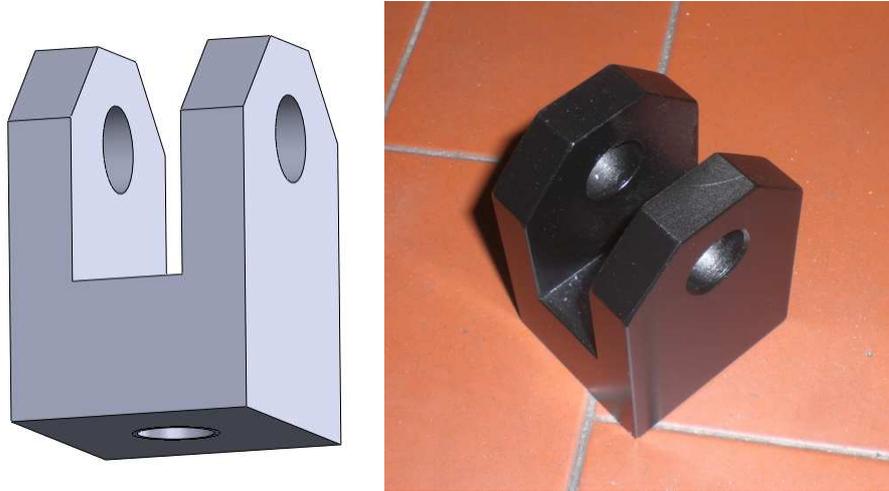


Figura 7.7 - Vista 3D del braccetto e componente realizzato.

Le dimensioni ottenute dal progetto del componente sono:

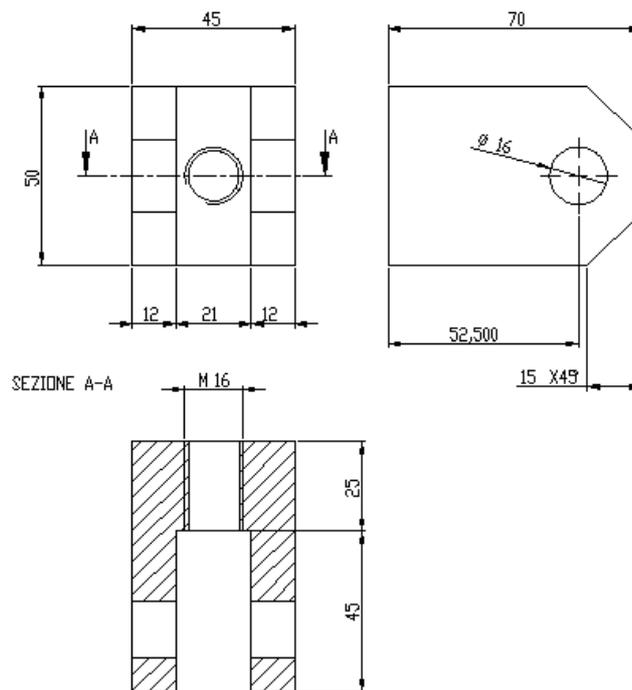


Figura 7.8 - Dimensioni del braccetto.

Nelle condizioni di massima sollecitazione si ha:

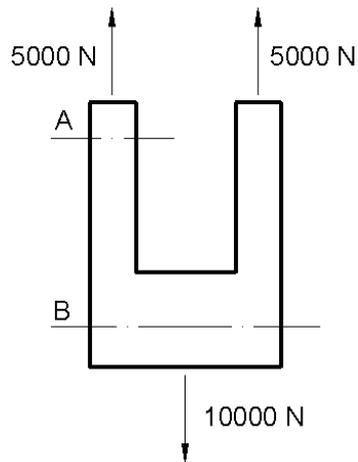


Figura 7.9 - Massima sollecitazione applicata al braccetto.

Come si nota dalla figura precedente il braccetto lavora solamente a trazione e compressione.

7.2.3.1.1 - Verifica statica

Nella sezione inferiore, considerando l'area al netto della dimensione del foro, si ha:

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_B} = \frac{10000}{(45 \cdot 50) - (\pi \cdot 8^2)} = 4.88 \text{ MPa} \quad (7.16)$$

In quella superiore, considerando l'area al netto della dimensione del foro, invece:

$$\sigma_A = \frac{F_A}{A_A} = \frac{5000}{12 \cdot 50 - (12 \cdot 16)} = 12.25 \text{ MPa} \quad (7.17)$$

Come si nota dal calcolo precedente entrambe le sezioni sono sottoposte ad una tensione esigua; il braccetto è realizzato in Fe510 e quindi:

$$\sigma_R = 510 \text{ MPa} \quad (7.18)$$

$$\sigma_S = 355 \text{ MPa} \quad (7.19)$$

Il coefficiente di sicurezza statico è:

$$v_S = \frac{\sigma_S}{\sigma_A} = \frac{355}{12.25} = 28.97 \quad (7.20)$$

Il componente risulta quindi verificato staticamente.

7.2.3.1.2 - Verifica a fatica

Come descritto nel paragrafo precedente il materiale scelto è Fe510, perciò:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1} = 250 \text{ MPa} \quad (7.21)$$

Ricordando che:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} \quad (7.22)$$

Dove si è assunto:

$$\text{Effetto della finitura superficiale: } k_l = 1.12 \quad (7.23)$$

$$\text{Effetto delle dimensioni del pezzo: } k_d = 1.03 \quad (7.24)$$

$$\text{Effetto del tipo di sollecitazione: } k_v = 1 \quad (7.25)$$

$$\text{Effetto di forma: } k_f = 3.38 \quad (7.26)$$

Quindi:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} = \frac{250}{1.12 \cdot 1.03 \cdot 1 \cdot 3.38} = 64.12 \text{ MPa} \quad (7.27)$$

Ipotizzando che il componente sia sollecitato con un rapporto di ciclo $R=-1$ si ha nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa} \quad (7.28)$$

$$\sigma_a = 12.25 \text{ MPa} \quad (7.29)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^*}{\sigma_a} = \frac{64.12}{12.25} = 5.23 \quad (7.30)$$

Ipotizzando invece un rapporto di ciclo $R=0$ si ha, nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 6.125 \text{ MPa} \quad (7.31)$$

$$\sigma_a = 6.125 \text{ MPa} \quad (7.32)$$

Il nuovo limite a fatica a vita infinita valutato per $R=0$ è:

$$\sigma_{a,\infty,R=0}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^* \cdot \sigma_R}{\left(\frac{1+R}{1-R}\right) \cdot \sigma_{a,\infty,R=-1}^* + \sigma_R} = \frac{64.12 \cdot 510}{64.12 + 510} = 56.96 \text{ MPa} \quad (7.33)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=0}^*}{\sigma_a} = \frac{56.96}{6.125} = 9.3 \quad (7.34)$$

Entrambi i coefficienti di sicurezza ricavati sono superiori al valore limite di 1.6; il componente risulta quindi verificato sia staticamente che a fatica.

7.2.3.1.3 - Verifica a rifollamento

Si verificano infine a rifollamento i braccetti del supporto. Si deve avere:

$$\sigma_{rif} = \frac{F_{max}}{d \cdot t} \leq \alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} \quad (7.35)$$

Dove d è il diametro della vite, t lo spessore dei braccetti e a la distanza tra l'asse del foro e il bordo più vicino.

Nel caso in esame:

$$\sigma_{rif} = \frac{5000}{16 \cdot 12} = 26.04 \text{ MPa} \quad (7.36)$$

$$\alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} = \frac{17.5}{16} \cdot 240 = 262.5 \text{ MPa} \quad (7.37)$$

Si osserva perciò che:

$$\sigma_{rif} < \alpha \cdot \sigma_{amm} \quad (7.38)$$

E la verifica a rifollamento è soddisfatta.

7.2.3.2 - Piastrina



Figura 7.10 - Vista 3D della piastrina e componente realizzato.

Le dimensioni ottenute dal progetto del componente sono:

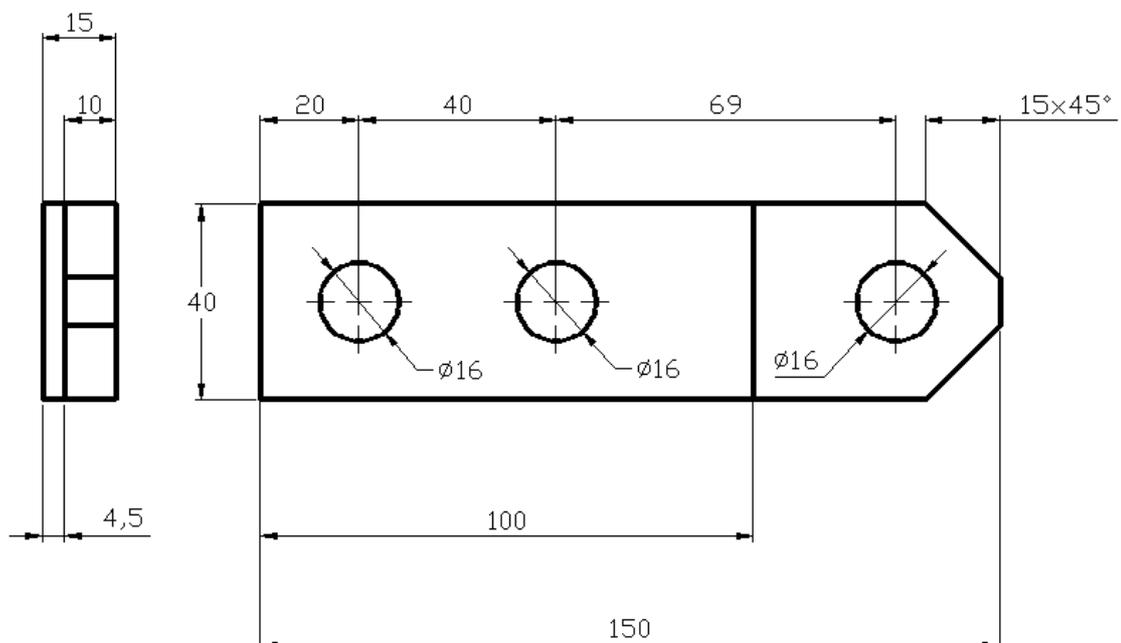


Figura 7.11 - Dimensioni della piastrina.

Nelle condizioni di massima sollecitazione si ha:

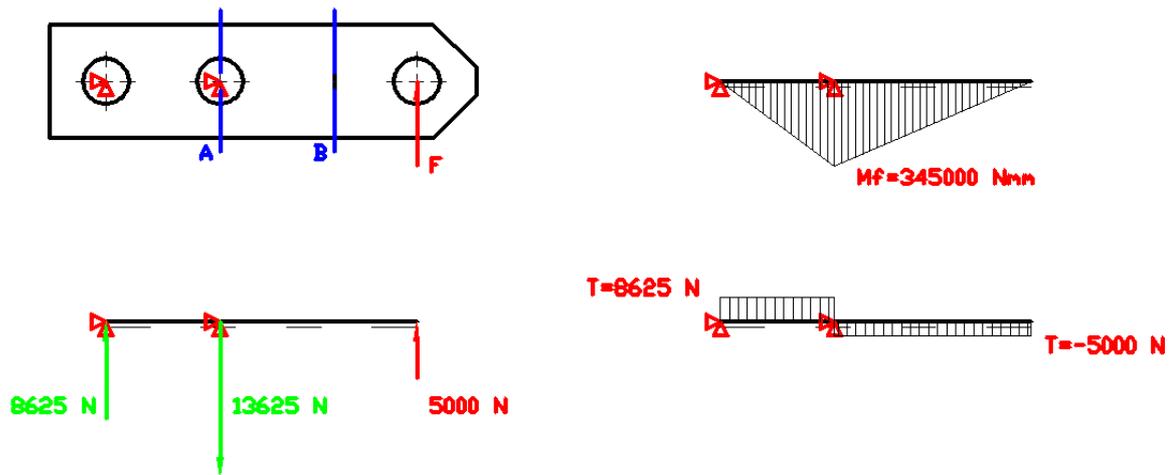


Figura 7.12 - Massima sollecitazione applicata alla piastrina.

7.2.3.2.1 - Verifica statica

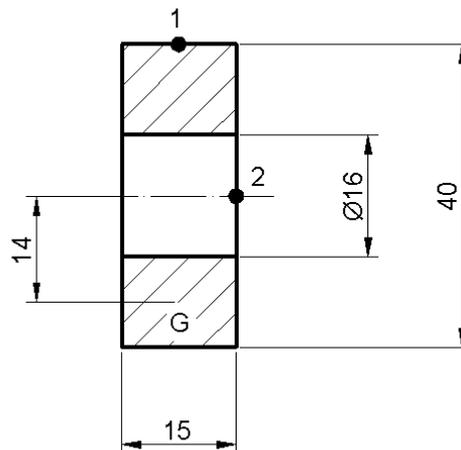


Figura 7.13 - Sezione A (vedere figura 7.12) della piastrina.

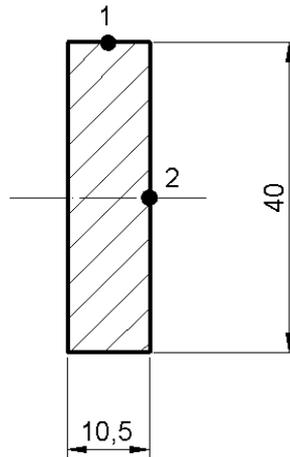


Figura 7.14 - Sezione B (vedere figura 7.12) della piastrina.

Nella sezione A, rappresentata in figura 7.12, si ha:

$$I_{x,A} = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 15 \cdot (20 - 8)^3 + 2 \cdot 15 \cdot 12 \cdot (8 + 6)^2 = 74880 \text{ mm}^4 \quad (7.39)$$

$$\sigma_{f,max,A} = \frac{M_{f,A}}{I_{x,A}} \cdot y_{max,A} = \frac{345000}{74880} \cdot 20 = 92.15 \text{ MPa} \quad (7.40)$$

Inoltre:

$$T_{y,A} = 8625 \text{ N} \quad (7.41)$$

$$S_{x,A} = 15 \cdot 12 \cdot 14 = 2520 \text{ mm}^3 \quad (7.42)$$

$$\tau_{max,A} = \frac{T_{y,A} \cdot S_{x,A}}{I_{x,A} \cdot b} = \frac{8625 \cdot 2520}{74880 \cdot 15} = 19.35 \text{ MPa} \quad (7.43)$$

Poiché dove la tensione dovuta al momento flettente è massima si ha una tensione tangenziale di taglio nulla si può calcolare:

$$\sigma_{id,VM,1} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2} = \sqrt{92.15^2 + 3 \cdot 0^2} = 92.15 \text{ MPa} \quad (7.44)$$

$$\sigma_{id,VM,2} = \sqrt{\sigma_2^2 + 3 \cdot \tau_2^2} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 19.35^2} = 33.52 \text{ MPa} \quad (7.45)$$

Perciò:

$$\sigma_{id,max,A} = 92.15 \text{ MPa} \quad (7.46)$$

Nella sezione B (figura 7.12) invece:

$$I_{x,B} = \frac{1}{12} \cdot 10.5 \cdot (40)^3 = 56000 \text{ mm}^4 \quad (7.47)$$

$$\sigma_{f,max,B} = \frac{M_{f,B}}{I_{x,B}} \cdot y_{max,B} = \frac{145000}{56000} \cdot 20 = 51.78 \text{ MPa} \quad (7.48)$$

Inoltre:

$$T_{y,B} = 5000 \text{ N} \quad (7.49)$$

$$\tau_{max,B} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T_{y,B}}{A_B} = \frac{3}{2} \cdot \frac{5000}{40 \cdot 10.5} = 17.86 \text{ MPa} \quad (7.50)$$

Poiché dove la tensione dovuta al momento flettente è massima si ha una tensione tangenziale di taglio nulla si può calcolare:

$$\sigma_{id,VM,1} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2} = \sqrt{51.78^2 + 3 \cdot 0^2} = 51.78 \text{ MPa} \quad (7.51)$$

$$\sigma_{id,VM,2} = \sqrt{\sigma_2^2 + 3 \cdot \tau_2^2} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 17.86^2} = 30.93 \text{ MPa} \quad (7.52)$$

Perciò:

$$\sigma_{id,max,B} = 51.78 \text{ MPa} \quad (7.53)$$

Si osserva perciò che la massima sollecitazione applicata alla piastrina è:

$$\sigma_{id,max} = 92.15 \text{ MPa} \quad (7.54)$$

La piastrina è realizzata in Fe510 e quindi:

$$\sigma_R = 510 \text{ MPa} \quad (7.55)$$

$$\sigma_S = 355 \text{ MPa} \quad (7.56)$$

Il coefficiente di sicurezza statico è:

$$v_s = \frac{\sigma_S}{\sigma_{id,max}} = \frac{355}{92.15} = 3.85 \quad (7.57)$$

Il componente risulta quindi verificato staticamente.

7.2.3.2.2 - Verifica a fatica

Come descritto nel paragrafo precedente il materiale scelto è Fe510, perciò:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1} = 250 \text{ MPa} \quad (7.58)$$

Ricordando che:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} \quad (7.59)$$

Dove si è assunto:

$$\text{Effetto della finitura superficiale:} \quad k_l = 1.4 \quad (7.60)$$

$$\text{Effetto delle dimensioni del pezzo:} \quad k_d = 1.06 \quad (7.61)$$

$$\text{Effetto del tipo di sollecitazione:} \quad k_v = 1 \quad (7.62)$$

$$\text{Effetto di forma:} \quad k_f = 1.04 \quad (7.63)$$

Quindi:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} = \frac{250}{1.4 \cdot 1.06 \cdot 1 \cdot 1.04} = 161.98 \text{ MPa} \quad (7.64)$$

Ipotizzando che il componente sia sollecitato con un rapporto di ciclo R=-1 si ha nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa} \quad (7.65)$$

$$\sigma_a = 92.15 \text{ MPa} \quad (7.66)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^*}{\sigma_a} = \frac{161.98}{92.15} = 1.76 \quad (7.67)$$

Ipotizzando invece un rapporto di ciclo R=0 si ha, nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 46.075 \text{ MPa} \quad (7.68)$$

$$\sigma_a = 46.075 \text{ MPa} \quad (7.69)$$

Il nuovo limite a fatica a vita infinita valutato per $R=0$ è:

$$\sigma_{a,\infty,R=0}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^* \cdot \sigma_R}{\left(\frac{1+R}{1-R}\right) \cdot \sigma_{a,\infty,R=-1}^* + \sigma_R} = \frac{161.98 \cdot 510}{161.98 + 510} = 122.93 \text{ MPa} \quad (7.70)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=0}^*}{\sigma_a} = \frac{122.93}{46.075} = 2.66 \quad (7.71)$$

Il componente risulta perciò verificato sia staticamente che a fatica.

7.2.3.2.3 - Verifica a rifollamento

Si verifica infine a rifollamento la piastrina. Si deve avere:

$$\sigma_{rif} = \frac{F_{max}}{d \cdot t} \leq \alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} \quad (7.72)$$

Dove d è il diametro della vite, t lo spessore della piastra e a la distanza tra l'asse del foro e il bordo più vicino.

Nel caso in esame:

$$\sigma_{rif} = \frac{13625}{16 \cdot 15} = 56.77 \text{ MPa} \quad (7.73)$$

$$\alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} = \frac{20}{16} \cdot 240 = 300 \text{ MPa} \quad (7.74)$$

Si osserva perciò che:

$$\sigma_{rif} < \alpha \cdot \sigma_{amm} \quad (7.75)$$

E la verifica a rifollamento è soddisfatta.

7.2.3.3 - Asta principale



Figura 7.15 - Vista 3D dell'asta e componente realizzato.

Le dimensioni ottenute dal progetto del componente sono:

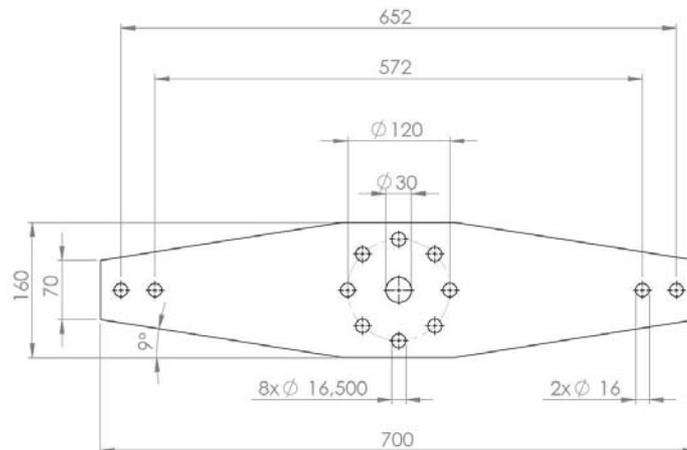


Figura 7.16 - Dimensioni dell'asta.

Nelle condizioni di massima sollecitazione si ha, ipotizzando che il provino sia infinitamente rigido e che applichi un momento resistente MR sufficientemente grande per reagire al carico massimo:

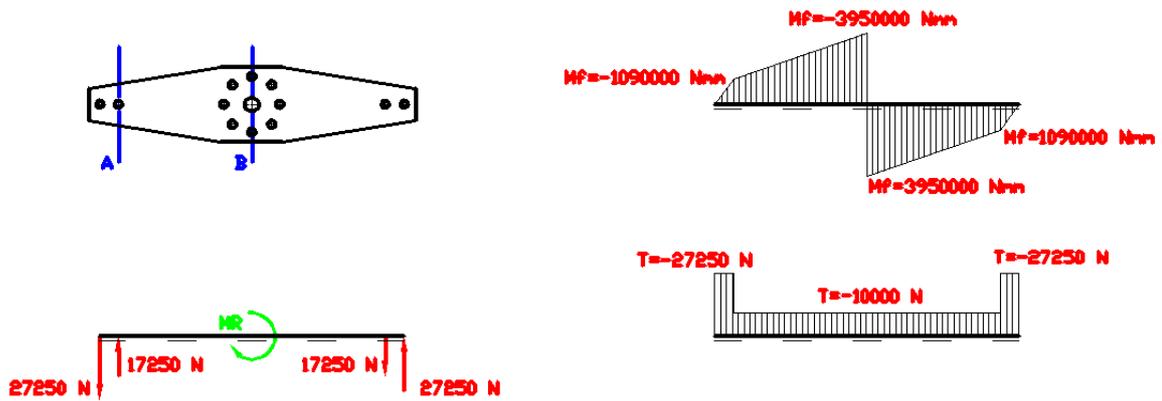


Figura 7.17 - Massima sollecitazione applicata all'asta.

Si procede quindi alla verifica statica e dinamica dell'asta.

7.2.3.3.1 - Verifica statica

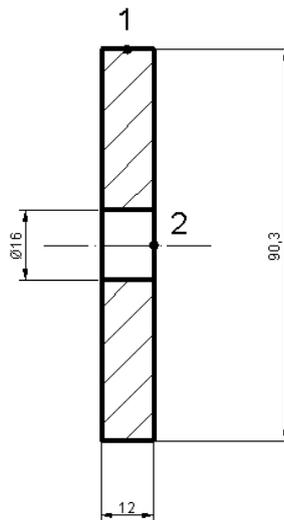


Figura 7.18 - Sezione A (vedere figura 7.17) della piastrina.

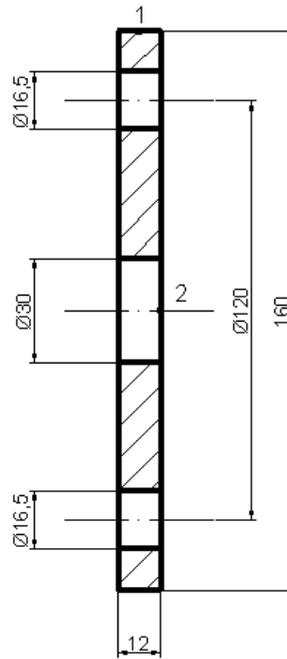


Figura 7.19 - Sezione B (vedere figura 7.17) della piastrina.

Nella sezione A si ha:

$$I_{x,A} = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 12 \cdot (37.15)^3 + 2 \cdot 37.15 \cdot 12 \cdot \left(8 + \frac{37.15}{2}\right)^2 \cong 732218 \text{ mm}^4 \quad (7.76)$$

$$\sigma_{f,max,A} = \frac{M_{f,A}}{I_{x,A}} \cdot y_{max,A} = \frac{1090000}{732218} \cdot \frac{90.3}{2} \cong 67.2 \text{ MPa} \quad (7.77)$$

Inoltre:

$$T_{y,A} = 27250 \text{ N} \quad (7.78)$$

$$S_{x,A} = 12 \cdot 36.9 \cdot 26.7 = 11822.76 \text{ mm}^3 \quad (7.79)$$

$$\tau_{max,A} = \frac{T_{y,A} \cdot S_{x,A}}{I_{x,A} \cdot b} = \frac{27250 \cdot 11822.76}{732218 \cdot 12} = 36.66 \text{ MPa} \quad (7.80)$$

Poiché dove la tensione dovuta al momento flettente è massima si ha una tensione tangenziale di taglio nulla si può calcolare:

$$\sigma_{id,VM,1} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2} = \sqrt{67.2^2 + 3 \cdot 0^2} = 67.2 \text{ MPa} \quad (7.81)$$

$$\sigma_{id,VM,2} = \sqrt{\sigma_2^2 + 3 \cdot \tau_2^2} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 36.66^2} = 63.5 \text{ MPa} \quad (7.82)$$

Perciò:

$$\sigma_{id,max,A} = 67.2 \text{ MPa} \quad (7.83)$$

Nella sezione B (figura 7.12) invece:

$$I_{x,B} = 12 \cdot 2 \cdot [12 \cdot (74)^2 + 37 \cdot (33.5)^2 + \frac{12^3 + 37^3}{12}] = 2678408 \text{ mm}^4 \quad (7.84)$$

$$\sigma_{f,max,B} = \frac{M_{f,B}}{I_{x,B}} \cdot y_{max,B} = \frac{3950000}{2678408} \cdot 80 = 117.98 \text{ MPa} \quad (7.85)$$

Inoltre:

$$T_{y,B} = 10000 \text{ N} \quad (7.86)$$

$$S_{x,B} = 12 \cdot 11.75 \cdot 74.1125 + 12 \cdot 36.75 \cdot 33.375 \cong 25168.2 \text{ mm}^3 \quad (7.87)$$

$$\tau_{max,B} = \frac{T_{y,B} \cdot S_{x,B}}{I_{x,B} \cdot b} = \frac{10000 \cdot 25168.2}{2678408 \cdot 12} = 7.83 \text{ MPa} \quad (7.88)$$

Poiché dove la tensione dovuta al momento flettente è massima si ha una tensione tangenziale di taglio nulla si può calcolare:

$$\sigma_{id,VM,1} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2} = \sqrt{117.98^2 + 3 \cdot 0^2} = 117.98 \text{ MPa} \quad (7.89)$$

$$\sigma_{id,VM,2} = \sqrt{\sigma_2^2 + 3 \cdot \tau_2^2} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 7.83^2} = 13.56 \text{ MPa} \quad (7.90)$$

Perciò:

$$\sigma_{id,max,B} = 117.98 \text{ MPa} \quad (7.91)$$

Si osserva perciò che la massima sollecitazione applicata all'asta è:

$$\sigma_{id,max} = 117.98 \text{ MPa} \quad (7.92)$$

La stessa è realizzata in Fe510 e quindi:

$$\sigma_R = 510 \text{ MPa} \quad (7.93)$$

$$\sigma_S = 355 \text{ MPa} \quad (7.94)$$

Il coefficiente di sicurezza statico è:

$$v_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{id,max}} = \frac{355}{117.98} = 3 \quad (7.95)$$

Il componente risulta quindi verificato staticamente.

Si osserva però che, soprattutto sulla sezione B e a causa dell'approccio semplificato monodimensionale, si stanno sopravvalutando sensibilmente le tensioni agenti poiché gran parte delle stesse sono già state scaricate dai bulloni più esterni; considerando perciò che una verifica a fatica con carichi di questa entità, calcolati con l'approccio monodimensionale, comporterebbe un sovradimensionamento esagerato si è preferito simulare un modello FEM dell'asta.

Il modello è molto semplice e utilizza gli elementi SOLID185 con Key Options:

- K1=3;
- K3=0;
- K6=0.

La geometria è stata importata da Solidworks®, passando attraverso il formato IGES.

Le condizioni al contorno applicate sono:

- Vincolo delle linee esterne dei fori, per le quali si ha l'unione bullonata col provino, in tutte e tre le direzioni; anche in questo caso si è supposto che il provino sia infinitamente rigido per poter applicare vincoli di questa tipologia;
- Applicazione dei carichi calcolati in figura 7.17 attraverso forze concentrate sui fori (vedere figura 7.20).

Si è quindi creata una mesh free con global element size pari a 3 mm; successivamente sono stati applicati dei refinement di livello minimo sui fori vincolati, con profondità di raffinamento di 4 elementi.

Si riporta un'immagine del modello semplificato ottenuto:

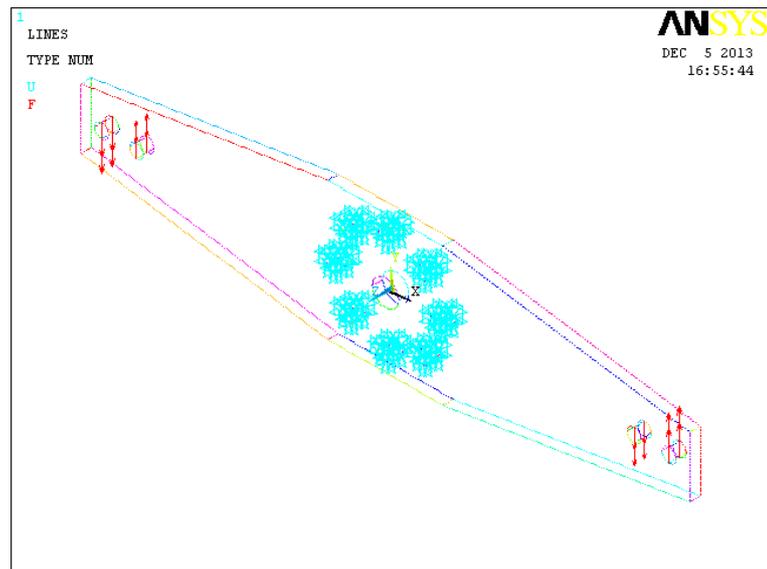


Figura 7.20 - Modello 3D utilizzato per l'analisi dell'asta e condizioni al contorno applicate.

Infine si riporta un'immagine della mesh ottenuta:

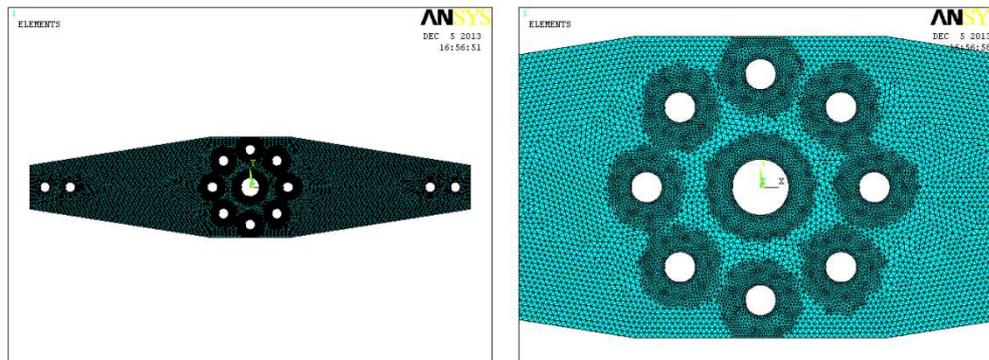


Figura 7.21 - Mesh utilizzata per le analisi.

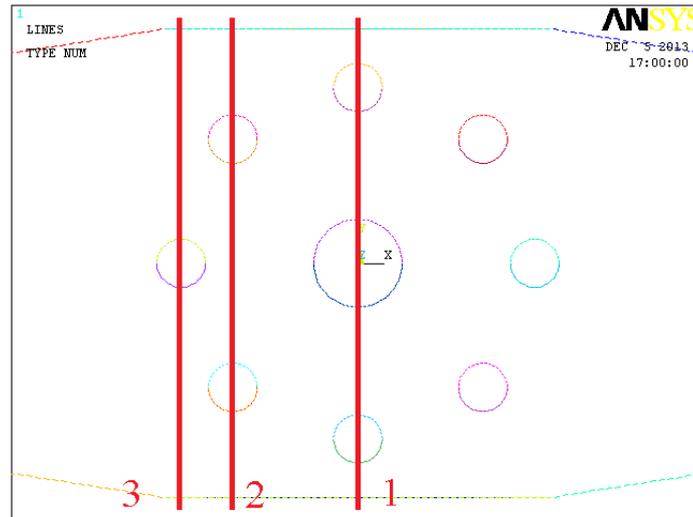


Figura 7.22 - Sezioni di riferimento analizzate nel modello FEM.

Si è quindi osservato che sulle sezioni nette dei fori, indicate in figura 7.22, si hanno tensioni sensibilmente inferiori rispetto a quelle calcolate dall'analisi monodimensionale; in particolare si ha:

$$\sigma_{f,max,1} \cong 0 \text{ MPa} \quad (7.96)$$

$$\sigma_{f,max,2} \cong 48.7 \text{ MPa} \quad (7.97)$$

$$\sigma_{f,max,3} \cong 45.5 \text{ MPa} \quad (7.98)$$

La massima tensione sull'asta si ha in prossimità della sezione A di figura 7.17 ed è pari a:

$$\sigma_{f,max,A} \cong 78.6 \text{ MPa} \quad (7.99)$$

Si conferma quindi a maggior ragione la verifica statica dell'asta; inoltre si è deciso di svolgere i calcoli a fatica proprio sulla sezione suddetta utilizzando i risultati del FEM e assumendo:

$$\sigma_{id,max,A} = \sigma_a = 78.6 \text{ MPa}$$

7.2.3.3.2 - Verifica a fatica

Come descritto nel paragrafo precedente il materiale scelto è Fe510, perciò:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1} = 250 \text{ MPa} \quad (7.100)$$

Ricordando che:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} \quad (7.101)$$

Dove si è assunto:

$$\text{Effetto della finitura superficiale: } k_l = 1.4 \quad (7.102)$$

$$\text{Effetto delle dimensioni del pezzo: } k_d = 1.02 \quad (7.103)$$

$$\text{Effetto del tipo di sollecitazione: } k_v = 1 \quad (7.104)$$

$$\text{Effetto di forma: } k_f = 1.11 \quad (7.105)$$

Quindi:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} = \frac{250}{1.4 \cdot 1.02 \cdot 1 \cdot 1.11} = 157.72 \text{ MPa} \quad (7.106)$$

Ipotizzando che il componente sia sollecitato con un rapporto di ciclo $R=-1$ si ha nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa} \quad (7.107)$$

$$\sigma_a = 78.6 \text{ MPa} \quad (7.108)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^*}{\sigma_a} = \frac{157.72}{78.6} = 2 \quad (7.109)$$

Ipotizzando invece un rapporto di ciclo $R=0$ si ha, nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 39.3 \text{ MPa} \quad (7.110)$$

$$\sigma_a = 39.3 \text{ MPa} \quad (7.111)$$

Il nuovo limite a fatica a vita infinita valutato per $R=0$ è:

$$\sigma_{a,\infty,R=0}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^* \cdot \sigma_R}{\left(\frac{1+R}{1-R}\right) \cdot \sigma_{a,\infty,R=-1}^* + \sigma_R} = \frac{157.72 \cdot 510}{157.72 + 510} \cong 120.5 \text{ MPa} \quad (7.112)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=0}^*}{\sigma_a} = \frac{120.5}{39.3} = 3.07 \quad (7.113)$$

Il componente risulta perciò verificato sia staticamente che a fatica poiché entrambi i coefficienti di sicurezza a fatica sono superiori a 1.6.

7.2.3.3.3 - Verifica a rifollamento

Si verifica infine a rifollamento l'asta. Si deve avere:

$$\sigma_{rif} = \frac{V_{max}}{d \cdot t} \leq \alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} \quad (7.114)$$

Dove d è il diametro della vite, t lo spessore della piastra e a è la distanza tra l'asse del foro e il bordo più vicino.

Per il calcolo di V_{max} nel caso in esame si faccia riferimento al paragrafo 7.2.4.1.

Nel caso in esame:

$$\sigma_{rif} = \frac{16400}{16 \cdot 12} = 85.42 \text{ MPa} \quad (7.115)$$

$$\alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} = \frac{20}{16} \cdot 240 = 300 \text{ MPa} \quad (7.116)$$

Si osserva perciò che:

$$\sigma_{rif} < \alpha \cdot \sigma_{amm} \quad (7.117)$$

E la verifica a rifollamento è soddisfatta.

7.2.3.4 - Bielle

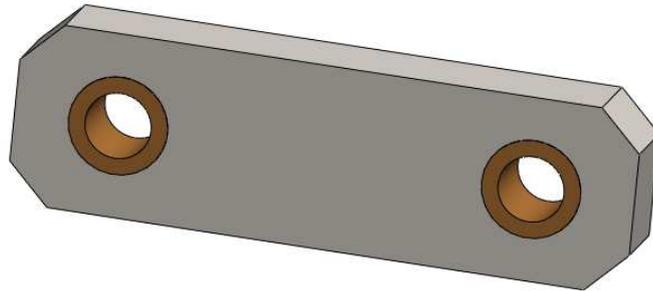


Figura 7.23 - Vista 3D della biella.

Le dimensioni ottenute dal progetto del componente sono:

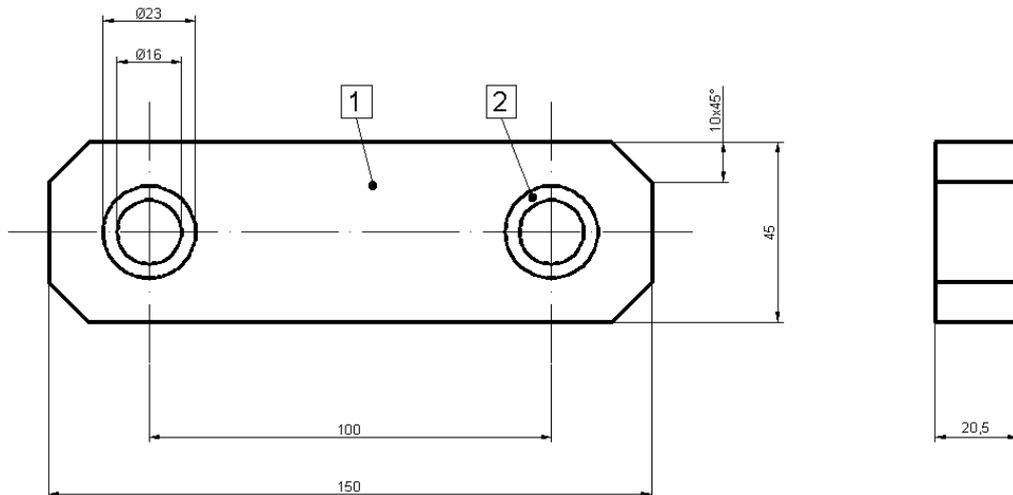


Figura 7.24 - Dimensioni della biella.

Si noti che nell'immagine 7.24 sono stati indicati con numeri differenti i diversi materiali; con 1 si è indicato l'acciaio Fe360 mentre con 2 le bronzine calettate a pressione.

Nelle condizioni di massima sollecitazione, trascurando gli effetti flessionali dovuti alla lieve rotazione della biella, quest'ultima è sollecitata da una forza di trazione/compressione di modulo 10000N.

7.2.3.4.1 - Verifica statica

Considerando l'area della sezione netta del materiale base e senza tenere conto della presenza della bronzina si ha:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_n} = \frac{10000}{(45 \cdot 20.5) - (23 \cdot 20.5)} = 22.17 \text{ MPa} \quad (7.118)$$

La biella è realizzata in Fe360, perciò:

$$\sigma_R = 360 \text{ MPa} \quad (7.119)$$

$$\sigma_S = 235 \text{ MPa} \quad (7.120)$$

Il coefficiente di sicurezza statico è:

$$v_S = \frac{\sigma_S}{\sigma_{max}} = \frac{235}{22.17} = 10.6 \quad (7.121)$$

Il componente risulta quindi verificato staticamente.

7.2.3.4.2 - Verifica a fatica

Come descritto nel paragrafo precedente il materiale scelto è Fe360, perciò:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1} = 180 \text{ MPa} \quad (7.122)$$

Ricordando che:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} \quad (7.123)$$

Dove si è assunto:

$$\text{Effetto della finitura superficiale:} \quad k_l = 1.1 \quad (7.124)$$

$$\text{Effetto delle dimensioni del pezzo:} \quad k_d = 1.1 \quad (7.125)$$

$$\text{Effetto del tipo di sollecitazione:} \quad k_v = 1 \quad (7.126)$$

$$\text{Effetto di forma:} \quad k_f = 4.28 \quad (7.127)$$

Quindi:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} = \frac{180}{1.1 \cdot 1.1 \cdot 1 \cdot 4.28} = 34.76 \text{ MPa} \quad (7.128)$$

Ipotizzando che il componente sia sollecitato con un rapporto di ciclo $R=-1$ si ha nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa} \quad (7.129)$$

$$\sigma_a = 22.17 \text{ MPa} \quad (7.130)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^*}{\sigma_a} = \frac{34.76}{22.17} \cong 1.6 \quad (7.131)$$

Ipotizzando invece un rapporto di ciclo $R=0$ si ha, nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 11.09 \text{ MPa} \quad (7.132)$$

$$\sigma_a = 11.09 \text{ MPa} \quad (7.133)$$

Il nuovo limite a fatica a vita infinita valutato per $R=0$ è:

$$\sigma_{a,\infty,R=0}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^* \cdot \sigma_R}{\left(\frac{1+R}{1-R}\right) \cdot \sigma_{a,\infty,R=-1}^* + \sigma_R} = \frac{34.76 \cdot 360}{34.76 + 360} = 31.7 \text{ MPa} \quad (7.134)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=0}^*}{\sigma_a} = \frac{31.7}{11.09} = 2.85 \quad (7.135)$$

Si ritiene perciò verificato a fatica anche questo componente.

7.2.3.4.3 - Verifica a rifollamento

Si verifica infine a rifollamento la biella. Si deve avere:

$$\sigma_{rif} = \frac{F_{max}}{d \cdot t} \leq \alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} \quad (7.136)$$

Dove d è il diametro della vite, t lo spessore della piastra e a e la distanza tra l'asse del foro e il bordo più vicino.

Nel caso in esame, senza tener conto della presenza della bronzina, si ha:

$$\sigma_{rif} = \frac{10000}{23 \cdot 20.5} = 21.2 \text{ MPa} \quad (7.137)$$

$$\alpha \cdot \sigma_{amm} = \frac{a}{d} \cdot \sigma_{amm} = \frac{22.5}{23} \cdot 160 = 156.5 \text{ MPa} \quad (7.138)$$

Si osserva perciò che:

$$\sigma_{rif} < \alpha \cdot \sigma_{amm} \quad (7.139)$$

E la verifica a rifollamento è soddisfatta.

7.2.3.5 - Perni

Nella macchina sono utilizzati dei perni diametro 16 mm di due lunghezze diverse; si riportano di seguito le verifiche statiche e a fatica relative ad una delle due tipologie.



Figura 7.25 - Vista 3D del perno.

Le dimensioni ottenute dal progetto del componente, in uno dei due casi, sono:

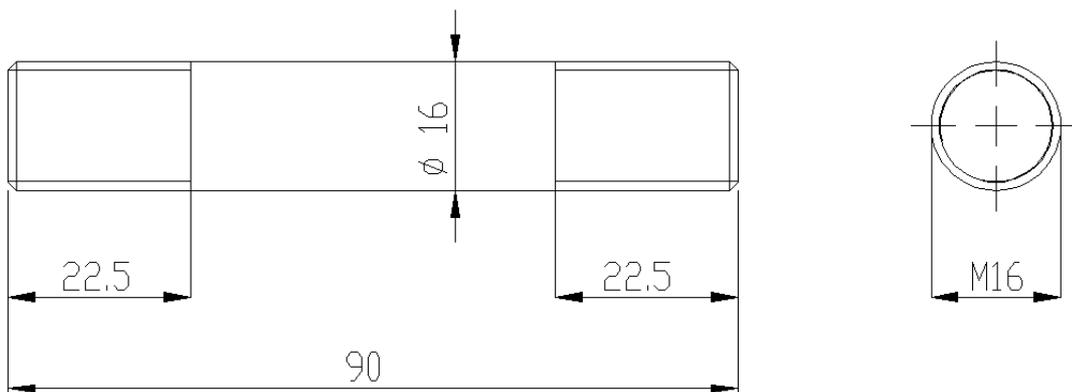


Figura 7.26 - Dimensioni di una delle due tipologie di perno.

Si ha perciò:

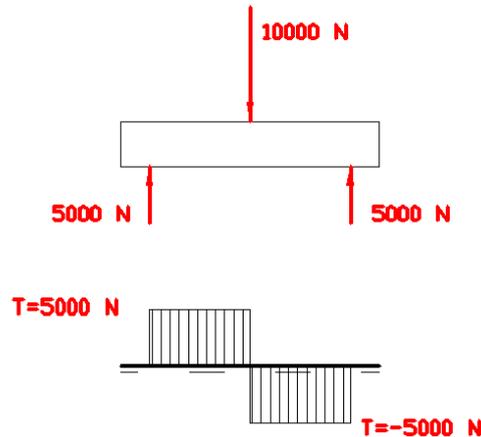


Figura 7.27 - Diagramma del taglio del perno.

Nelle condizioni di massima sollecitazione si ha uno sforzo di taglio di 5000 N sul perno stesso.

7.2.3.5.1 - Verifica statica

In una sezione qualsiasi del perno si ha:

$$T_{y,max} = 5000 \text{ N} \quad (7.140)$$

$$\tau_{max} = \frac{4}{3} \cdot \frac{T_{y,max}}{A} = \frac{4}{3} \cdot \frac{5000}{\pi \cdot 8^2} = 33.16 \text{ MPa} \quad (7.141)$$

Quindi:

$$\sigma_{id,VM,max} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3 \cdot \tau_{max}^2} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 33.16^2} = 57.43 \text{ MPa} \quad (7.142)$$

Entrambi i perni sono realizzati in C40 bonificato perciò:

$$\sigma_R = 700 \text{ MPa} \quad (7.143)$$

$$\sigma_S = 490 \text{ MPa} \quad (7.144)$$

Il coefficiente di sicurezza statico è:

$$v_s = \frac{\sigma_S}{\sigma_{id,VM,max}} = \frac{490}{57.43} = 8.53 \quad (7.145)$$

Il componente risulta quindi verificato staticamente.

7.2.3.5.2 - Verifica a fatica

Come descritto nel paragrafo precedente il materiale scelto è C40 bonificato, perciò:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1} = 350 \text{ MPa} \quad (7.146)$$

Ricordando che:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} \quad (7.147)$$

Dove si è assunto:

$$\text{Effetto della finitura superficiale:} \quad k_l = 1.15 \quad (7.148)$$

$$\text{Effetto delle dimensioni del pezzo:} \quad k_d = 1.08 \quad (7.149)$$

$$\text{Effetto del tipo di sollecitazione:} \quad k_v = 1 \quad (7.150)$$

$$\text{Effetto di forma:} \quad k_f = 1 \quad (7.151)$$

Quindi:

$$\sigma_{a,\infty,R=-1}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}}{k_l \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_f} = \frac{350}{1.15 \cdot 1.08 \cdot 1 \cdot 1} = 281.8 \text{ MPa} \quad (7.152)$$

Ipotizzando che il componente sia sollecitato con un rapporto di ciclo $R=-1$ si ha, nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa} \quad (7.153)$$

$$\sigma_a = 57.43 \text{ MPa} \quad (7.154)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^*}{\sigma_a} = \frac{281.8}{57.43} = 4.9 \quad (7.155)$$

Ipotizzando invece un rapporto di ciclo $R=0$ si ha, nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 28.72 \text{ MPa} \quad (7.156)$$

$$\sigma_a = 28.72 \text{ MPa} \quad (7.157)$$

Il nuovo limite a fatica a vita infinita valutato per $R=0$ è:

$$\sigma_{a,\infty,R=0}^* = \frac{\sigma_{a,\infty,R=-1}^* \cdot \sigma_R}{\left(\frac{1+R}{1-R}\right) \cdot \sigma_{a,\infty,R=-1}^* + \sigma_R} = \frac{281.8 \cdot 700}{281.8+700} = 200.9 \text{ MPa} \quad (7.158)$$

Si ricava perciò:

$$\gamma_m = \frac{\sigma_{a,\infty,R=0}^*}{\sigma_a} = \frac{200.9}{28.72} = 7 \quad (7.159)$$

Entrambi i coefficienti di sicurezza ricavati sono superiori al valore limite di 1.6; il componente risulta quindi verificato anche a fatica.

7.2.3.6 - Rod Ends

Come indicato in [18] i snodi sferici devono essere dimensionati come un normale cuscinetto radente; la verifica da svolgere è che la pressione specifica non superi il valore di quella ammissibile in funzione del materiale e delle condizioni di applicazione, cioè:

$$p = \frac{F}{d \cdot L} \leq p_{amm} \quad (7.160)$$

Dove L è la lunghezza del tratto di contatto e d il diametro di contatto.

Dal catalogo del costruttore (NIKO) si osserva la sfera è realizzata con un acciaio al cromo e la guida in bronzo H62; si assume perciò da [18] una pressione ammissibile pari a:

$$p_{amm} = 25 \text{ MPa} \quad (7.161)$$

Da cui:

$$p = \frac{F}{d \cdot L} = \frac{10000}{42 \cdot 15} = 15.87 \text{ MPa} \leq p_{amm} = 25 \text{ MPa} \quad (7.162)$$

Inoltre è necessario verificare che il prodotto di pressione per velocità periferica sia inferiore ad un certo limite dato dall'applicazione; in questo caso si ha, stimando una frequenza massima di utilizzo di 15 Hz ed eseguendo i calcoli come se il giunto ruotasse completamente:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 15 = 94.25 \text{ rad/s} \quad (7.163)$$

La velocità periferica nel punto di contatto tra sfera e guide esterne perciò è:

$$v = r \cdot \omega = \frac{21}{1000} \cdot 94.25 = 1.98 \text{ m/s} \quad (7.164)$$

Assunto perciò un valore limite del prodotto pari a $35 \text{ MPa} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ si ha:

$$p \cdot v = 15.87 \cdot 1.98 = 31.42 \text{ MPa} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq (p \cdot v)_{lim} = 35 \text{ MPa} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7.165)$$

7.2.3.7 - Bronzine

Come indicato in [18] le bronzine inserite nelle bielle devono essere verificate in modo tale che la pressione specifica non superi il valore di quella ammissibile in funzione del materiale e delle condizioni di applicazione, cioè:

$$p = \frac{F}{d \cdot L} \leq p_{amm} \quad (7.166)$$

Dove L è la lunghezza del tratto di contatto e d il diametro di contatto.

Si noti che le bronzine sono state realizzate in corso d'opera per risolvere le problematiche legate agli uniball, come già descritto in precedenza; il materiale utilizzato è legato alle disponibilità di magazzino del laboratorio del DII. È stato quindi adottato un bronzo B14 UNI 1701 (bronzo allo stagno) per il quale si assume:

$$p_{amm} = 25 \text{ MPa} \quad (7.167)$$

Da cui:

$$p = \frac{F}{d \cdot L} = \frac{10000}{16 \cdot 20.5} = 30.5 \text{ MPa} > p_{amm} = 25 \text{ MPa} \quad (7.168)$$

Si osserva perciò che, con il dato di pressione ammissibile assunto da [18], le bronzine non sono verificate a pressione specifica quando si utilizza la macchina a pieno carico. Questa verifica è confermata dal comportamento reale del componente: infatti quest'ultimo, dopo aver eseguito una prova ad alto carico, si è deformato plasticamente, ovalizzando il foro precedentemente alesato; la problematica riscontrata nel successivo utilizzo delle bielle consta nella loro rumorosità dovuta al gioco creatosi tra i perni e le bronzine stesse e nel peggioramento dei segnali in forza acquisiti dalle celle di carico.

Si consiglia pertanto di cambiare il materiale con il quale le boccole sono realizzate; si propone un bronzo all'alluminio che lega buone qualità di scorrimento con ottime proprietà meccaniche.

7.2.3.8 - Viti di collegamento

I collegamenti tra lo stelo del cilindro e il cinematismo sono realizzati con barre filettate M16; anche queste vanno verificate staticamente e a fatica.

Nelle condizioni di massima sollecitazione, trascurando gli effetti della flessione causata dalla piccola rotazione del cinematismo per compensare gli spostamenti orizzontali dell'asta, si ha uno sforzo assiale di 10000 N.

7.2.3.8.1 - Verifica statica

Assunto quindi l'utilizzo di barre M16 classe 8.8 si ha:

$$\text{Area resistente viti: } A_{resistente,b} = 157 \text{ mm}^2 \quad (7.169)$$

$$\text{Tensione di rottura vite: } f_t = 8 \cdot 100 = 800 \text{ MPa} \quad (7.170)$$

$$\text{Tensione di snervamento della vite: } f_y = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa} \quad (7.171)$$

$$\text{Resistenza di progetto della vite: } f_{k,n} = \min\{f_y; 0.7 \cdot f_t\} = 560 \text{ MPa} \quad (7.172)$$

La tensione di trazione ammissibile della vite è:

$$\sigma_{b,adm} = \frac{f_{k,n}}{1.5} = \frac{560}{1.5} = 373.33 \text{ MPa} \quad (7.173)$$

La tensione di taglio ammissibile della vite è:

$$\tau_{b,adm} = \frac{\sigma_{b,adm}}{\sqrt{2}} = \frac{373.33}{\sqrt{2}} \cong 264 \text{ MPa} \quad (7.174)$$

In una sezione qualsiasi della barra filettata si ha:

$$N = 10000 \text{ N} \quad (7.175)$$

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A_{res}} = \frac{10000}{157} = 63.7 \text{ MPa} \quad (7.176)$$

Si osserva perciò che:

$$\sigma_{max} = 63.7 \text{ MPa} < \sigma_{b,adm} = 373.33 \text{ MPa} \quad (7.177)$$

Il componente risulta quindi verificato staticamente.

7.2.3.8.2 - Verifica a fatica

Nel caso di asta filettata M16 classe 8.8 si ha, dalla VDI2230:

$$\sigma_{D,R=-1} = 72.5 \text{ MPa} \quad (7.178)$$

Ipotizzando che il componente sia sollecitato con un rapporto di ciclo $R=-1$ si ha inoltre:

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa} \quad (7.179)$$

$$\sigma_a = 63.7 \text{ MPa} \quad (7.180)$$

La verifica da svolgere in questo caso è:

$$\sigma_a \leq 0.9 \cdot \sigma_D \quad (7.181)$$

Cioè:

$$\sigma_a = 63.7 \text{ MPa} \leq 0.9 \cdot \sigma_{D,R=-1} = 65.25 \text{ MPa} \quad (7.182)$$

Ipotizzando invece un rapporto di ciclo $R=0$ si ha, nel punto di massima sollecitazione:

$$\sigma_m = 31.85 \text{ MPa} \quad (7.183)$$

$$\sigma_a = 31.85 \text{ MPa} \quad (7.184)$$

Nel caso di asta filettata M16 classe 8.8 si ha, dalla VDI2230:

$$\sigma_{D,R=0} = 71.25 \text{ MPa} \quad (7.185)$$

La verifica da svolgere in questo caso è:

$$\sigma_a = 31.85 \text{ MPa} < 0.9 \cdot \sigma_{D,R=0} = 64.125 \text{ MPa} \quad (7.186)$$

Entrambe le verifiche svolte sono soddisfatte; le barre filettate M16 risultano quindi verificate anche a fatica.

7.2.4 - Verifica dei collegamenti bullonati

7.2.4.1 - Calcolo della giunzione bullonata tra asta e provino

Si riporta un'immagine descrittiva del layout della giunzione in esame:

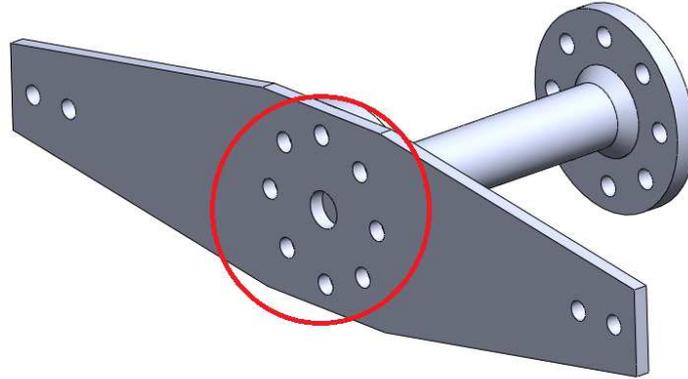


Figura 7.28 - Indicazione del collegamento analizzato.

Si passa quindi al calcolo della giunzione bullonata atta a unire l'asta principale di collegamento tra i due martinetti e il provino; si noti che tutte le grandezze indicate col pedice "b" sono riferite ai bulloni. I successivi calcoli sono validi anche per la giunzione tra il provino e l'interfaccia collegata alla colonna poiché il momento torcente è costante lungo tutto il tubo e il diametro centro fori delle due flange è uguale.

Poiché:

$$M_{t,max} = 7871647 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (7.187)$$

Allora, assunto un diametro centro fori per la giunzione bullonata pari a 120 mm, la forza massima applicata sui bulloni della giunzione è:

$$F_{max,b} = \frac{M_{t,max}}{(120/2)} = \frac{7871647}{60} = 131194.12 \text{ N} \quad (7.188)$$

Assunto quindi l'utilizzo di viti M16 classe 8.8 si ha:

$$\text{Area resistente viti: } A_{resistente,b} = 157 \text{ mm}^2 \quad (7.189)$$

$$\text{Tensione di rottura vite: } f_t = 8 \cdot 100 = 800 \text{ MPa} \quad (7.190)$$

$$\text{Tensione di snervamento della vite: } f_y = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa} \quad (7.191)$$

$$\text{Resistenza di progetto della vite: } f_{k,n} = \min\{f_y; 0.7 \cdot f_t\} = 560 \text{ MPa} \quad (7.192)$$

La tensione di trazione ammissibile della vite è:

$$\sigma_{b,adm} = \frac{f_{k,n}}{1.5} = \frac{560}{1.5} = 373.33 \text{ MPa} \quad (7.193)$$

La tensione di taglio ammissibile della vite è:

$$\tau_{b,adm} = \frac{\sigma_{b,adm}}{\sqrt{2}} = \frac{373.33}{\sqrt{2}} \cong 264 \text{ MPa} \quad (7.194)$$

Il tiro da indurre serrando vite è:

$$N_s = 0.8 \cdot f_{k,n} \cdot A_{res,b} = 0.8 \cdot 560 \cdot 157 = 70336 \text{ N} \quad (7.195)$$

Il carico massimo trasmissibile per attrito, assunto un coefficiente di sicurezza pari a 1.25 e un coefficiente d'attrito tra superfici sgrassate in condizioni normali pari a 0.3, è:

$$V_{f,0} = \frac{N_s \cdot \mu}{\gamma_s} = \frac{70336 \cdot 0.3}{1.25} = 16880.64 \text{ N} \quad (7.196)$$

La forza di taglio massima da trasmettere per attrito per singola vite e singola superficie d'attrito è:

$$V = \frac{F_{max,b}}{n_b \cdot n_s} \quad (7.197)$$

dove n_b è il numero dei bulloni e n_s il numero delle superfici d'attrito; nel caso in esame si ha $n_s = 1$.

Per la corretta verifica ad attrito della giunzione è necessario che:

$$V_{f,0} \geq V \quad (7.198)$$

Quindi:

$$n_b = \frac{F_{max,b}}{V \cdot n_s} \geq \frac{F_{max,b}}{V_{f,0} \cdot n_s} = \frac{131194.12}{16880.64 \cdot 1} = 7.77 \text{ viti} \quad (7.199)$$

Per la resistenza ad attrito della giunzione risultano quindi necessarie e sufficienti 8 viti M16 classe 8.8. La giunzione ora deve essere verificata anche a taglio.

Indicato il numero di diametri resistenti con n_d la forza di taglio applicata alla singola vite e per singolo diametro resistente è:

$$V = \frac{F_{max,b}}{n_b \cdot n_d} = \frac{131194.12}{8 \cdot 1} \cong 16400 \text{ N} \quad (7.200)$$

La tensione di taglio applicata alla vite è quindi.

$$\tau_b = \frac{V}{A_{res,b}} = \frac{16400}{157} \cong 104.5 \text{ MPa} \quad (7.201)$$

La verifica a taglio, nel caso di presenza di sola tensione tangenziale esterna di taglio, è riassunta dalla seguente formula:

$$\tau_b = 104.5 \text{ MPa} \leq \tau_{b,adm} = 264 \text{ MPa} \quad (7.202)$$

Quest'ultima risulta quindi soddisfatta.

Considerando inoltre che la giunzione bullonata in condizioni normali lavora ad attrito si osserva che le tensioni causate dalle forze applicate fluiscono attraverso le flange unite e non sollecitano a taglio le viti; ciò significa che quest'ultime sono caricate unicamente dallo sforzo assiale causato dal serraggio, ma non risentono delle forze alterne derivate dal momento torcente. Garantendo perciò un funzionamento della giunzione ad attrito, e osservando che non ci sono forze cicliche che tendono a distaccare i due elementi congiunti, non si ritiene necessario svolgere una verifica a fatica sulla bullonatura poiché soggetta sempre allo stesso carico costante dovuto al serraggio. Si noti che la giunzione è stata verificata anche a taglio solo per garantire l'integrità strutturale della macchina anche nel caso ci sia scorrimento tra i piatti, ma questa è considerata una situazione non accettabile nel funzionamento normale.

7.2.4.2 - Calcolo della giunzione bullonata tra l'asta principale e le piastrine laterali

Si riporta un'immagine descrittiva del layout della giunzione in esame:

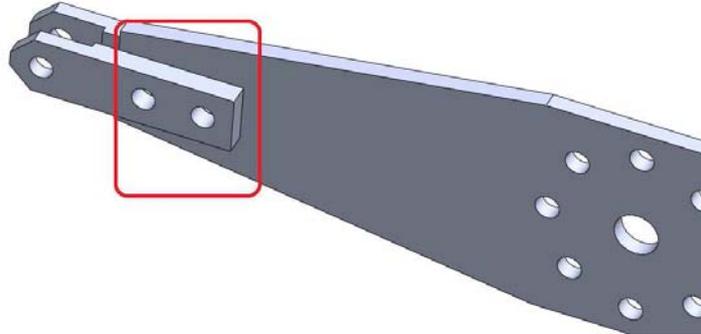


Figura 7.29 - Indicazione del collegamento analizzato.

Assunto l'utilizzo di viti M16 classe 8.8 si ha:

$$\text{Area resistente viti: } A_{resistente,b} = 157 \text{ mm}^2 \quad (7.203)$$

$$\text{Tensione di rottura vite: } f_t = 8 \cdot 100 = 800 \text{ MPa} \quad (7.204)$$

$$\text{Tensione di snervamento della vite: } f_y = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa} \quad (7.205)$$

$$\text{Resistenza di progetto della vite: } f_{k,n} = \min\{f_y; 0.7 \cdot f_t\} = 560 \text{ MPa} \quad (7.206)$$

La tensione di trazione ammissibile della vite è:

$$\sigma_{b,adm} = \frac{f_{k,n}}{1.5} = \frac{560}{1.5} = 373.33 \text{ MPa} \quad (7.207)$$

La tensione di taglio ammissibile della vite è:

$$\tau_{b,adm} = \frac{\sigma_{b,adm}}{\sqrt{2}} = \frac{373.33}{\sqrt{2}} \cong 264 \text{ MPa} \quad (7.208)$$

Il tiro da indurre serrando vite è:

$$N_s = 0.8 \cdot f_{k,n} \cdot A_{res,b} = 0.8 \cdot 560 \cdot 157 = 70336 \text{ N} \quad (7.209)$$

Il carico massimo trasmissibile per attrito, assunto un coefficiente di sicurezza pari a 1.25 e un coefficiente d'attrito tra superfici sgrassate in condizioni normali pari a 0.3, è:

$$V_{f,0} = \frac{N_s \cdot \mu}{\gamma_s} = \frac{70336 \cdot 0.3}{1.25} = 16880.64 \text{ N} \quad (7.210)$$

Dalla figura 7.12 si osserva che lo sforzo di taglio massimo sul bullone è:

$$V_{max} = 13625 \text{ N} \quad (7.211)$$

Perciò:

$$V_{f,0} > V \quad (7.212)$$

E la giunzione è verificata ad attrito.

In termini di verifica a taglio invece:

$$\tau_b = \frac{V_{max}}{A_{res,b}} = \frac{13625}{157} \cong 86.78 \text{ MPa} \quad (7.213)$$

Perciò:

$$\tau_b = 86.78 \text{ MPa} < \tau_{b,adm} = 264 \text{ MPa} \quad (7.214)$$

Anche quest'ultima risulta quindi soddisfatta.

Anche in questo caso valgono le stesse considerazioni svolte nel paragrafo 7.2.4.1 riguardo alla verifica a fatica delle viti.

7.2.4.3 - Calcolo della giunzione bullonata tra la prima interfaccia e la seconda

Si riporta un'immagine descrittiva della tipologia di bullonatura:

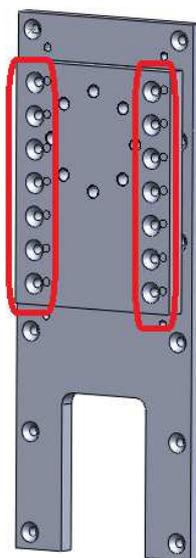


Figura 7.30 - Indicazione del collegamento analizzato.

Assunto l'utilizzo di viti M10 classe 8.8 si ha:

$$\text{Area resistente viti: } A_{resistente,b} = 58 \text{ mm}^2 \quad (7.215)$$

$$\text{Tensione di rottura vite: } f_t = 8 \cdot 100 = 800 \text{ MPa} \quad (7.216)$$

$$\text{Tensione di snervamento della vite: } f_y = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa} \quad (7.217)$$

$$\text{Resistenza di progetto della vite: } f_{k,n} = \min\{f_y; 0.7 \cdot f_t\} = 560 \text{ MPa} \quad (7.218)$$

La tensione di trazione ammissibile della vite è:

$$\sigma_{b,adm} = \frac{f_{k,n}}{1.5} = \frac{560}{1.5} = 373.33 \text{ MPa} \quad (7.219)$$

La tensione di taglio ammissibile della vite è:

$$\tau_{b,adm} = \frac{\sigma_{b,adm}}{\sqrt{2}} = \frac{373.33}{\sqrt{2}} \cong 264 \text{ MPa} \quad (7.220)$$

Il tiro da indurre serrando vite è:

$$N_s = 0.8 \cdot f_{k,n} \cdot A_{res,b} = 0.8 \cdot 560 \cdot 58 = 25984 \text{ N} \quad (7.221)$$

Il carico massimo trasmissibile per attrito, assunto un coefficiente di sicurezza pari a 1.25 e un coefficiente d'attrito tra superfici sgrassate in condizioni normali pari a 0.3, è:

$$V_{f,0} = \frac{N_s \cdot \mu}{\gamma_s} = \frac{25984 \cdot 0.3}{1.25} = 6236.2 \text{ N} \quad (7.222)$$

Di seguito si riporta il layout proposto per la bullonatura:

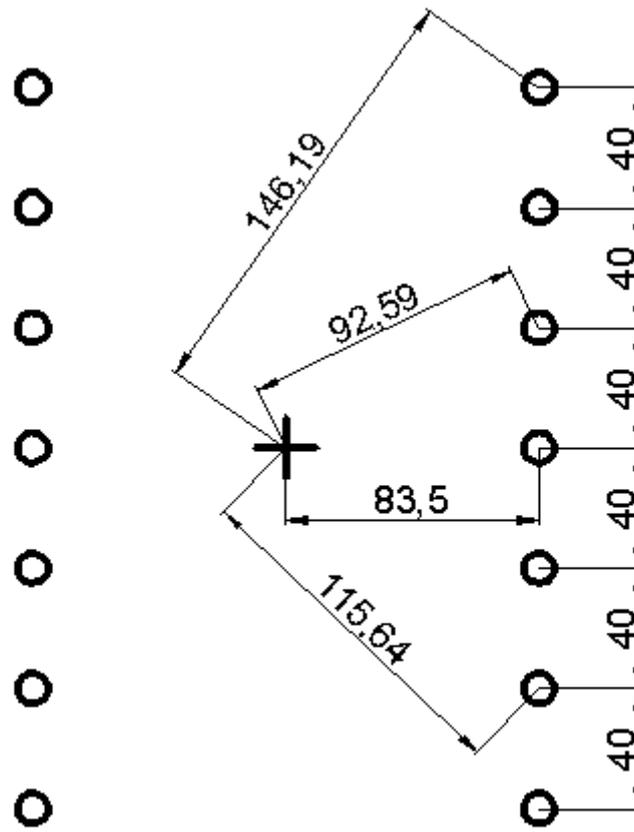


Figura 7.31 - Layout della bullonatura ideato.

In questo caso la giunzione bullonata deve resistere allo sforzo torcente applicato. Si suppone che il momento torcente si ripartisca sui bulloni con forze proporzionali alla distanza degli stessi dal baricentro della bullonatura e orientate in direzione ortogonale a quella della congiungente tra il baricentro stesso e l'asse del bullone; questa ipotesi corrisponde ad assumere che le piastre siano infinitamente rigide e i bulloni perfettamente elastici.

Sotto queste assunzioni si ricava che il coefficiente di ripartizione è:

$$K = \frac{M_{t,max}}{n_s \cdot (\sum_{i=1}^n d_i^2)} \quad (7.223)$$

Dove $M_{t,max}$ è il momento torcente massimo agente, n_s è il numero di sezioni resistenti dell'unione, n è il numero di bulloni e d_i è la distanza dell' i -esimo bullone rispetto al baricentro dell'unione.

$$K = \frac{M_{t,max}}{n_s \cdot (\sum_{i=1}^n d_i^2)} = \frac{7900000}{1 \cdot (2 \cdot 83.5^2 + 4 \cdot 92.59^2 + 4 \cdot 115.64^2 + 4 \cdot 146.19^2)} = 42.19 \frac{N}{mm} \quad (7.224)$$

Lo sforzo massimo di taglio sul bullone più lontano dal baricentro dell'unione è perciò:

$$V_{max} = K \cdot d_{i,max} = 42.19 \cdot 146.19 = 6167.8 N \quad (7.225)$$

Perciò:

$$V_{f,0} = 6236.2 N > V_{max} = 6167.8 N \quad (7.226)$$

E la giunzione è verificata ad attrito.

In termini di verifica a taglio invece:

$$\tau_b = \frac{V_{max}}{A_{res,b}} = \frac{6167.8}{58} \cong 106.34 MPa \quad (7.227)$$

Perciò:

$$\tau_b = 106.34 MPa < \tau_{b,adm} = 264 MPa \quad (7.228)$$

Anche quest'ultima risulta quindi soddisfatta.

Anche in questo caso valgono le stesse considerazioni svolte nel paragrafo 7.2.4.1 riguardo alla verifica a fatica delle viti.

7.2.4.4 - Calcolo della giunzione bullonata tra seconda interfaccia e la colonna

La seconda interfaccia è già stata realizzata per prove precedenti e viene riutilizzata nel caso in esame; il layout della stessa è perciò fissato.

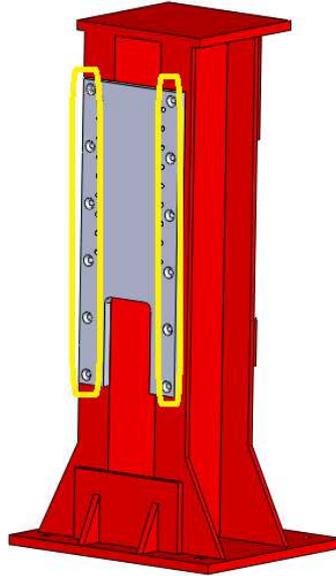


Figura 7.32 - Indicazione del collegamento analizzato.

Si utilizzano viti M10 classe 8.8:

$$\text{Area resistente viti: } A_{resistente,b} = 58 \text{ mm}^2 \quad (7.229)$$

$$\text{Tensione di rottura vite: } f_t = 8 \cdot 100 = 800 \text{ MPa} \quad (7.230)$$

$$\text{Tensione di snervamento della vite: } f_y = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa} \quad (7.231)$$

$$\text{Resistenza di progetto della vite: } f_{k,n} = \min\{f_y; 0.7 \cdot f_t\} = 560 \text{ MPa} \quad (7.232)$$

La tensione di trazione ammissibile della vite è:

$$\sigma_{b,adm} = \frac{f_{k,n}}{1.5} = \frac{560}{1.5} = 373.33 \text{ MPa} \quad (7.233)$$

La tensione di taglio ammissibile della vite è:

$$\tau_{b,adm} = \frac{\sigma_{b,adm}}{\sqrt{2}} = \frac{373.33}{\sqrt{2}} \cong 264 \text{ MPa} \quad (7.234)$$

Il tiro da indurre serrando vite è:

$$N_s = 0.8 \cdot f_{k,n} \cdot A_{res,b} = 0.8 \cdot 560 \cdot 58 = 25984 \text{ N} \quad (7.235)$$

Il carico massimo trasmissibile per attrito, assunto un coefficiente di sicurezza pari a 1.09 e un coefficiente d'attrito tra superfici sgrassate in condizioni normali pari a 0.3, è:

$$V_{f,0} = \frac{N_s \cdot \mu}{\gamma_s} = \frac{25984 \cdot 0.3}{1.09} = 7151.5 \text{ N} \quad (7.236)$$

Di seguito si riporta il layout della bullonatura; si noti che, per effettuare una valutazione in eccesso di sicurezza, sono stati trascurati i quattro bulloni inferiori che sono posizionati in una zona di alleggerimento dell'interfaccia.

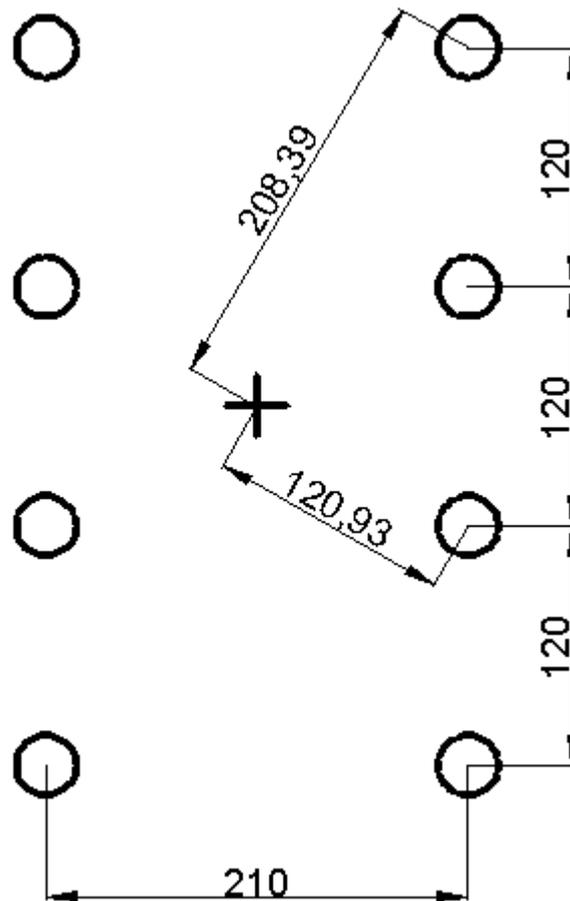


Figura 7.33 - Layout della bullonatura.

Anche in questo caso la giunzione bullonata deve resistere allo sforzo torcente applicato; sotto le ipotesi descritte nel sottoparagrafo precedente, dalla figura 7.33, si ricava che il coefficiente di ripartizione è:

$$K = \frac{M_{t,max}}{n_s \cdot (\sum_{i=1}^n d_i^2)} = \frac{7900000}{1 \cdot (4 \cdot 120,93^2 + 4 \cdot 208,39^2)} = 34,02 \frac{N}{mm} \quad (7.237)$$

Lo sforzo massimo di taglio sul bullone più lontano dal baricentro dell'unione è perciò:

$$V_{max} = K \cdot d_{i,max} = 34,02 \cdot 208,39 = 7089,9 N \quad (7.238)$$

Perciò:

$$V_{f,0} = 7151,5 N > V_{max} = 7089,9 N \quad (7.239)$$

E la giunzione è verificata ad attrito.

In termini di verifica a taglio invece:

$$\tau_b = \frac{V_{max}}{A_{res,b}} = \frac{7089.9}{58} \cong 122.24 \text{ MPa} \quad (7.240)$$

Perciò:

$$\tau_b = 122.24 \text{ MPa} < \tau_{b,adm} = 264 \text{ MPa} \quad (7.241)$$

Anche quest'ultima risulta quindi soddisfatta.

Ancora una volta valgono le stesse considerazioni svolte nel paragrafo 7.2.4.1 riguardo alla verifica a fatica delle viti.

7.3 - Utilizzo del software di controllo per l'esecuzione delle prove desiderate

Si riporta una breve sintesi delle modalità di utilizzo del software di controllo dei martinetti applicato alle prove svolte.

Dapprima si controllano:

- L'apertura della valvola dell'acqua di raffreddamento della pompa dell'olio;
- L'accensione del ventilatore all'interno del locale pompe;
- L'accensione della pompa dell'olio;
- L'accensione del server di comando degli attuatori;
- L'accensione del computer di controllo e comando.

Dal computer di controllo è necessario aprire lo "Station Manager", software fornito da MTS. All'apertura dello stesso viene richiesto di caricare un file di configurazione; nel caso in esame questo è nominato "DeMarchiAndrea.cfg" come si può vedere dalla figura successiva:

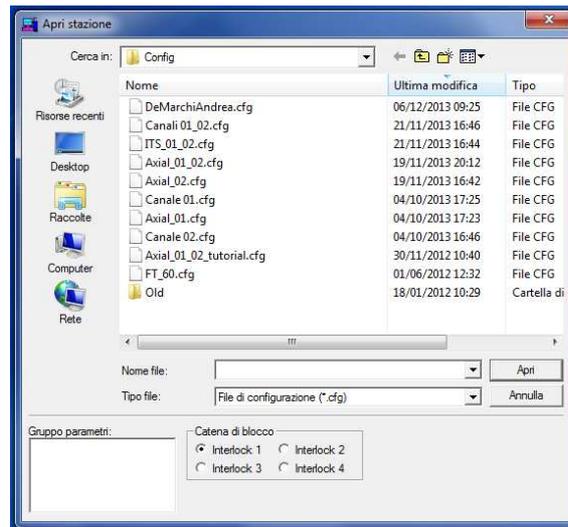


Figura 7.34 - Schermata d'accesso dello "Station Manager" di MTS.

L'impostazione del gruppo parametri rimane "default" poiché è l'unica presente.

Dopo aver selezionato la voce "Controllo esclusivo"



e aperto la finestra dei comandi manuali si procede in questo modo:

- Selezione di "Attiva comandi manuali";
- Selezione di controllo di spostamento per entrambi i martinetti; se questa operazione non viene svolta e il martinetto rimane in controllo di forza, c'è il rischio che alla messa in pressione dell'impianto i martinetti si muovano e impattino contro l'attrezzatura di prova.
- Eventuale rimozione di Interlock presenti e messa in pressione dell'impianto, dapprima selezionando "Bassa pressione" e infine "Alta pressione".

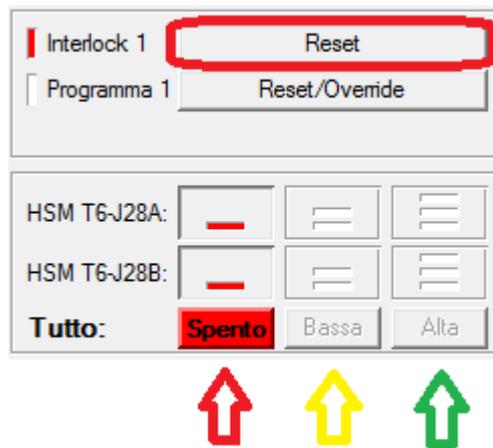


Figura 7.35 - Rimozione degli Interlock presenti e messa in pressione dei martinetti seguendo le frecce.

In questo modo entrambi i martinetti sono in pressione e possono essere comandati manualmente. Si spostano quindi gli stessi in modo tale da allineare i fori delle bielle con quelli delle piastrine, avendo cura di mantenere verticali le prime; analoga operazione è svolta quando si utilizza la configurazione ad uniball.

Inseriti quindi i perni e serrati i dadi la macchina è pronta all'utilizzo.

Prima di lanciare qualsiasi prova si deve però regolare il PID; per modificarlo si deve selezionare l'impostazione "Calibrazione" utilizzando la password "Calibration", come riportato nella figura 7.36:

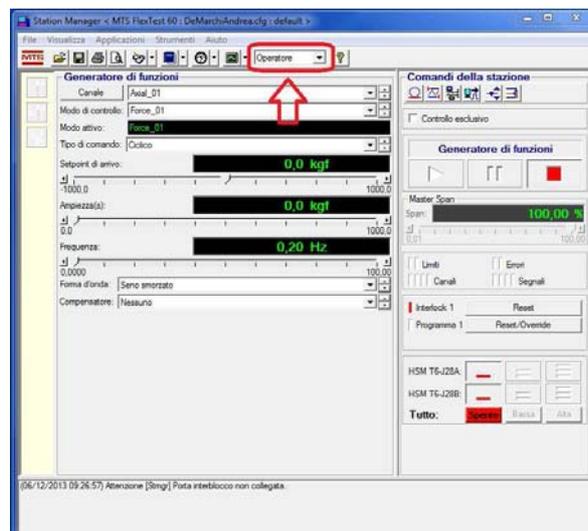


Figura 7.36 - Selezione della modalità "Calibrazione".

A questo punto è possibile regolare il PID secondo le esigenze dell'utente seguendo il percorso "Visualizza" e "Configurazione della stazione"; è necessario dapprima selezionare il canale corretto, posizionarsi quindi in "Tuning canale" e impostare i valori stabiliti.

Come si nota dalla figura successiva nel caso in esame sono stati modificati i parametri relativi ai canali 1 e 2 in controllo di forza, poiché tutte le prove sono avvenute in tale modalità; i valori inseriti sono stati tarati di prova in prova in base ai carichi applicati e alla frequenza imposta.

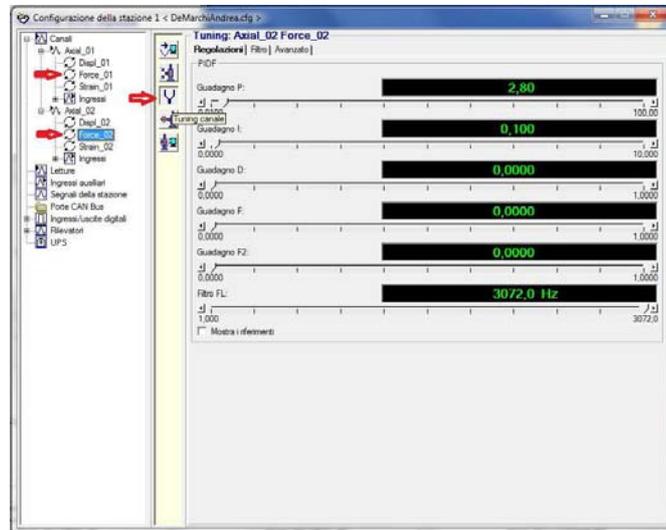


Figura 7.37 - Regolazione del PID.

Terminata la regolazione si ritorna alla schermata principale e:

- Si disattiva il comando manuale rimuovendo spunta dall'apposita casella;
- Si disattiva il controllo esclusivo rimuovendo la spunta dalla propria casella.

Si procede quindi riducendo ad icona lo "Station Manager" e eseguendo il secondo

software di controllo "MTS Multipurpose Elite".



Una volta avviato quest'ultimo si seleziona la cartella di lavoro aprendo "Preferenze" e "Configurazione"; a questo punto compare una schermata che consente di impostare la cartella di lavoro sulla quale saranno salvati i file della sessione.

Si faccia riferimento alla figura successiva:

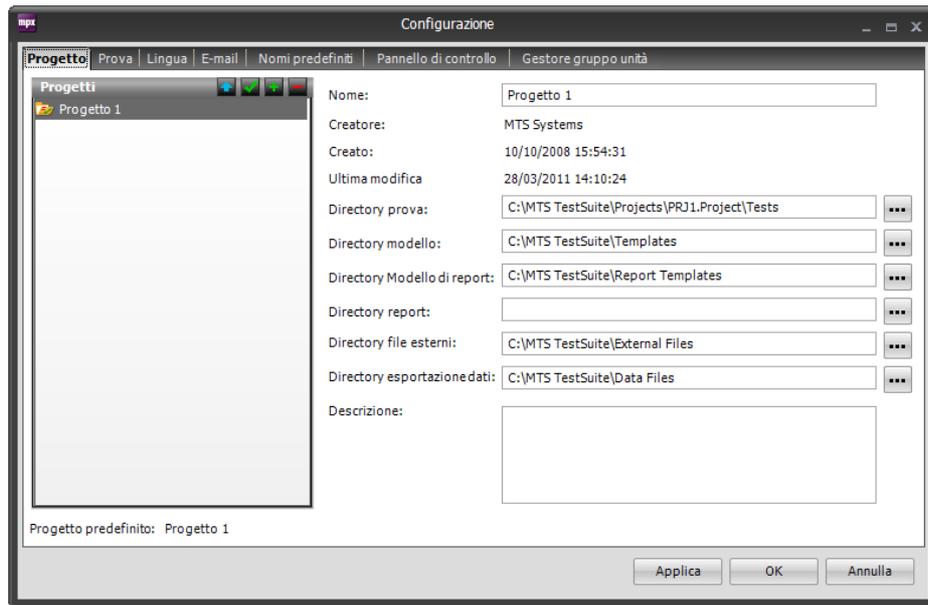


Figura 7.38 - Configurazione della directory di lavoro.

Si procede col comando "Apri prova":



Figura 7.39 - Comando d'apertura della prova.

Si seleziona quindi dall'elenco delle prove disponibili quella relativa all'analisi in esame; si consiglia di mantenere un solo file per ogni provino per avere successivamente la possibilità di recuperare tutti i dati di prova di un singolo provino direttamente da un unico elenco.

Aperta quindi una nuova prova si entra nella schermata "Procedura" cliccando sull'albero "Explorer" a sinistra e si imposta la procedura da seguire.

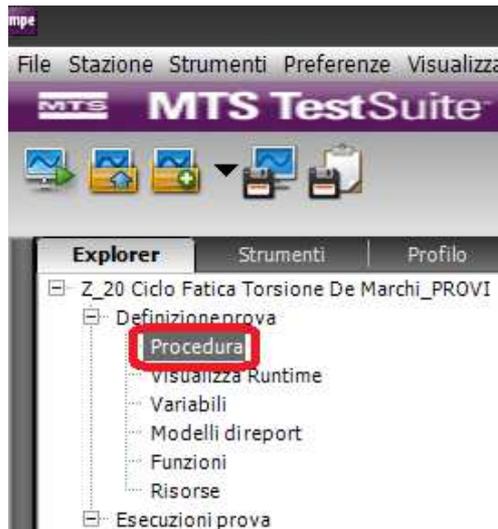


Figura 7.40 - Comando per aprire la procedura utilizzata.

Nel caso in esame si utilizza una procedura composta da un blocco d'ingresso, uno di ciclo e d'acquisizione, uno di definizione dei limiti e infine quelli di esportazione. Tutto ciò è riportato nella figura seguente:

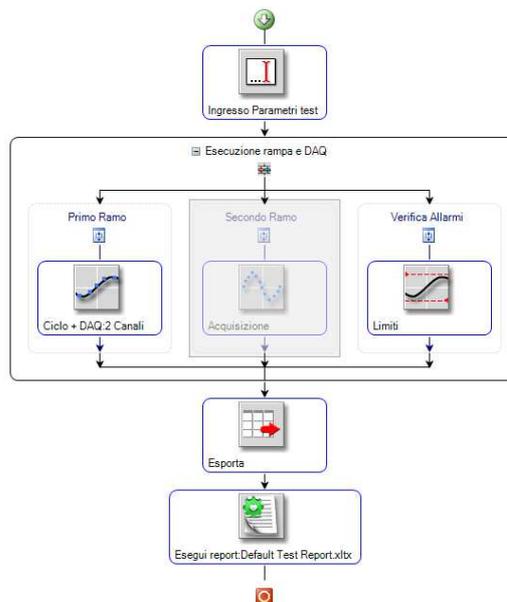


Figura 7.41 - Procedura utilizzata nello schema a blocchi del software.

Il blocco "Limiti" contiene l'assegnazione dei limiti di forza e spostamento; all'interno dello stesso sono state impostate una serie di variabili che contengono i limiti stessi e che non necessitano di essere inserite in questa sede, ma possono essere specificate all'interno della sezione "Variabili" oppure ad ogni esecuzione di una nuova prova. All'interno del blocco "Ciclo+DAQ: 2 canali" si seleziona il tipo di ciclo da svolgere (rampa triangolare, seno, seno con partenza graduale, ecc.) e il compensatore da utilizzare; nel caso in esame si

attiva il "PVC", denominato con la notazione "Controllo ampiezza picco-valle", che controlla per ogni ciclo il picco e la valle dell'onda letta tramite sensori e, se questi non corrispondono al segnale di comando, tende a correggerli attraverso la regolazione del sistema. Tutte le altre scelte all'interno del blocco di ciclo sono impostate come variabili e sono richieste ad ogni nuova esecuzione della prova (frequenza del ciclo, numero totale dei cicli, livelli massimi della variabile controllata, sfasamento tra i segnali dei due martinetti, ecc.) oppure devono essere specificate all'interno della sezione "Variabili". Si faccia riferimento alla figura successiva che descrive quanto appena elencato:

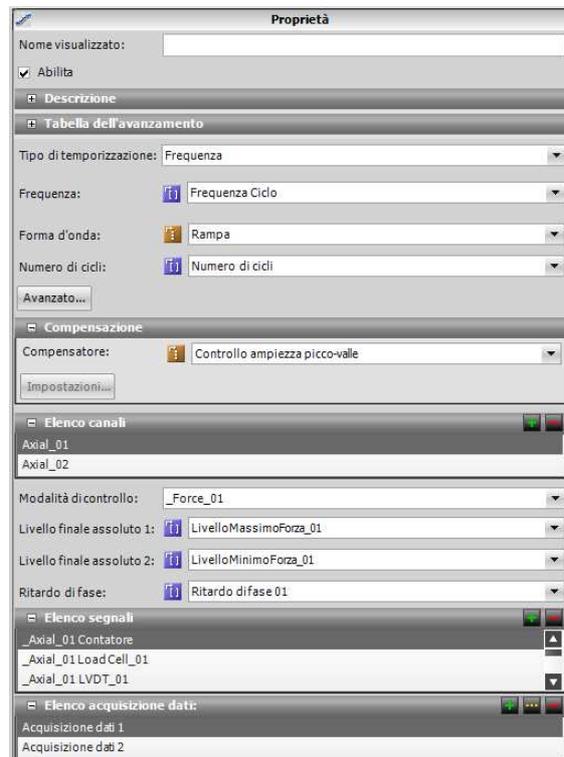


Figura 7.42 - Impostazioni all'interno del blocco "Ciclo+DAQ: 2 canali".

Sempre all'interno dello stesso blocco è necessario impostare l'acquisizione del segnale; dalla figura precedente si noti che sono presenti due elenchi d'acquisizione, il primo relativo all'acquisizione temporizzata dove il software acquisisce i dati con una certa frequenza, e il secondo relativo ai picchi/valli delle forme d'onda dove il software acquisisce solo quest'ultimi.

Cliccando dapprima su uno dei due e successivamente sull'icona con i tre pallini gialli si apre una schermata d'impostazione degli stessi dove è possibile, selezionando ancora i tre pallini gialli, impostare la frequenza di campionamento o altre opzioni (vedere figura successiva).

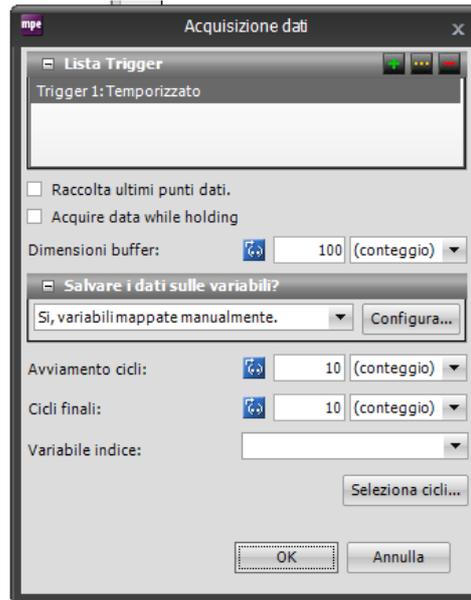


Figura 7.43 - Impostazioni dell'acquisizione.

Cliccando sul tasto "Seleziona cicli..." è possibile comunicare al software quando effettuare l'acquisizione. Si vuole infatti che il software acquisisca solamente per determinati cicli; in questo modo, nel caso temporizzato, si impone una certa frequenza d'acquisizione, ma il software acquisisce a quella frequenza solo nel caso in cui si trovi in uno dei cicli specificati.

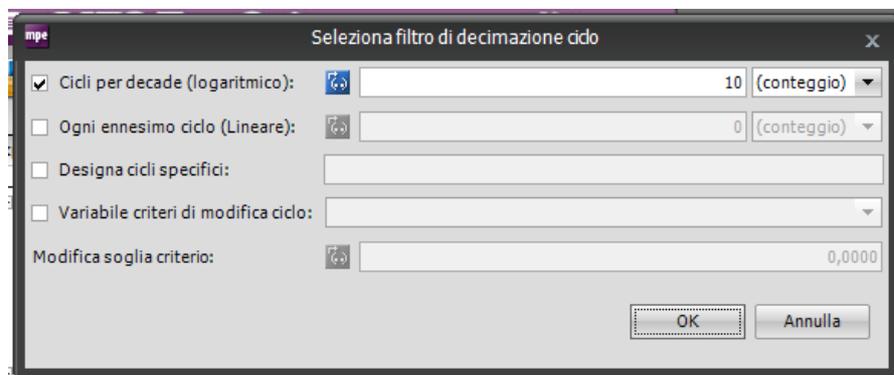


Figura 7.44 - Finestra "Seleziona cicli".

Impostando perciò il valore 10 in "Cicli per decade (logaritmico)" il software acquisisce solo per i seguenti cicli: [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 200 300]. Utilizzando quindi una tecnica di acquisizione logaritmica è possibile limitare notevolmente il numero di dati raccolti da elaborare dopo la prova; in caso di necessità tutti i dati rimangono comunque disponibili all'interno del singolo file Testsuite elite.

I successivi blocchi d'esportazione e di creazione del modello di report sono stati configurati in modo tale da salvare in formato testo i segnali acquisiti in una cartella predefinita e in formato Excel un rapporto totale della prova.

A questo punto si impostano le variabili da utilizzare di default nel ciclo all'interno della sezione "Variabili". Sono disponibili i limiti di forza e spostamento della prova, i livelli degli stessi parametri da utilizzare per l'esecuzione della prova, la frequenza e il numero di cicli totale; tutti questi sono segnalati con nomi esaustivi ed è sempre possibile modificarne il valore e l'unità di misura.

Nel caso in esame si impostano i limiti sia in forza che in spostamento; si inserisce quindi la frequenza, tarata di volta in volta in funzione del carico applicato, e il numero massimo di cicli pari a 2000000. Si specificano inoltre i livelli di forza massima e minima per entrambi i martinetti, imponendo in questo modo il livello $\Delta\tau$ alla quale il provino è sollecitato e il rapporto di ciclo R. Si noti inoltre che per l'esecuzione di una corretta prova in torsione è necessario impostare un ritardo di fase per il martinetto 1 pari a 0° e 180° per il martinetto 2 o viceversa.

Terminata la configurazione è possibile iniziare la prova stessa; è necessario dapprima salvare il file modificato e poi cliccare su "Nuova esecuzione prova":



Figura 7.45 - Comando "Nuova esecuzione prova".

Una volta fornito quest'ultimo comando è possibile modificare i limiti impostati di default all'interno del blocco "Variabili" attraverso la finestra:

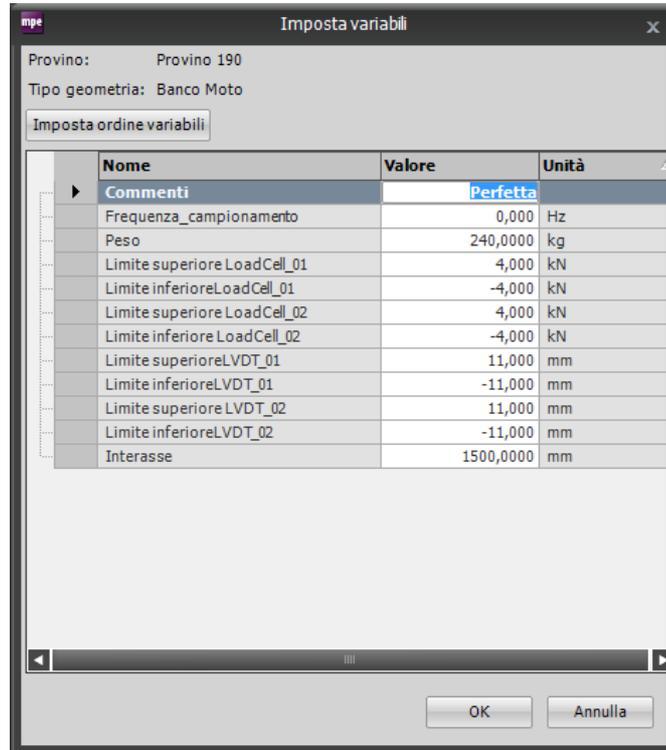


Figura 7.46 - Finestra di modifica dei limiti impostati di default.

Accettati i precedenti col tasto OK, si possono modificare i parametri di prova di default, impostati anch'essi all'interno della sezione "Variabili" di "Explorer":

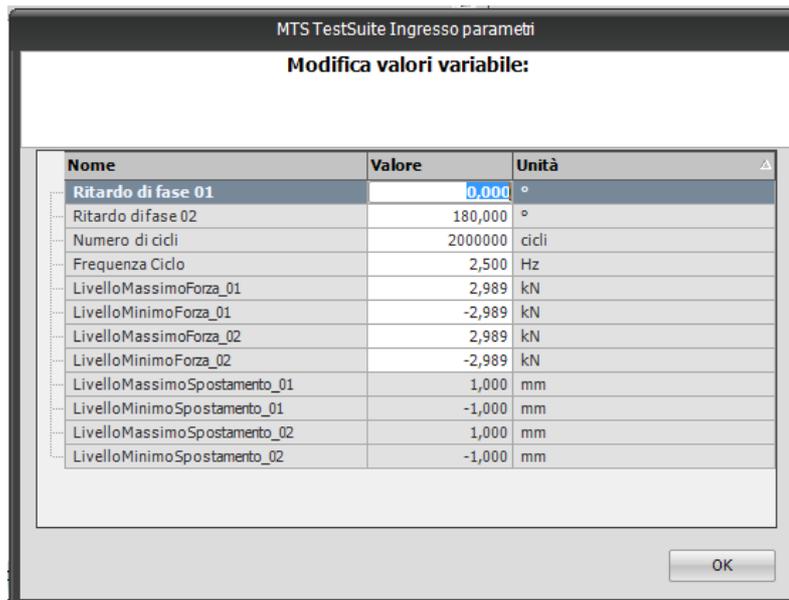


Figura 7.47 - Finestra di modifica dei parametri di prova impostati di default.

Terminata anche quest'ultima impostazione è possibile avviare la prova col tasto "Esegui":



Figura 7.48 - Pulsanti di comando della prova.

Nel caso in cui si volesse fermare la prova in esecuzione è possibile premere il tasto "Stop" bloccando la macchina; se si vuole interagire nuovamente col software è altresì necessario cliccare sul tasto "Arresta procedura" indicato con un lucchetto nell'immagine precedente.

Quando una prova viene arrestata manualmente il software non esporta i risultati sui file impostati nel blocco esportazione della sezione "Procedura", ma è necessario svolgere questa operazione manualmente cliccando sull'esecuzione della prova svolta col tasto destro e selezionando "Esportazione dati originali".

7.4 - Test della macchina di prova

Prima di procedere con le prove sperimentali è stato necessario assicurarsi del corretto funzionamento del banco prova; sono state quindi effettuate una serie di prove statiche volte a confermare che a delle determinate forze imposte ai martinetti corrisponda un $\Delta\tau$ coerente con quanto calcolato analiticamente. Si vuole inoltre osservare se il banco lavora effettivamente in pura torsione o se è presente un certo livello di flessione.

Per svolgere questo compito è stato necessario estensimetrare il provino; si è utilizzata una rosetta estensimetrica: HBM 1-RY81-1.5/120.

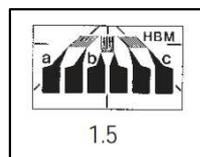


Figura 7.49 - Rosetta estensimetrica HBM 1-RY81-1.5/120.

Quest'ultima è una rosetta a tre estensimetri disposti a -45° 0° e $+45^\circ$, tutti con resistenza nominale di 120Ω ; la configurazione risulta quindi adatta per misurare il livello di torsione (-45° e $+45^\circ$) e flessione (0°). Si riportano di seguito i dati nominali di ogni estensimetro della rosetta:

- Resistenza: $120 \Omega \pm 0.3\%$;

- Fattore di taratura: *a)* $1.92 \pm 1.5\%$; *b)* $1.91 \pm 1.5\%$; *c)* $1.92 \pm 1.5\%$
- Sensibilità trasversale: *a)* 0.4%; *b)* 0.6%; *c)* 0.4%
- Coefficiente di temperatura del fattore di taratura (da -10°C a $+45^{\circ}\text{C}$): $104 \pm 10 \frac{10^{-6}}{\text{K}}$
- Sensibilità alla temperatura (acciaio) $\alpha = 10.8 \frac{10^{-6}}{\text{K}}$

Si noti inoltre che le tipologie di provino utilizzate, as-welded o stress relieved, presentano una superficie esterna grezza nel primo caso o sabbiata nel secondo; è stato perciò necessario eseguire una lavorazione di tornitura fine in modo tale da preparare la superficie all'applicazione della rosetta.

Si è utilizzata una carta abrasiva molto fine sulla zona d'incollaggio e si è eseguita la tracciatura dei segni d'allineamento con banchi di riscontro appositi; si è quindi eseguito il posizionamento della rosetta con del nastro trasparente in modo tale da far combaciare i segni tracciati con quelli di riferimento. Si è applicata la colla e si è tenuta premuta la rosetta in modo il più possibile uniforme avvalendosi di un foglietto di teflon.

Si è quindi rimosso il nastro trasparente, ripulita la zona della rosetta dalla colla in eccesso e misurata la resistenza dei tre estensimetri tramite tester; dopodiché è stata applicata la basetta seguendo la stessa procedura appena illustrata, a meno della parte di tracciatura e allineamento.

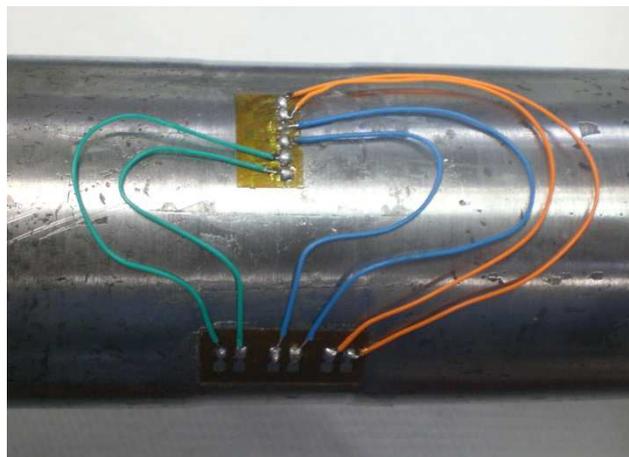


Figura 7.50 - Rosetta e basetta montate e collegate tra loro.

Si sono eseguiti i collegamenti tra l'estensimetro e la basetta mediante uno stagnatore e del filo di stagno; terminata questa fase si sono nuovamente controllate le resistenze ai capi della basetta e l'assenza di corti tra i capi stessi e il corpo del provino. Sono stati quindi collegati una serie di cavi alle estremità libere della basetta, di una lunghezza tale da rendere agevole il collegamento all'acquisitore IMC-CRONOS PL2. Si è inoltre deciso di collegare ogni estensimetro a quarto di ponte agendo sulle apposite prese dell'acquisitore; ancora una volta sono state verificate tutte le resistenze ai capi dei fili e l'assenza di corti. Il quarto di ponte è ottenuto collegando i capi dei fili alle prese dell'acquisitore secondo le seguenti modalità:

- Un'estremità dell'estensimetro è collegata all'ingresso +VBx, dove con x si denota lo slot 1 o 2 in funzione dall'estensimetro al quale si fa riferimento poiché ogni interfaccia permette di collegare due estensimetri a quarto di ponte (filo giallo in figura 7.51);
- L'altra estremità, dalla quale dipartono due fili differenti, viene collegata sia all'ingresso +INx (filo bianco spesso in figura 7.51) sia a Ix_1/4Bx (filo verde in figura 7.51);
- Si deve inoltre collegare l'ingresso +INx (filo bianco sottile in figura 7.51) con -SENSEx (filo bianco sottile in figura 7.51).

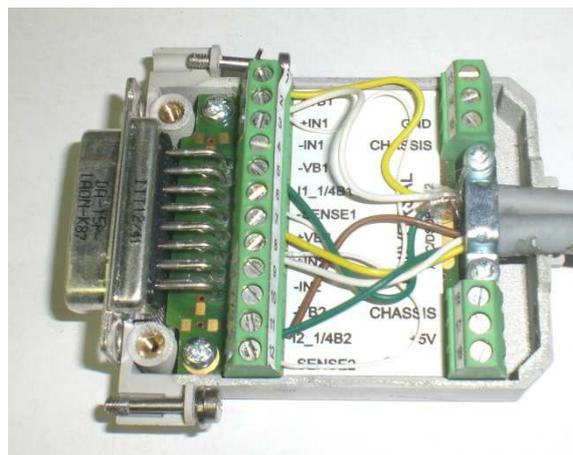


Figura 7.51 - Interfaccia di collegamento alla centralina; si è scelto di utilizzare collegamenti ad un quarto di ponte per ogni estensimetro. Il caso in figura si riferisce al collegamento di due estensimetri sulla stessa interfaccia.

Eseguito quindi il collegamento a quarto di ponte per ogni estensimetro della rosetta, si ha:

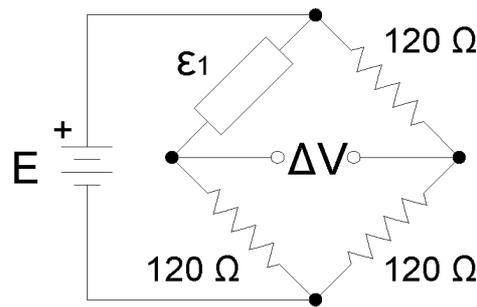


Figura 7.52 - Collegamento a quarto di ponte.

In questo caso quindi l'unico estensimetro collegato al ponte di Wheatstone è l' ε_1 , mentre le altre resistenze sono interne alla centralina e hanno resistenza pari a quella dell'estensimetro stesso in configurazione di riposo.

Si ricorda che la misura fornita dall'estensimetro è legata alla variazione di resistenza elettrica che un conduttore metallico subisce durante la propria deformazione; senza ripercorrere tutti i passaggi analitici, si noti che la misura dello sbilanciamento del ponte è, in generale, legata alla misura di deformazione dalla:

$$\frac{\Delta V_m}{E} \cong \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (7.242)$$

Ma nel caso di collegamento a quarto di ponte si ha:

$$\frac{\Delta V_m}{E} \cong \frac{K}{4} \varepsilon_1 \quad (7.243)$$

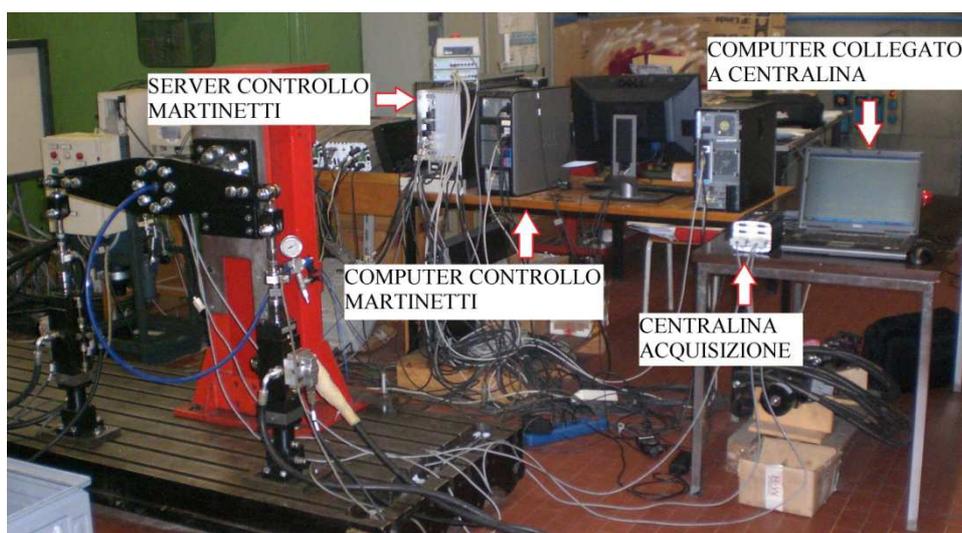


Figura 7.53 - Configurazione banco per le acquisizioni.

Dopo la procedura di incollaggio e collegamento si è passati al software di controllo della centralina IMC-CRONOS PL2; in riferimento a quanto descritto in [19] si sono eseguiti i seguenti passi nel software stesso:

- Impostati i canali da 1 a 3, cioè quelli ai quali si sono collegati fisicamente gli estensimetri mediante interfaccia, come attivi;
- Impostati i canali da 4 a 8 come inattivi;
- Impostata una durata dell'acquisizione indefinita con un campionamento ogni 100 ms;
- Selezione del collegamento a quarto di ponte per tutti e tre gli estensimetri e impostazione della resistenza nominale pari a 120Ω ;
- Inserimento dei corretti fattori di taratura per ogni estensimetro, già riportati in precedenza;
- Imposizione di un ingresso a 5V, unità d'output in μeps , e range d'input di 4200 μeps ;
- Impostazione delle directory di salvataggio interne alla centralina;
- Bilanciamento del ponte nel momento in cui le forze applicate dai martinetti al provino sono nulle.

Si è quindi proceduto con l'acquisizione; la prova consiste nell'applicazione in modo statico dei seguenti carichi:

Forza applicata al cilindro 1 [kg]	Forza applicata al cilindro 2 [kg]
0	0
95	-95
190	-190
95	-95
0	0
-95	95
-190	190
-95	95
0	0

Tabella 7.3: Ciclo di carico/scarico statico utilizzato per la verifica del funzionamento della macchina.

Applicate quindi le forze riportate in tabella in modo statico, lasciando almeno 10 secondi per la stabilizzazione del segnale dell'estensimetro, si sono analizzati i risultati raccolti mediante l'acquisizione; si noti che in controllo manuale è possibile muovere un solo martinetto per volta, perciò partendo da una configurazione indisturbata e muovendo il primo martinetto il componente sarà sollecitato a flessione-torsione e solo successivamente, spostando anche il secondo, a torsione pura.

Di seguito si riportano le denominazioni degli estensimetri e i segnali ottenuti.

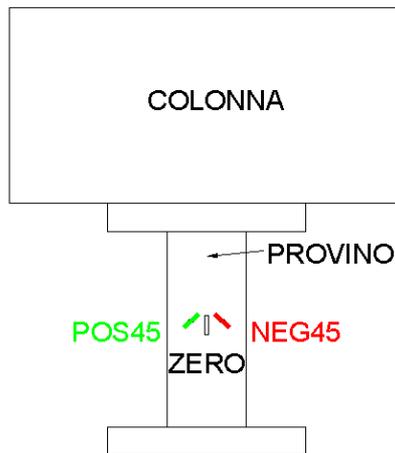


Figura 7.54 - Layout e denominazione degli estensimetri della rosetta.



Figura 7.55 - Risultati ottenuti dagli estensimetri per la prova di carico di tabella 7.3.

La prima verifica consta nel monitorare tutti i segnali nel caso in cui la forza applicata da entrambi i martinetti sia nulla; ci si aspetta infatti che anche i segnali letti dagli estensimetri siano molto bassi. Nei risultati si osserva che i valori misurati quando la macchina non agisce sul provino (nella parte all'estrema sinistra della figura 7.55) sono dell'ordine dei $10^{-1}\mu\text{eps}$; si può quindi affermare che a una forza nulla sui martinetti è accoppiata una deformazione nulla del provino, come atteso.

Effettuando il ciclo di carico/scarico si osserva in figura 7.55 che le curve relative agli estensimetri POS45 e NEG45 non convergono agli stessi valori cambiati di segno nelle zone stazionarie; questo, poiché si sta applicando una sollecitazione di torsione e i due estensimetri citati sono disposti a $+45^\circ$ e -45° rispetto all'asse del provino, è un sintomo di una problematica nella misurazione. Mantenendo scarica la macchina e sollecitando manualmente con piccole pressioni i singoli estensimetri si è notato che solamente il POS45, dopo aver segnalato la pressione manuale con un'impennata dei valori diagrammati in termini di μeps , non ritorna al valore iniziale pari a 0, ma rimane a valori maggiori e che cambiano di volta in volta. Questo, unito all'osservazione accurata delle condizioni della rosetta in prova, ha confermato che l'estensimetro POS45 ha subito un lieve distacco dalla superficie del provino, probabilmente a causa di un incollaggio non corretto; gli altri due estensimetri invece risultano ben incollati e si comportano coerentemente con quanto atteso, perciò si terranno in conto solo in risultati ottenuti da quest'ultimi.

Dall'estensimetro ZERO (figura 7.55) si osserva che i segnali sono non nulli solamente quando sta agendo un singolo martinetto e si deve ancora impartire il comando manuale al secondo; si nota perciò che il segnale assume valori diversi da zero solo quando il provino è sollecitato a flessione-torsione, coerentemente con quanto atteso. In tutti gli altri istanti in cui si sta applicando una torsione pura il segnale massimo ottenuto dall'estensimetro è dell'ordine dei $10\mu\text{eps}$ che, se confrontato con i valori corrispondenti ottenuti per il NEG45 di circa $400\mu\text{eps}$, risulta trascurabile. Si conferma quindi l'assenza di una sensibile sollecitazione di flessione quando la macchina sollecita nominalmente il provino in torsione.

Per analizzare se la tensione applicata al provino è coerente con quella attesa, sono stati prelevati i valori dei segnali assunti dall'estensimetro NEG45 nelle zone in cui vige la torsione pura e riportati nella seguente tabella:

Segnale estensimetro NEG45 [μeps]	
	0.25
	195.32
	392.94
	198.77
	0.25
	-195.58
	-392.89
	-197.61
	0.25

Tabella 7.4: Segnale dell'estensimetro NEG45 nelle zone stazionarie di pura torsione della prova.

Ricordando che:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (7.244)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (7.245)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (7.246)$$

Poiché il cerchio di Mohr nel caso di torsione è:

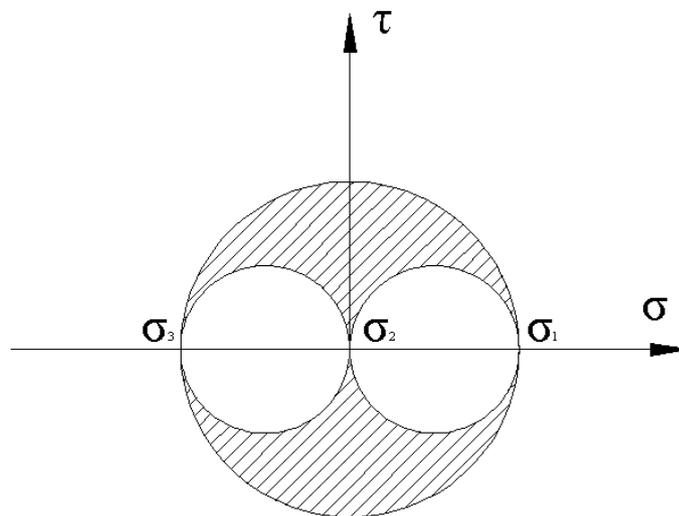


Figura 7.56 - Cerchio di Mohr nel caso di torsione.

Si osserva che la σ_2 , cioè quella relativa alla direzione radiale, è sempre nulla; si ottiene perciò, dopo alcuni passaggi:

$$\sigma_1 = \frac{E \cdot \varepsilon_1 + \nu \cdot E \cdot \varepsilon_3}{1 - \nu^2} \quad (7.247)$$

$$\sigma_3 = \frac{E \cdot \varepsilon_3 + \nu \cdot E \cdot \varepsilon_1}{1 - \nu^2} \quad (7.248)$$

E inoltre:

$$\varepsilon_2 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (7.249)$$

Grazie alle (7.247) e (7.248) è possibile perciò ricavare le tensioni principali applicate al provino che, dal cerchio di Mohr in torsione (figura 7.56), si nota sono uguali alla tensione tangenziale che lo sollecita.

In seguito si denota come tensione tangenziale nominale la:

$$\tau_{nom} = \frac{2 \cdot F_{kg} \cdot 9.81 \cdot b}{W_t} \quad (7.250)$$

Dove F_{kg} è il modulo della forza applicata al singolo martinetto espresso in [kg], b è il braccio della macchina espresso in [mm] e pari a 395 mm, W_t è il modulo di resistenza a torsione espresso in [mm³].

Misurando accuratamente le dimensioni del provino si è inoltre osservato che:

- Il diametro esterno d_e è pari a 51 mm nel tratto calibrato per l'applicazione della rosetta;
- Il diametro interno d_i , misurato dopo aver tagliato il provino, è pari a 30.4 mm.

Si ricava perciò:

$$W_t = \frac{\pi \cdot d_e^3}{16} \left(1 - \left(\frac{d_i}{d_e} \right)^4 \right) = \frac{\pi \cdot 51^3}{16} \left(1 - \left(\frac{30.4}{51} \right)^4 \right) = 22757.8 \text{ mm}^3 \quad (7.251)$$

Ribaltando il segnale acquisito dall'estensimetro NEG45 anche nel POS45 per i motivi già elencati si ottiene quindi:

$F_{kg,1}$ [kg]	$F_{kg,2}$ [kg]	τ_{nom} [MPa]	$\sigma_3 = -\sigma_1 = \tau_{est}$ [MPa]	$\Delta = \frac{ \tau_{est} - \tau_{nom} }{\tau_{nom}}$ [%]
0	0	0	0.040	/
95	-95	32.4	31.552	2.618
190	-190	64.7	63.475	1.893
95	-95	32.4	32.109	0.898
0	0	0	0.040	/
-95	95	-32.4	-31.594	-2.489
-190	190	-64.7	-63.467	-1.906
-95	95	-32.4	-31.922	-1.476
0	0	0	0.040	/

Tabella 7.5: Elaborazione dei risultati ottenuti; $F_{kg,1}$ è la forza applicata al martinetto 1 in kg, τ_{nom} è la tensione tangenziale nominalmente applicata da (7.250), σ_1 e σ_3 sono le tensioni principali ricavate dai segnali degli estensimetri tramite le (7.247) e (7.248).

Come si osserva dalla tabella precedente gli scostamenti percentuali tra la τ_{nom} calcolata analiticamente e la τ_{est} ottenuta elaborando i segnali degli estensimetri sono esigui; si ritiene perciò che la macchina funzioni correttamente, applicando il livello di tensione designato e senza indurre significativi sforzi di flessione.

7.5 - Circuito pneumatico per la valutazione dell'innescò della cricca

Di seguito si descrive lo studio dell'impianto pneumatico ed elettrico utilizzati al fine di valutare l'innescò della cricca sul provino e non solo la rottura dello stesso.

La macchina di prova è impostata per fermarsi quando la rigidità del provino cala bruscamente; quest'eventualità però è soddisfatta solo nei casi in cui la cricca ha propagato su gran parte della sezione del provino, ma non permette di valutare quando quest'ultima ha iniziato a formarsi. Si è quindi pensata una modalità di valutazione del momento d'innescò della cricca, cioè quello per il quale essa diventa passante dall'interno all'esterno del tubo ma quest'ultimo non ha ancora perso di rigidità; si è puntato nell'evitare l'utilizzo dei liquidi penetranti poiché la macchina continua le prove anche in orario notturno senza la supervisione di un operatore.

Si è quindi deciso di mantenere in pressione l'interno del provino e si è cercato un modo per monitorare il calo della stessa, indice del passaggio della cricca attraverso la sezione resistente. Tale scopo è stato raggiunto mediante l'ausilio di un pressostato collegato ad un

contaore elettrico; si è quindi impostato il pressostato in modo tale che il contatto al suo interno sia chiuso quando la pressione supera una certa soglia limite, scelta pari a 4 bar. Il pressostato è stato collegato elettricamente al contaore ed alimentato a 12 V tramite un trasformatore collegato alla rete elettrica; finché la pressione rimane superiore alla soglia imposta, e quindi il contatto elettrico del pressostato è chiuso, il contaore è alimentato da una sorgente esterna e procede col conteggio, mentre non appena la pressione cala il pressostato apre il contatto elettrico, la sorgente cessa di arrivare al contaore e quest'ultimo si ferma.

Si elenca il materiale utilizzato allo scopo:

- Raccorderia, tubazioni flessibili e innesti rapidi pneumatici;
- Manometro con portata 10 bar;
- Pressostato FOX K3 con campo di regolazione da 1 a 10 bar e possibilità di scelta tra contatti NA o NC;
- Trasformatore elettrico a 12V;
- Contaore Kübler CODIX 135.

Si descrive di seguito l'impianto elettrico adottato:

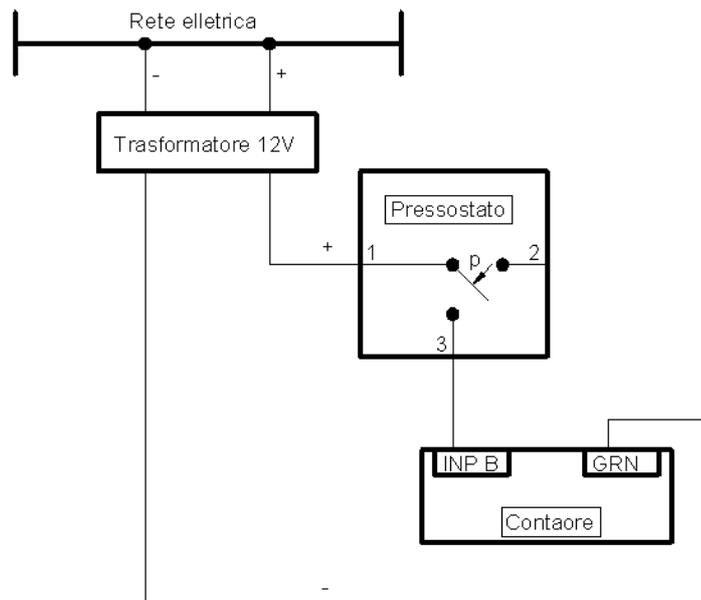


Figura 7.57 - Impianto elettrico del sistema studiato.

Come si nota nella figura 7.57, dove con la lettera "p" si è indicata la pressione interna al provino, quando essa supera la soglia imposta, regolabile tramite una vite esterna, il contatto 3 viene messo in comunicazione con l'1 e rimane in quella posizione finché vige una pressione maggiore al limite imposto. Quando la pressione scende sotto al limite suddetto il contatto 1-3 si apre e viene chiuso l'1-2, fermando il segnale elettrico portato al contaore.

Alla partenza di ogni prova è stato quindi messo in pressione internamente il provino e resettato il contaore; finché il provino risulta integro la pressione si mantiene costante intorno agli 8 bar e il pressostato rimane chiuso alimentando in questo modo il contaore che procede col conteggio. Non appena la cricca diventa passante l'aria in pressione interna al provino tende ad uscire in tempi ridotti; quando la pressione interna scende al di sotto della soglia dei 4 bar il pressostato apre il contatto elettrico interno e smette di alimentare il contaore che, in questo modo, interrompe il conteggio. Grazie al conteggio eseguito dal contaore e alla conoscenza della frequenza di prova è quindi possibile calcolare il numero di cicli d'innesco oltre a quello di rottura.

Si riporta di seguito un'immagine relativa all'impianto sopra descritto.

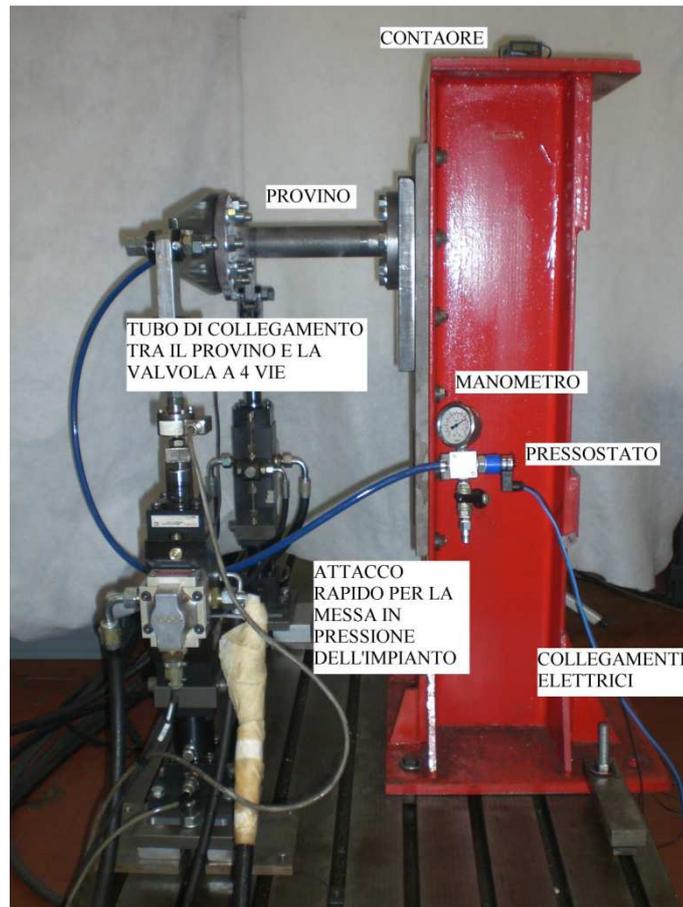


Figura 7.58 - Impianto collegato alla macchina.

7.6 - Risultati ottenuti dalle prove sperimentali

Si riportano di seguito i risultati ricavati dalle prove sperimentali effettuate. Si osservi che a causa delle problematiche legate ai martinetti a disposizione, già descritte in precedenza, è stato necessario limitare notevolmente la frequenza di prova per il rapporto di ciclo $R=-1$; il caso $R=0.1$ non risente di questa difficoltà poiché il carico sul singolo martinetto mantiene sempre lo stesso segno. Questo, unito ad alcune problematiche correlate al software utilizzato che tende a bloccarsi in modo improvviso e alla scarsa quantità di tempo disponibile, ha contribuito all'esigua quantità di risultati.

Si sono di seguito riassunte tutte le informazioni sperimentali in un unico grafico nel quale si riporta il range di tensione tangenziale in funzione del numero di cicli d'innescio o rottura; sono state anche diagrammate le curve di resistenza prestabilite dall'Eurocodice3 per un confronto.

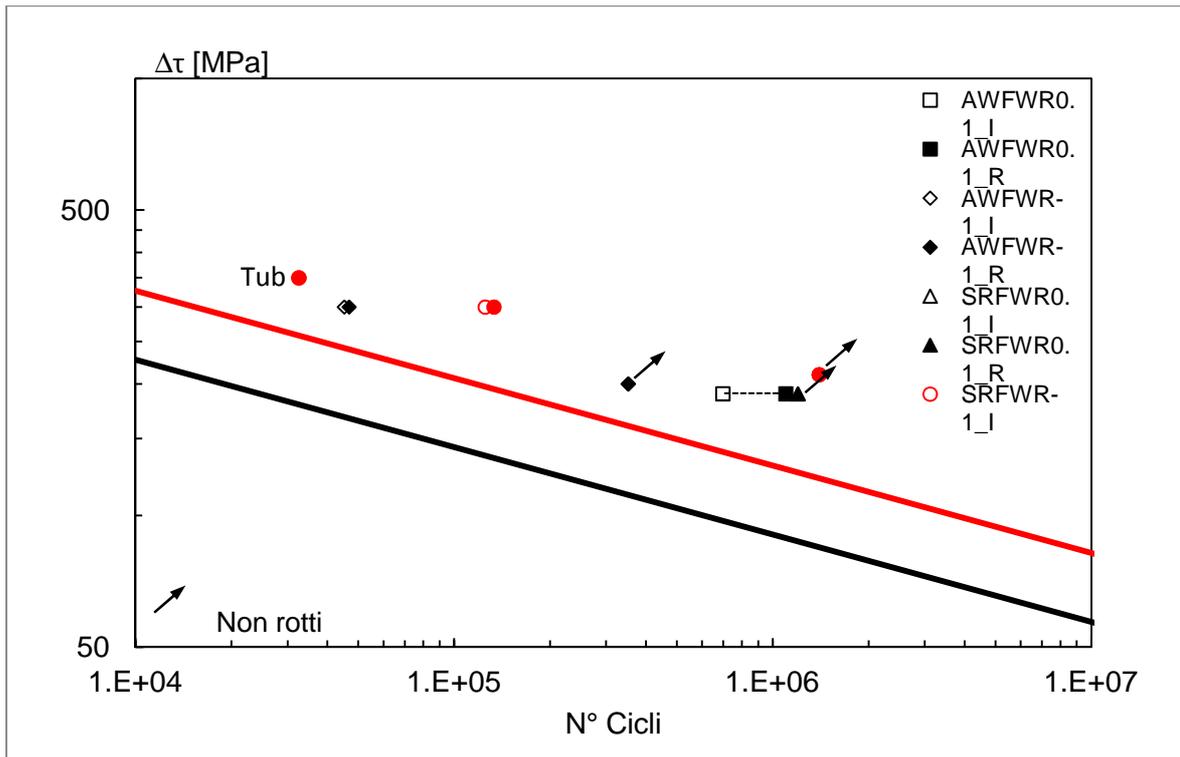


Figura 7.59 - Provini testati sperimentalmente e curve di resistenza da Eurocodice3. I punti non riempiti (indicati con **_I** in legenda) si riferiscono al valore del numero di cicli d'innesco della cricca, mentre quelli pieni (indicati con **_R** in legenda) a quello di rottura del giunto.

Nella precedente figura sono state riportate più curve relative alla resistenza a fatica, tutte ricavate dall'Eurocodice3; quella nera è la prestabilita per la progettazione di giunti saldati as-welded a cordoni d'angolo sollecitati da tensioni tangenziali. La normativa prescrive però che, nel caso in cui si sia effettuato un trattamento termico di distensione sul giunto saldato, per la progettazione a fatica si deve ridurre il range di tensione effettiva totale considerando il $\Delta\tau$ completo positivo e solo il 60% di quello negativo. Nel caso in esame, non potendo ridurre il livello di $\Delta\tau$ nominale dei punti sperimentali, è stato necessario traslare verso l'alto la curva di resistenza a fatica di una quantità ricavata seguendo l'approccio descritto; quest'ultima cambia da punto a punto in funzione del livello di $\Delta\tau$ di sollecitazione, ma in figura 7.59 si è riportata una unica curva (in rosso) ottenuta mediando i valori delle tre che si ricavano per i tre punti segnalati in rosso.

Riassumendo si ha:

- Tutti i giunti as-welded e quelli stress relieved per i quali si ha $R \geq 0$ devono essere riferiti alla curva di resistenza a fatica nera di figura 7.59, cioè quella standard riportata nell'Eurocodice3.

- I giunti stress relieved sollecitati con un $R < 0$ devono invece essere comparati alla curva media di resistenza a fatica indicata in rosso in figura 7.59.

Si osserva perciò che la curva di resistenza a fatica standard fornita dall'Eurocodice3 risulta, come atteso, cautelativa rispetto ai dati sperimentali ricavati; anche traslando verso l'alto la stessa per i giunti stress relieved sollecitati a $R < 0$ si nota che i punti relativi risultano ancora una volta in vantaggio di sicurezza rispetto ai valori imposti dalla normativa.

7.7 - Conclusioni del capitolo

In questo capitolo si è progettato e realizzato un layout di una macchina di prova a fatica per giunti saldati sollecitati a torsione; ogni componente della macchina è stato verificato staticamente e a fatica.

È stata descritta la procedura di utilizzo del software MTS Testsuite Elite per l'esecuzione di prove in torsione movimentando i martinetti in controfase; si è inoltre testata la macchina di prova mediante estensimetrazione del provino ed esecuzione di test statici.

Si è proposta una metodologia per il controllo dell'innescò della cricca basata su semplici concetti pneumatici ed elettrici e si sono infine raccolti i risultati sperimentali ottenuti dalle prove.

Capitolo 8: CONCLUSIONI

Il presente lavoro, articolato in una parte numerica ed una sperimentale, tratta la fatica nei componenti saldati in acciaio soggetti a carichi di torsione pura. Si è studiata l'estensione del metodo PSM nel caso d'intaglio d'apertura compresa tra 0° e 135° sollecitato a modo III; è inoltre stato possibile definire un'alternativa funzionale del criterio di convergenza classico del metodo con lo scopo di riportarlo al corretto funzionamento in tutti i casi in cui, con la precedente definizione, falliva la stima della vita del componente. Si è progettato un banco prova a fatica per sollecitare a torsione dei componenti saldati e si sono eseguite una serie di prove sperimentali; si è inoltre studiato un sistema per la determinazione del numero di cicli ingegneristico d'innescò della cricca sfruttando semplici principi pneumatici ed elettrici.

Si possono quindi riassumere le seguenti conclusioni:

1. Il nuovo criterio di convergenza, ottenuto esprimendo K_{FE}^{***} in funzione di x^*/d , permette di riportare il metodo ad un funzionamento corretto in entrambi i casi di modo I e III; garantire un $x^*/d \geq 2$ permette di lavorare all'interno della banda di convergenza del metodo e di affermare quindi che il K_{FE}^{***} è costante.
2. Il PSM è stato calibrato, tramite l'utilizzo degli elementi PLANE25 con le opportune Key Options impostate (tabella 8.1), per gli intagli aperti con angoli d'apertura variabili compresi tra 0° e 135° e sollecitati a modo III.

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0	0	0	0	0	0

Tabella 8.1: Riassunto delle Key Options impostate per le analisi con l'elemento PLANE25; per ulteriori informazioni riguardo quest'ultime riferirsi alla guida in linea di Ansys®.

Si riporta di seguito quanto ricavato dalle analisi; i risultati sono validi se si soddisfa il criterio di convergenza del metodo descritto al punto precedente.

	K_{FE}^{***}	Ampiezza bande Δ
Mesh non controllata	1.85	$\pm 8.5\%$
Mesh controllata tramite areola free	1.91	$\pm 5.5\%$
Mesh controllata tramite areola mapped	1.91	$\pm 5\%$

Tabella 8.2: Risultati ricavati nel presente lavoro; per ulteriori informazioni riferirsi al capitolo 5.

Da ulteriori analisi è emerso che le linee guida redatte nel capitolo 5 per il modo III possono essere utilizzate con successo anche nei casi a modo I; risulta però necessario uno studio più approfondito per confermare questa affermazione.

3. Si è osservato il peggior comportamento del metodo quando si utilizzano gli elementi PLANE83, estensione parabolica dei precedenti.
4. Si conferma il corretto funzionamento della metodologia sviluppata per la determinazione del numero di cicli ingegneristico d'innescò della cricca, che consiste nel monitorare la pressione interna al provino mediante un pressostato e un contaore.
5. Si è osservato che tutti i risultati raccolti dalle prove sperimentali eseguite ricadono nella zona superiore delle curve di resistenza a fatica prescritte dall'Eurocodice3; si conferma pertanto che, assumendo le resistenze fornite da quest'ultimo, si opera in vantaggio di sicurezza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. A. Gross R., «Plane elastostatic analysis of V-notched plates» *Int. J. Fract. Mech.*, no. 8, pp. 267-327, 1972.
- [2] M. G., «The use of peak stresses for fatigue strength assessments of welded lap joints and cover plates with toe and root failures» *Engineering Fracture Mechanics*, n. 89, pp. 40-51, 2012.
- [3] W. M.L., «Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension» *J. Appl. Mech.*, n. 19, pp. 526-528, 1952.
- [4] M. G., «The peak stress method for fatigue strength assessment of tube-to-flange welded joints under torsion loading» *Weld world*, n. 57, pp. 265-275, 2013.
- [5] T. R. Lazzarin P., «A notch intensity factor approach to the stress analysis of welds» *Fatigue & Fracture of Engineering & Structures*, n. 21, pp. 1089-1103, 1998.
- [6] L. P. Lazzarin P., «Notch stress intensity factors and fatigue strength of aluminium and steel welded joints» *International Journal of Fatigue*, n. 23, pp. 225-232, 2001.
- [7] L. P. Meneghetti G., «Significance of the elastic peak stress evaluated by FE analysis at the point of singularity of sharp V-notched components» *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, n. 30, pp. 95-106, 2006.
- [8] S. M. G. Meneghetti, «Estimation of the fatigue limit of components made of Austempered Ductile Iron weakened by V-shaped notches» in *World Foundry Congress*, 2012.
- [9] C. Sonsino, «Fatigue strength of welded components under complex elasto-plastic, multiaxial deformations» Report EUR 16024 DE, 1997 and LBF Report N° 6078 1994, 1997.
- [10] W. M. Z. H. Yousefi F, «Fatigue strength of welded joints under multiaxial loading: experiments and calculations» *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, n. 24, pp. 339-355, 2001.
- [11] S. K. S. T. Amstutz H, «Fatigue crack growth of a welded tube-flange connection under bending and torsional loading» *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, n. 24, pp. 357-368, 2001.
- [12] O. R. Seeger T, «Tolerable and allowable shear stresses at fatigue loaded welded joints» *Stahlbau*, n. 8, pp. 231-238, 1987.
- [13] O. R. Seeger T, «Slope and knee-point of the S-N curve of shear loaded fillet welds» *Stahlbau*, n. 61, pp. 137-142, 1992.
- [14] L. F. Yung JY, «Predicting the fatigue life of welds under combined bending and torsion» *Biaxial and multiaxial fatigue, EGF*, n. 3, pp. 53-69, 1989.

- [15] K. P. L. F. Siljander A, «Non proportional fatigue of welded structures» *Advances in fatigue lifetime predictive techniques, ASTM STP*, n. 1122, pp. 319-338, 1992.
- [16] R. GR, *Fatigue of load carrying fillet welded joints under multiaxial loading*, Abington: Abington Publishing, 1996.
- [17] K. T. Y. A. H.C. Hu, «Estimation of torsional fatigue strength of medium carbon steel bars with a circumferential crack by the cyclic resistance-curve method» *Fatigue&Fracture of Engineering Materials and Structures*, n. 21, pp. 1067-1076, 1998.
- [18] S. C. T. L. Caligaris, *Manuale di Meccanica*, Milano: Hoepli, 2006.
- [19] M. S. G. Meneghetti, «Utilizzo della centralina IMC-CRONOS PL12» Università di Padova - Dipartimento ingegneria meccanica, 2009.



Appendice A: PROVINI TESTATI NELLE PROVE SPERIMENTALI

Di seguito si riportano delle informazioni relative ai provini testati nelle prove sperimentali.

A.1 - Provino 1

ASFWR0.1_1	
$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	190
R	0.1
N_i [cicli]	697815
N_r [cicli]	1135497
τ_{max} [MPa]	211.11
τ_{min} [MPa]	21.11
$F_{max,1}$ [N]	6010.1
$F_{min,1}$ [N]	601.01
$F_{max,2}$ [N]	-601.01
$F_{min,2}$ [N]	-6010.1
f [Hz]	10
<i>Rottura</i>	<i>Radice</i>

Tabella A.1: Dati di prova del provino in esame.



Figura A.1 - Foto del provino N°1 criccato. La cricca è innescata alla radice.

A.2 - Provino 2

ASFWR-1_1	
$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	300
R	-1
N_i [cicli]	45246
N_r [cicli]	46858
τ_{max} [MPa]	150
τ_{min} [MPa]	-150
$F_{max,1}$ [N]	4270.33
$F_{min,1}$ [N]	-4270.33
$F_{max,2}$ [N]	4270.33
$F_{min,2}$ [N]	-4270.33
f [Hz]	1.5
<i>Rottura</i>	<i>Radice</i>

Tabella A.2: Dati di prova del provino in esame.



Figura A.2 - Foto del provino N°2 criccato. La cricca è innescata dalla radice.

A.3 - Provino 3

ASFWR-1_2	
$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	200
R	-1
N_i [cicli]	352325
N_r [cicli]	352325
τ_{max} [MPa]	100
τ_{min} [MPa]	-100
$F_{max,1}$ [N]	2846.9
$F_{min,1}$ [N]	-2846.9
$F_{max,2}$ [N]	2846.9
$F_{min,2}$ [N]	-2846.9
f [Hz]	1.5
<i>Rottura</i>	<i>Non rotto</i>

Tabella A.3: Dati di prova del provino in esame.

A.4 - Provino 4

SRFWR0.1_1	
$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	190
R	0.1
N_i [cicli]	1200878
N_r [cicli]	1200878
τ_{max} [MPa]	211.11
τ_{min} [MPa]	21.11
$F_{max,1}$ [N]	6010.1
$F_{min,1}$ [N]	601.01
$F_{max,2}$ [N]	-601.01
$F_{min,2}$ [N]	-6010.1
f [Hz]	15
<i>Rottura</i>	<i>Non rotto</i>

Tabella A.4: Dati di prova del provino in esame.

A.5 - Provino 5

SRFWR-1_1	
$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	350
R	-1
N_i [cicli]	32519
N_r [cicli]	32616
τ_{max} [MPa]	175
τ_{min} [MPa]	-175
$F_{max,1}$ [N]	4982.1
$F_{min,1}$ [N]	-4982.1
$F_{max,2}$ [N]	4982.1
$F_{min,2}$ [N]	-4982.1
f [Hz]	1
<i>Rottura</i>	<i>Tube</i>

Tabella A.5: Dati di prova del provino in esame.



Figura A.3 - Foto del provino N°5 criccato sul tubo.

A.6 - Provino 6

SRFWR-1_2	
$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	300
R	-1
N_i [cicli]	125226
N_r [cicli]	133448
τ_{max} [MPa]	150
τ_{min} [MPa]	-150
$F_{max,1}$ [N]	4270.33
$F_{min,1}$ [N]	-4270.33
$F_{max,2}$ [N]	4270.33
$F_{min,2}$ [N]	-4270.33
f [Hz]	2.5
<i>Rottura</i>	<i>Radice</i>

Tabella A.6: Dati di prova del provino in esame.



Figura A.4 - Foto del provino 6. La cricca è innescata dalla radice.

A.7 - Provino 7

SRFWR-1_3	
$\Delta\tau_{nom}$ [MPa]	210
R	-1
N_i [cicli]	1400000
N_r [cicli]	1400000
τ_{max} [MPa]	105
τ_{min} [MPa]	-105
$F_{max,1}$ [N]	2989.2
$F_{min,1}$ [N]	-2989.2
$F_{max,2}$ [N]	2989.2
$F_{min,2}$ [N]	-2989.2
f [Hz]	3
<i>Rottura</i>	<i>Attualmente in prova</i>

Tabella A.7: Dati di prova del provino in esame.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio innanzitutto il mio relatore, il Prof. Giovanni Meneghetti, per avermi concesso l'opportunità di svolgere questo appassionante lavoro di tesi e per tutto l'aiuto e i chiarimenti fornitomi in questo periodo.

Ringrazio inoltre l'Ing. Vittorio Babini e l'Ing. Fausto Ravagnani (Zamperla S.p.a.) per averci portato i provini da testare e per la disponibilità dimostrata riguardo alle mie richieste di chiarimenti.

E' doveroso ringraziare tutti gli amici che mi hanno accompagnato in questi anni per i bei momenti passati insieme ma anche per la comprensione mostratami in quelli più difficili.

Il ringraziamento più sentito va alla mia famiglia, per avermi sostenuto durante questo periodo di studi; in particolar modo devo ringraziare i miei genitori per tutti i sacrifici compiuti e per l'appoggio che mi hanno sempre fornito. È in buona parte merito loro se ora mi trovo davanti ad un obiettivo così importante.

Un ringraziamento particolare va a mio fratello Nicola per avermi aiutato, specialmente in quest'ultimo periodo nel quale mi sono ritrovato in difficoltà per gli innumerevoli impegni.

Per ultima, ma non meno importante, desidero ringraziare la mia fidanzata Valentina per tutta la pazienza e il sostegno fornitomi durante questi anni; spero vivamente di cuore che questo sia soltanto uno degli innumerevoli bei momenti che condivideremo insieme.

Andrea De Marchi