



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali DTG

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

*Un metodo efficiente per il calcolo del fattore di intensificazione
delle tensioni con mesh grossolane*

Relatore: **Prof. Michele Zappalorto**

Laureando: **Claudio Mazzarolo**

Matricola: **1242725**

Anno Accademico 2022/2023

*Ad Alberta,
parte fondamentale della mia vita
e punto di riferimento.*

Sommario

ABSTRACT	7
1. INTRODUZIONE	9
2. IL METODO AGLI ELEMENTI FINITI	15
2.1 FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA).....	16
2.2 CALCOLO DEL NSIF A MODO 1 CON ANSYS	18
3. UN METODO ALTERNATIVO	21
3.1 STRAIN ENERGY DENSITY (SED)	21
3.2 IL METODO	22
4. PROGRAMMA MATLAB.....	27
4.1 DEFINIZIONE PROPRIETÀ DEL MATERIALE E GEOMETRIA.....	27
4.2 IMPORTAZIONE DATI DA ANSYS.....	29
4.3 CALCOLO DEI PARAMETRI DEGLI ELEMENTI E DEL K1.....	32
5. ANALISI	35
5.1 MESH OMOGENEA	36
5.1.1 135 GRADI	38
5.1.2 90 GRADI	39
5.1.3 60 GRADI	40
5.1.4 45 GRADI	41
5.1.5 PANORAMICA RISULTATI MESH OMOGENEA.....	42
5.2 MESH REFINEMENT.....	43
5.2.1 135 GRADI	44
5.2.2 90 GRADI	45
5.2.3 60 GRADI	46
5.2.4 45 GRADI	47
5.2.5 PANORAMICA RISULTATI MESH REFINEMENT	48
5.3 ANALISI ELEMENTI BORDO INTAGLIO	49
5.3.1 135 GRADI	50
5.3.2 90 GRADI	51
5.3.3 60 GRADI	52
5.3.4 45 GRADI	53
5.4 VARIAZIONE PROFONDITÀ INTAGLIO	54
5.4.1 PROFONDITÀ 5 mm.....	55
5.4.1.1 135 GRADI	55
5.4.1.2 90 GRADI	56

5.4.1.3	60 GRADI	57
5.4.1.4	45 GRADI	58
5.4.2	PROFONDITÀ 10 mm.....	59
5.4.2.1	135 GRADI	59
5.4.2.2	90 GRADI	60
5.4.2.3	60 GRADI	61
5.4.2.4	45 GRADI	62
5.5	OSSERVAZIONI.....	63
6.	GIUNZIONI SALDATE A CROCE CON CORDONE NON PORTANTE.....	65
6.1	CASO 1	67
6.2	CASO 2	69
6.3	CASO 3	72
6.4	OSSERVAZIONI.....	74
6BIS.	GIUNZIONE SALDATA A CROCE CON CORDONE PORTANTE.....	75
7.	GIUNTI SALDATI TESTA - TESTA	79
7.1	SEMPLIFICAZIONE A DOPPIA SIMMETRIA	80
7.1.1	CASO 1	81
7.1.1.1	TOTALE PENETRAZIONE.....	81
7.1.1.2	PARZIALE PENETRAZIONE.....	82
7.1.2	CASO 2	83
7.1.2.1	TOTALE PENETRAZIONE.....	83
7.1.2.2	PARZIALE PENETRAZIONE.....	84
7.2	SEMPLIFICAZIONE A SINGOLA SIMMETRIA	85
7.2.1	CASO 1	86
7.2.2	CASO 2	87
7.2.2.1	MESH GLOBALE 2 mm	87
7.2.2.2	MESH GLOBALE 1 mm	88
7.3	PANORAMICA RISULTATI.....	89
8.	CONCLUSIONI	91
9.	APPENDICE.....	93
	BIBLIOGRAFIA	103
	RINGRAZIAMENTI	105

ABSTRACT

Nel campo della meccanica, la presenza di un intaglio può costituire un elemento di indebolimento nel componente in quanto vengono a generarsi delle amplificazioni delle tensioni in prossimità del suo apice, che possono portare a condizioni di snervamento del materiale, innesco di cricche e rotture del componente.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi approcci per la progettazione statica riguardante componenti che presentano questo tipo di caratteristiche, uno tra questi è quello della determinazione del NSIF (Notch Stress Intensity Factor), parametro che permette di stabilire l'intensificazione delle tensioni a bordo intaglio.

Per valutare l'NSIF è necessario calcolare le tensioni locali nell'intorno dell'apice, calcolo che può risultare difficoltoso in modo analitico in quanto i casi in letteratura sono pochi e/o di scarsa complessità. Per questo motivo si preferisce affidarsi a strumenti di calcolo basati su metodi agli elementi finiti. Questi metodi, per quanto potenti essi siano, riscontrano qualche limitazione: una tra queste riguarda il fatto che i risultati di analisi con gli elementi finiti sono tanto più accurati quanto più piccola è la loro dimensione. Un altro motivo è che l'apice d'intaglio costituisce un punto di singolarità nell'andamento delle tensioni, il che vuol dire che per avere una buona stima, si devono realizzare mesh molto fitte nelle vicinanze dell'apice.

Queste due situazioni comportano l'utilizzo di un elevato numero di elementi, che va ad influire sui tempi delle analisi, a meno che non si disponga di grosse potenze di calcolo o si adottino delle semplificazioni al modello.

Questo lavoro ha quindi l'obiettivo di trovare un metodo che permetta il calcolo del NSIF a Modo 1 in maniera ugualmente efficace ma tramite un procedimento semplificato e di facile esecuzione, riducendo la complessità delle mesh, il numero di elementi utilizzati e i tempi delle analisi.

Dal punto di vista pratico, questa trattazione coinvolge tutti quei componenti meccanici caratterizzati dalla presenza di intagli come sedi per viti, gole, raccordi ma anche lavorazioni con apporto di materiale: infatti, il cordone di saldatura presenta degli intagli, più o meno raccordati, con differenti angoli di apertura. Ai piedi del cordone si trovano generalmente angoli di 135 gradi, mentre le mancate penetrazioni sono assimilabili a cricche aventi un'apertura prossima allo zero.

Le analisi di questo lavoro, per verificare il metodo, riguardano quindi piastre in acciaio, e successivamente giunzioni saldate a totale e parziale penetrazione, sollecitate a Modo 1.

1. INTRODUZIONE

Come precedentemente accennato, lavorazioni meccaniche come fori, spallamenti, gole e intagli, influenzano la vita del componente in esercizio, in quanto nelle zone adiacenti alle lavorazioni, le tensioni che si generano durante l'esercizio vengono intensificate. Questo vale non solo per le lavorazioni fatte nel componente, ma anche per la presenza in esso di difetti come cricche, che possono essere intese come intagli aventi angolo di apertura quasi nullo. Nel campo della meccanica della frattura viene accettato il fatto che un componente possa presentare tali caratteristiche, in questo caso quindi viene adottato un approccio non più di tipo *safe life*, in cui le verifiche dimensionali non contemplano danneggiamenti, ma si preferisce seguire invece un approccio detto *damage tolerant*, cioè non importa che il componente sia danneggiato, ma in che modo il difetto influisce sulla vita utile.

Quando si parla di componenti intagliati, la base di partenza sono le equazioni di Williams [1] per gli intagli a spigolo vivo.

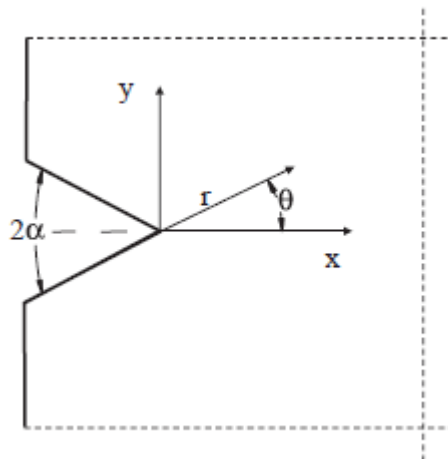


Fig. 1.1 - Intaglio a spigolo vivo [2]

La soluzione proposta da Williams è valida per sollecitazioni nel piano x-y, cioè per i casi di tensione piana e deformazione piana. Le sollecitazioni a cui si farà riferimento anche in seguito, sono suddivise in 3 categorie: sollecitazioni di Modo 1, Modo 2 e Modo 3 (o Modo misto). Le 3 tipologie sono raffigurate nell'immagine seguente:

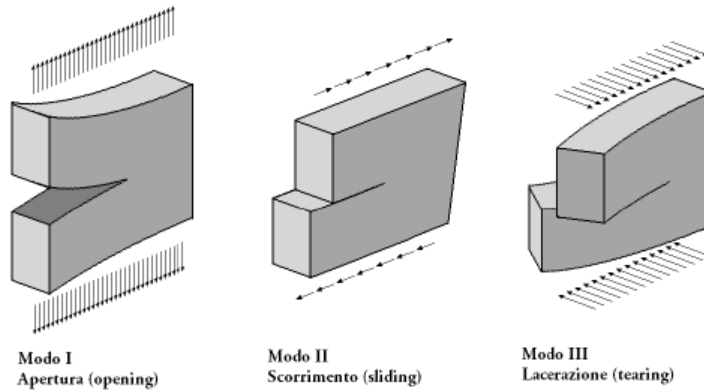


Fig. 1.2 - Modi di sollecitazione [3]

Sollecitazioni di Modo 1 come flessione o trazione, fanno sì che il campo di tensione sia simmetrico rispetto alla bisettrice dell'angolo d'intaglio, è antimetrico invece nel caso di Modo 2 per esempio con sforzi di taglio. Il Modo misto invece presenta contributi sia del Modo 1 che del Modo 2, il campo tensionale è quindi né simmetrico né antimetrico.

La trattazione di Williams parte dalla considerazione che, passando da un componente criccato ad uno completamente liscio, il comportamento tensionale subisce una transizione graduale passando da un caso all'altro. Nella trattazione di Inglis [4] riguardante una piastra caratterizzata dalla presenza di un foro ellittico:

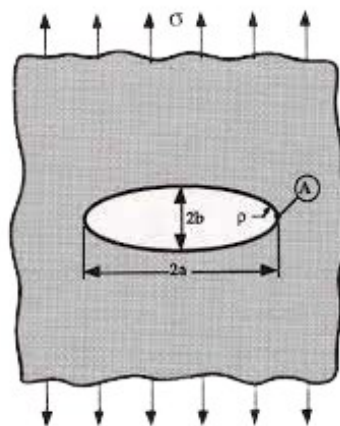


Fig. 1.3 - Piastra con foro ellittico sottoposta a trazione [5]

il fattore di concentrazione delle tensioni K_t risulta essere:

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (1.1)$$

Prendendo in considerazione una cricca invece, il raggio di curvatura ρ tende a zero e dalla precedente formula si trova quindi un $K_t \rightarrow \infty$, riscontrando dunque un punto di singolarità tensionale all'apice della cricca.

Nel caso invece di un particolare liscio, caratterizzato dunque da angolo di apertura $2\alpha = \pi$, il campo di tensioni non risulta più singolare ma è uniformemente distribuito. La funzione suggerita da Williams, che permette tale transizione e che sia quindi dipendente dall'angolo dell'intaglio, è una funzione di potenza del tipo:

$$F(r) = r^{\lambda+1} \quad \text{con} \quad \lambda = f(2\alpha) \quad \text{e} \quad 0 < \lambda \leq 1 \quad (1.2)$$

Sostituendola nella funzione di Airy [6], applicando le condizioni al contorno di bordo libero delle pareti dell'intaglio e considerando che la singolarità si manifesta solo localmente, si ritrova un sistema di 4 equazioni con 4 incognite. Queste 4 equazioni sono costituite da termini simmetrici (Modo 1) e antisimmetrici (Modo 2). Rielaborando il sistema in forma matriciale, si ottiene una matrice diagonale a 2 blocchi, uno riferito quindi al Modo 1, l'altro inerente al Modo 2. Grazie a questo passaggio, è possibile risolvere separatamente i due casi, imponendo a zero il determinante di ciascuna sottomatrice e ottenendo le seguenti equazioni agli autovalori per i 2 Modi:

$$\sin(2\lambda_1\gamma) + \lambda_1 \sin(2\gamma) = 0 \quad \text{Modo 1} \quad (1.3a)$$

$$\sin(2\lambda_2\gamma) - \lambda_2 \sin(2\gamma) = 0 \quad \text{Modo 2} \quad (1.3b)$$

Risolvendo le equazioni 1.3a - 1.3b si trovano gli autovalori di Williams λ_1 e λ_2 , parametri che controllano l'esponente delle tensioni e che dipendono dall'angolo di apertura dell'intaglio 2α , come visto precedentemente in Fig. 1.1.

Le equazioni di Williams per un intaglio a spigolo vivo sono quindi le seguenti:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta} = \lambda_1 r^{\lambda_1-1} B [(1 + \lambda_1) \cos(1 - \lambda_1) \theta + \chi_1(1 - \lambda_1) \cos(1 + \lambda_1) \theta] \\ \sigma_{rr} = \lambda_1 r^{\lambda_1-1} B [(3 - \lambda_1) \cos(1 - \lambda_1) \theta - \chi_1(1 - \lambda_1) \cos(1 + \lambda_1) \theta] \\ \tau_{r\theta} = \lambda_1 r^{\lambda_1+1} B [(1 - \lambda_1) \sin(1 - \lambda_1) \theta + \chi_1(1 - \lambda_1) \sin(1 + \lambda_1) \theta] \end{cases} \quad (1.4)$$

si nota che il campo di tensione è descritto a meno di una costante B.

Per determinare la costante B, è stato introdotto il *Notch Stress Intensity Factor (NSIF)*, un parametro definito nel 1972 da Gross & Mendelson [7]. La formulazione matematica del NSIF a Modo I è la seguente:

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0^+} \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{\theta(\theta=0)} \cdot r^{1-\lambda_1} \quad [MPa \cdot mm^{1-\lambda_1}] \quad (1.5)$$

Nell'equazione appena descritta, $\sigma_{\theta(\theta=0)}$ è la tensione agente sulla bisettrice dell'angolo e tensione di apertura dell'intaglio, r è la distanza radiale dall'apice dell'intaglio e λ_1 come precedentemente accennato è l'autovalore di Williams di Modo 1. L'esponente $1 - \lambda_1$ di r determina il grado di singolarità del Modo 1, cioè quanto rapidamente le tensioni tendono all'infinito in prossimità dell'apice.

Sempre dalla formula 1.5 si ricava che il K_1 viene calcolato in una zona di processo molto piccola vicino all'apice dell'intaglio, indicata dalla presenza del limite. Le equazioni di Williams hanno infatti natura locale, distanti dall'intaglio non si ha più la perturbazione e si ritrovano valori di tensioni nominali. Oltre a questo, il calcolo viene fatto sulla bisettrice dell'angolo perché, a Modo 1, σ_{θ} e σ_r sono simmetriche rispetto ad essa, mentre sono antimediche a Modo 2, in questa condizione quindi si riesce a disaccoppiare i modi, escludendo i contributi di uno o dell'altro, a seconda della tensione da calcolare.

Grazie a questa definizione è possibile calcolare le tensioni tramite le equazioni di Gross & Mendelson formulate sulla base delle equazioni di Williams:

$$\begin{cases} \sigma_\theta \\ \sigma_r \\ \tau_{r\theta} \end{cases} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{r^{\lambda_1-1}}{\omega_1} \begin{cases} (1 + \lambda_1) \cos(1 - \lambda_1) \theta + \chi_1(1 - \lambda_1) \cos(1 + \lambda_1) \theta \\ (3 - \lambda_1) \cos(1 - \lambda_1) \theta - \chi_1(1 - \lambda_1) \cos(1 + \lambda_1) \theta \\ (1 - \lambda_1) \sin(1 - \lambda_1) \theta + \chi_1(1 - \lambda_1) \sin(1 + \lambda_1) \theta \end{cases} \quad (1.6)$$

Il K1 ha un andamento che risulta costante nella zona dell'apice dell'intaglio caratterizzata da singolarità tensionale, e questo lo rende un parametro utilizzabile in fase di progettazione.

Un criterio di verifica per componenti intagliati in progettazione statica risulta essere:

$$K_1 < K_C \quad (1.7)$$

dove Kc è la tenacità a frattura del materiale, mentre il K1 dipende dalla geometria del componente, le dimensioni assolute e le condizioni di vincolo e carico.

Per calcolare il K1 a questo punto si può ricorrere a 2 strade:

1. Articoli scientifici presenti in letteratura;
2. Analisi agli elementi finiti.

La prima via è percorribile in pochi casi in quanto gli articoli presenti non sono molti e fanno riferimento a casi di scarsa complessità. Nella maggior parte delle situazioni, infatti, si fa uso di metodi agli elementi finiti.

2. IL METODO AGLI ELEMENTI FINITI

Risolvere strutture meccaniche più o meno complesse in maniera analitica può risultare difficoltoso in termini di calcoli e quindi di tempo impiegato, e non sempre ci si riconduce a soluzioni in forma esatta, a meno di fare determinate considerazioni e/o semplificazioni.

Risulta quindi più efficace utilizzare metodi numerici che portano ad una soluzione, in certi casi approssimata, in tempi molto più brevi e in modo automatizzato.

Tra questi, uno sicuramente conosciuto è il Metodo agli Elementi Finiti (FEM), in cui il solido oggetto di studio viene discretizzato in un certo numero di elementi aventi dimensione finita. Ogni elemento è delimitato da un certo numero di nodi e il campo di spostamenti $\{u\}$ che avviene all'interno dell'elemento è approssimato e viene descritto tramite il vettore spostamenti $\{f\}$ di questi nodi mediante la seguente relazione:

$$\{u\} = [N] \cdot \{f\} \quad (2.1)$$

La matrice $[N]$ contiene le funzioni di forma, polinomi che permettono di descrivere lo spostamento di un punto generico dell'elemento in funzione degli spostamenti nodali. Per ogni elemento viene calcolata la matrice di rigidezza $[K]$ come segue:

$$[K] = \int [B]^T [E] [B] dV \quad (2.2)$$

e successivamente avviene l'assemblaggio delle matrici di rigidezza per ottenere la matrice globale del modello K_g .

Lo studio di una struttura si basa quindi sulla risoluzione della seguente equazione:

$$\{F\} = [K_g] \cdot \{f\} \quad (2.3)$$

dove $\{F\}$ è il vettore delle forze generalizzate agenti sul modello, $[K_g]$ è la matrice di rigidezza globale del sistema e $\{f\}$ è il vettore incognito degli spostamenti nodali.

Una volta noto $\{f\}$ è dunque possibile calcolare i vettori delle deformazioni e tensioni:

$$\{\varepsilon\} = \frac{\partial\{u\}}{\partial\{x\}} = \frac{\partial[N]}{\partial\{x\}} \cdot \{f\} = [B] \cdot \{f\} \quad (2.4)$$

$$\{\sigma\} = [E] \cdot \{\varepsilon\} \quad (2.5)$$

La matrice $[E]$ viene determinata in base al materiale, $[N]$ e quindi $[B]$ sono definite in base al tipo di elemento scelto. È importante sottolineare che la matrice $[B]$ contiene le derivate delle funzioni di forma, questo significa che l'accuratezza del calcolo delle deformazioni è inferiore rispetto a quello degli spostamenti a causa della differenziazione di $[N]$. Il calcolo della matrice di rigidità $[K]$, in cui è presente $[B]$, risulta approssimato per un elemento finito generico e il risultato dell'analisi dipende fortemente dalla discretizzazione del modello.

2.1 FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA)

Quando si ricorre all'utilizzo delle FEA, la *Finite Element Analysis*, nella maggior parte dei casi si fa riferimento a software dedicati come ANSYS, Nastran, Femap, ma anche a programmi di CAD come SolidWorks, SolidEdge e tanti altri, che danno la possibilità una volta disegnata la parte o l'assieme, anche di condurre analisi ad elementi finiti, più o meno complesse in base al software e alla disponibilità della licenza.

La procedura utilizzata dai vari software per le FEA è suddivisa in 3 fasi:

1. Pre-processing
2. Processing
3. Post-processing

1. PRE-PROCESSING

In questa fase iniziale viene impostata l'analisi scegliendo la tipologia: statica, dinamica, lineare, non lineare, termica, ecc.; viene definito il tipo di elemento, per esempio triangolare o quadrilatero, per casi bi-dimensionali (2D) o tri-dimensionali (3D), il quale andrà ad influire sulla risoluzione come visto nel paragrafo precedente. Si definiscono i parametri del materiale come il modulo di

Young e coefficiente di Poisson, a meno che il software non utilizzi delle librerie standard preimpostate di materiali.

Una volta definita l'analisi, avviene la modellazione del componente da analizzare e della sua discretizzazione in elementi finiti, andando a generare quella che è definita la *mesh* del modello, con le relazioni tra i lati ma soprattutto tra i nodi degli elementi. Come ultimo step vengono applicati tutti i vincoli e le condizioni di carico.

Di seguito è riportata un'immagine della mesh tri-dimensionale, realizzata con elementi triangolari, di una pedivella a cui è stato simulato il carico agente sul perno del pedale:

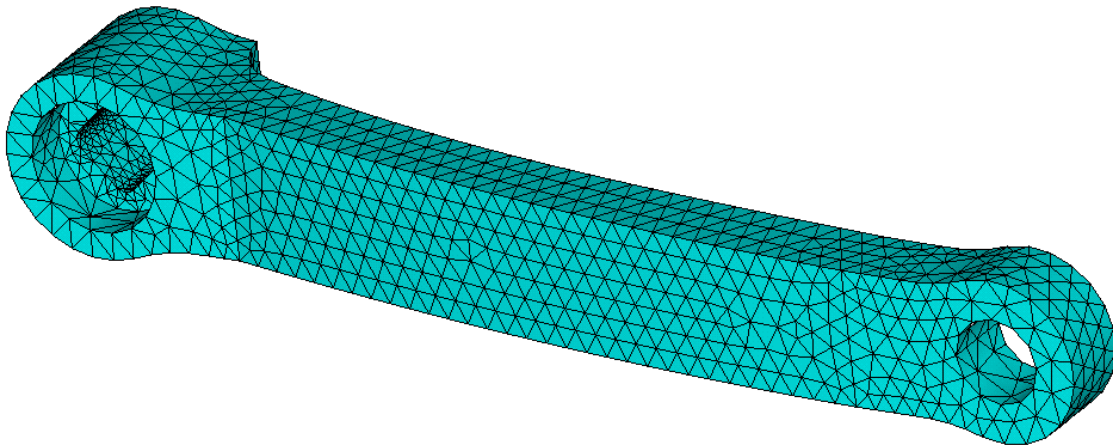


Fig. 2.1 - Mesh tridimensionale di una manovella

2. PROCESSING

Una volta terminato il pre-processing, si passa al *processing*, che si potrebbe definire il cuore dell'analisi, in cui avviene la vera e propria risoluzione del modello. Qui non si devono fare azioni particolari in quanto tutto il lavoro viene svolto dal software, che calcola le varie matrici descritte precedentemente e risolve l'equazione utile a trovare il vettore con tutti gli spostamenti nodali.

3. POST-PROCESSING

In seguito alla soluzione del modello, si passa al *post-processing*, l'ultimo punto di un'analisi ad elementi finiti.

Qui l'utente visualizza e interpreta i risultati ottenuti in termini di spostamenti nodali, componenti di tensione che si generano, deformazioni elastiche e plastiche, i principali criteri applicati come ad esempio Von Mises e altro ancora.

Come già detto, i risultati sono caratterizzati da un certo grado di approssimazione, frutto di come viene impostata l'analisi, cioè dal tipo di elemento scelto e dal grado di finitura della *mesh*.

2.2 CALCOLO DEL NSIF A MODO 1 CON ANSYS

Prima di calcolare il K1 con gli elementi finiti è necessario prendere in considerazione il fatto che, secondo la trattazione di Williams [1], le tensioni sono inversamente proporzionali alla distanza radiale r dall'apice, in quanto il suo l'esponente $\lambda_1 - 1$, assume sempre valori negativi per angoli di apertura intaglio compresi tra 0 e 180 gradi. Ciò significa che tanto più il calcolo viene fatto in prossimità dell'apice, tanto più le tensioni tenderanno all'infinito.

Questo vuol dire che per ottenere dei risultati accurati descrivendo nel miglior modo possibile il comportamento della struttura, è necessario fare uso di un elevato numero di elementi nella zona circostante all'apice.

In ANSYS questo si traduce con l'andare a definire manualmente, nella zona dell'intaglio, il numero e la dimensione di questi elementi, procedura che può portare ad impiegare una buona dose di tempo per l'analisi e che verrà descritta nel dettaglio in questo paragrafo.

Il metodo attuale per calcolare il K1 di un intaglio in ANSYS, una volta modellata la geometria e terminata la fase di pre-processing, è quello di andare a creare un'area circolare di raggio 0,28 mm centrata nell'apice dell'intaglio, come definito da Lazzarin e Zambardi nel 2001 [8] per il criterio *ASED* (*Average Strain Energy Density*). Questa area sarà quindi discretizzata da un certo numero di elementi aventi dimensione dell'ordine del centesimo di millimetro, mentre la zona esterna sarà caratterizzata da una diminuzione graduale del numero di elementi aventi quindi dimensione maggiore. Per rendere più chiara l'idea, di seguito è riportata un'immagine con la mesh appena descritta di una giunzione saldata avente un intaglio a spigolo vivo:

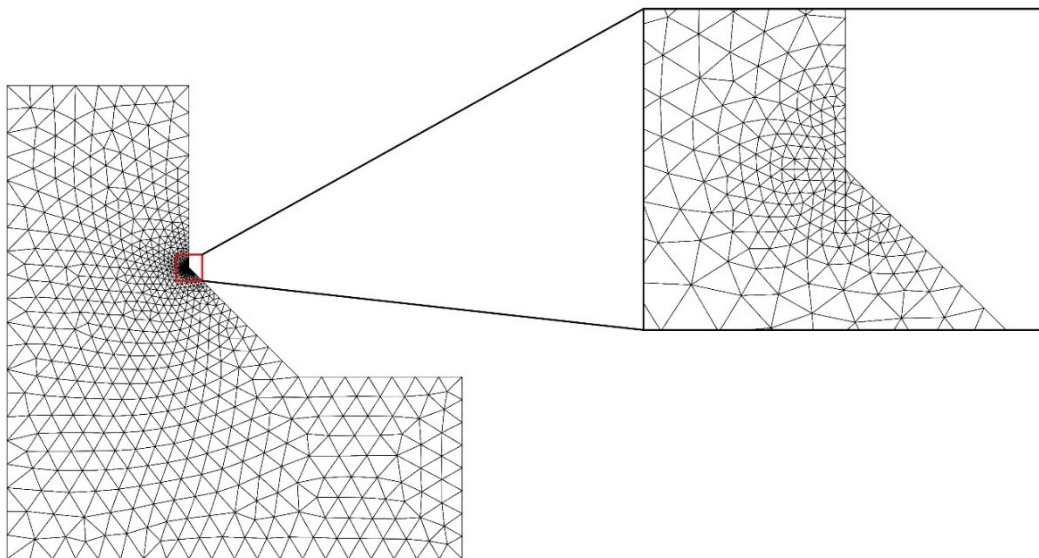


Fig. 2.2 - Mesh fine realizzata per un intaglio a spigolo vivo

Una volta risolta la struttura, per ricavare i valori di tensione σ_θ lungo la bisettrice, bisogna andare a selezionare manualmente i nodi appartenenti agli elementi che giacciono su di essa all'interno dell'area circolare, e successivamente esportarli in un file di testo. A questo punto basta utilizzare un foglio di calcolo per applicare per ogni dato la definizione di Gross & Mendelson ed effettuare una media di tali valori. Il risultato ottenuto, come già detto, è funzione della dimensione degli elementi, quindi, per ottenere un valore più accurato, la comune procedura è di andare a ridurre la dimensione degli elementi presenti all'interno dell'area che abbraccia l'intaglio.

3. UN METODO ALTERNATIVO

In questo capitolo viene trattata l'evoluzione e successivamente l'implementazione del metodo ideato da Zappalorto, Pontefisso e Carraro [2] in cui viene stimato l'NSIF tramite la relazione che sussiste con la *Strain Energy Density (SED)*. Di seguito viene quindi spiegato il criterio SED e il suo utilizzo nel ricavare successivamente il valore del NSIF a Modo 1.

3.1 STRAIN ENERGY DENSITY (SED)

Secondo il criterio di Lazzarin e Zambardi [8], il SED è il parametro per il quale si ha incipiente cedimento in un componente intagliato quando la densità di energia di deformazione, mediata in un volume di controllo attorno l'apice dell'intaglio, eguaglia e supera il valore critico caratteristico del materiale. Il volume di controllo fa riferimento, come accennato nel capitolo precedente, ad un'area circolare centrata nell'apice dell'intaglio, che per gli acciai ha un valore del raggio R_c pari a 0,28 mm.

La Strain Energy Density viene calcolata in un punto mediante la relazione:

$$\begin{aligned} W(r, \vartheta) &= \frac{K_1^2 r^{2(\lambda_1-1)}}{2E} \{ \tilde{\sigma}_\vartheta^2 + \tilde{\sigma}_r^2 + \tilde{\sigma}_z^2 - \nu(\tilde{\sigma}_r \tilde{\sigma}_\vartheta + \tilde{\sigma}_\vartheta \tilde{\sigma}_z + \tilde{\sigma}_r \tilde{\sigma}_z) + 2(1 + \nu) \tilde{\tau}_{r\vartheta}^2 \} = \\ &= \frac{K_1^2 r^{2(\lambda_1-1)}}{2E} \tilde{W} \end{aligned} \quad (3.1)$$

che viene successivamente mediata, come già menzionato, nell'area di controllo di raggio R_c :

$$\bar{W} = \frac{1}{A_c} \int W dA_c = \frac{E_T}{A_c} \quad (3.2)$$

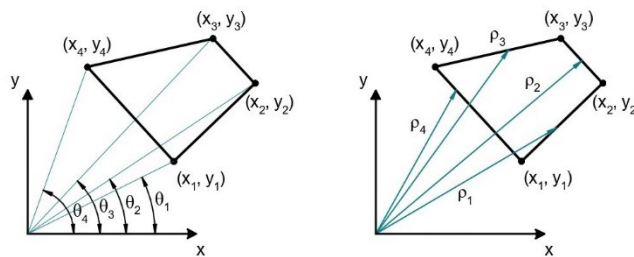
dove E_T è l'energia di deformazione totale nell'area di controllo. Integrando quindi il valore di W ricavato nell'equazione precedente, si ottiene che l'*Average Strain Energy Density (ASED)* nel volume di controllo risulta essere:

$$\bar{W} = \frac{K_1^2}{E} \frac{I_1}{4\lambda_1\gamma} R_c^{2(\lambda_1-1)} \quad (3.3)$$

Il parametro I_1 dipende dall'angolo di apertura dell'intaglio, dal coefficiente di Poisson e dalle ipotesi di tensione o deformazione piana. È bene inoltre precisare che il criterio è valido se il raggio di controllo R_c è contenuto nella zona governata dalla singolarità tensionale, cioè dove valgono le considerazioni di Williams.

3.2 IL METODO

Questo differente approccio consiste nel calcolare l'area dell'elemento finito a 4 nodi mediante l'utilizzo di equazioni parametriche polari. Dato quindi un generico elemento vicino all'apice dell'intaglio, le configurazioni che esso può assumere sono le seguenti 6:



CASE 1: $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4$

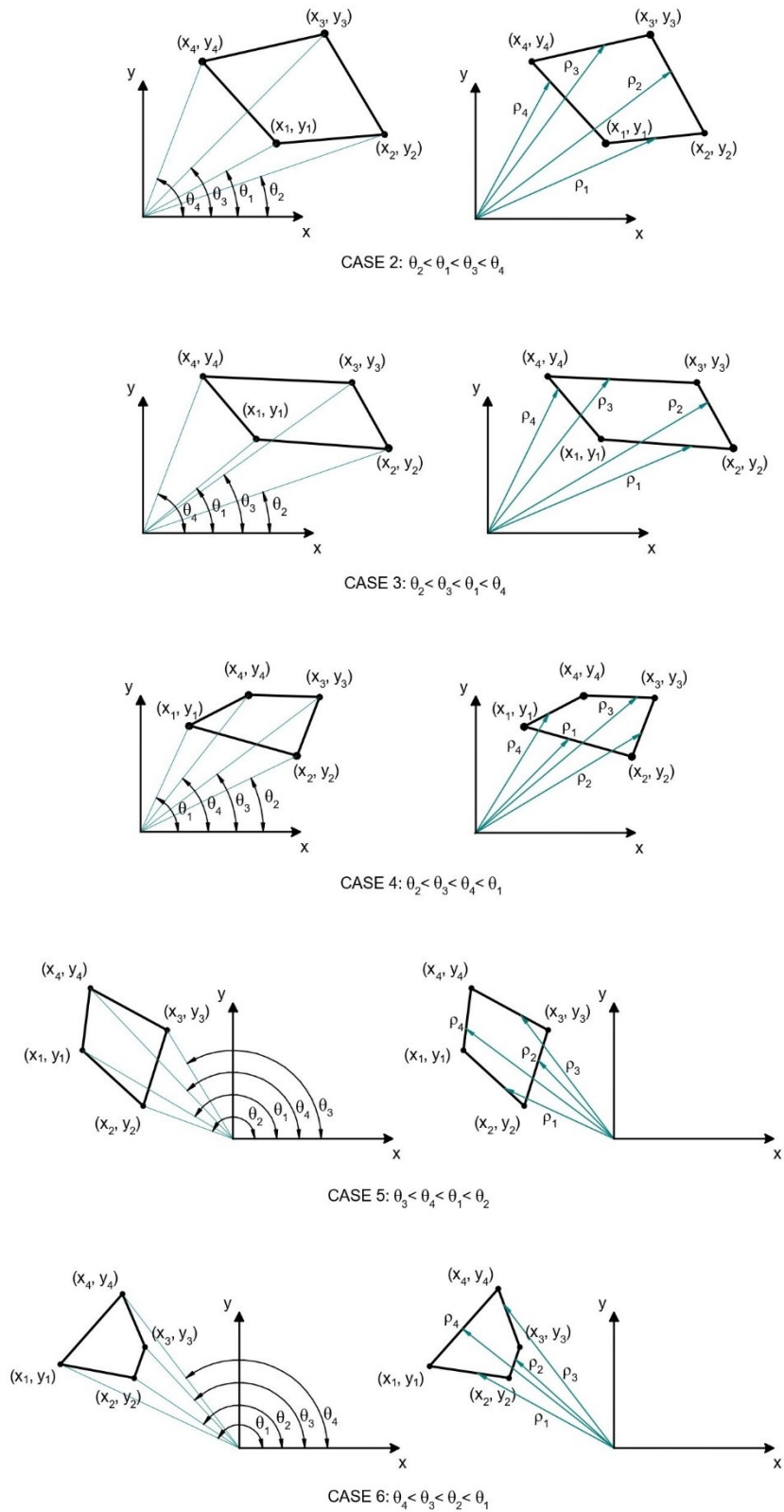


Fig. 3.1 - Casi possibili per elemento quadrilatero

Le equazioni polari per descrivere i lati dell'elemento sono le seguenti:

$$\rho_i = \frac{q_i}{\sqrt{1 + m_i^2} \sin(\vartheta - \arctan m_i)(x_2 - x_1)} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.4)$$

dove x_i, y_i sono le coordinate del i -esimo nodo, $d = x_2 - x_1$ e:

$$\begin{aligned} m_i &= \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} & q_i &= -x_i \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + y_i & i &= 1, 2, 3 \\ m_4 &= \frac{y_1 - y_4}{x_1 - x_4} & q_4 &= -x_4 \frac{y_1 - y_4}{x_1 - x_4} + y_4 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Successivamente vengono calcolati i seguenti integrali, che dipendono dalla morfologia dell'area, utilizzando i parametri della tabella sottostante in base al particolare caso:

Tab 3.1 – Parametri da utilizzare per il calcolo degli integrali relativi all'elemento quadrilatero

	ϑ_{m1}	ϑ_{m2}	ϑ_{m3}	ϑ_{m4}	ϑ_{m5}	ϑ_{m6}	ρ_{n1}	ρ_{n2}	ρ_{n3}	ρ_{n4}	ρ_{n5}	ρ_{n6}
CASE 1	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_2	ϑ_3	ϑ_3	ϑ_4	ρ_4	ρ_1	ρ_4	ρ_2	ρ_4	ρ_3
CASE 2	ϑ_2	ϑ_1	ϑ_1	ϑ_3	ϑ_3	ϑ_4	ρ_1	ρ_2	ρ_4	ρ_2	ρ_4	ρ_3
CASE 3	ϑ_2	ϑ_3	ϑ_3	ϑ_1	ϑ_1	ϑ_4	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_3	ρ_4	ρ_3
CASE 4	ϑ_2	ϑ_3	ϑ_3	ϑ_4	ϑ_4	ϑ_1	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_3	ρ_1	ρ_4
CASE 5	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_3	ϑ_4	ϑ_4	ϑ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_2	ρ_4
CASE 6	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_3	ϑ_2	ϑ_4	ϑ_3	ρ_2	ρ_1	ρ_2	ρ_4	ρ_3	ρ_4

$$I_a = \frac{1}{2} \left\{ \int_{\vartheta_{m1}}^{\vartheta_{m2}} (\rho_{n2}^2 - \rho_{n1}^2) d\vartheta + \int_{\vartheta_{m3}}^{\vartheta_{m4}} (\rho_{n4}^2 - \rho_{n3}^2) d\vartheta + \int_{\vartheta_{m5}}^{\vartheta_{m6}} (\rho_{n6}^2 - \rho_{n5}^2) d\vartheta \right\} \quad (3.6)$$

$$I_{E1} = \frac{1}{2\lambda_1} \left\{ \int_{\vartheta_{m1}}^{\vartheta_{m2}} (\rho_{n2}^{2\lambda_1} - \rho_{n1}^{2\lambda_1}) \tilde{W}_1 d\vartheta + \int_{\vartheta_{m3}}^{\vartheta_{m4}} (\rho_{n4}^{2\lambda_1} - \rho_{n3}^{2\lambda_1}) \tilde{W}_1 d\vartheta + \int_{\vartheta_{m5}}^{\vartheta_{m6}} (\rho_{n6}^{2\lambda_1} - \rho_{n5}^{2\lambda_1}) \tilde{W}_1 d\vartheta \right\} \quad (3.7)$$

$$I_{E2} = \frac{1}{2\lambda_2} \left\{ \int_{\vartheta_{m1}}^{\vartheta_{m2}} (\rho_{n2}^{2\lambda_2} - \rho_{n1}^{2\lambda_2}) \tilde{W}_2 d\vartheta + \int_{\vartheta_{m3}}^{\vartheta_{m4}} (\rho_{n4}^{2\lambda_2} - \rho_{n3}^{2\lambda_2}) \tilde{W}_2 d\vartheta + \int_{\vartheta_{m5}}^{\vartheta_{m6}} (\rho_{n6}^{2\lambda_2} - \rho_{n5}^{2\lambda_2}) \tilde{W}_2 d\vartheta \right\} \quad (3.8)$$

$$I_{E12} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \left\{ \int_{\vartheta_{m1}}^{\vartheta_{m2}} (\rho_{n2}^{\lambda_1+\lambda_2} - \rho_{n1}^{\lambda_1+\lambda_2}) \tilde{W}_{12} d\vartheta + \int_{\vartheta_{m3}}^{\vartheta_{m4}} (\rho_{n4}^{\lambda_1+\lambda_2} - \rho_{n3}^{\lambda_1+\lambda_2}) \tilde{W}_{12} d\vartheta + \int_{\vartheta_{m5}}^{\vartheta_{m6}} (\rho_{n6}^{\lambda_1+\lambda_2} - \rho_{n5}^{\lambda_1+\lambda_2}) \tilde{W}_{12} d\vartheta \right\} \quad (3.9)$$

Infine, è possibile calcolare l'area A , l'energia totale di deformazione E , l'average strain energy density dell'elemento:

$$A = \int r dr d\vartheta = I_a \cdot d^2 \quad (3.10)$$

$$E_T = \int W r dr d\vartheta = \frac{K_1^2}{E} d^{2\lambda_1} I_{E1} + \frac{K_2^2}{E} d^{2\lambda_2} I_{E2} + \frac{K_1 K_2}{E} d^{\lambda_1+\lambda_2} I_{E12} \quad (3.11)$$

$$\bar{W} = \frac{E}{A} = \frac{K_1^2}{E} d^{2(\lambda_1-1)} \frac{I_{E1}}{I_a} + \frac{K_2^2}{E} d^{2(\lambda_2-1)} \frac{I_{E2}}{I_a} + \frac{K_1 K_2}{E} d^{\lambda_1+\lambda_2-2} \frac{I_{E12}}{I_a} \quad (3.12)$$

A questo punto è possibile ricavare il valore di K_1 dall'equazione precedente, tenendo conto che a puro Modo 1, il contributo di K_2 è nullo e l'espressione si semplifica:

$$K_1 = \sqrt{\frac{E_T E}{I_{E1}}} d^{-\lambda_1} \quad (3.13)$$

Nel caso in cui vengano analizzati più elementi contemporaneamente, l'eq. 3.13 viene elaborata per ottenere il K_1 in funzione del numero di elementi n studiati:

$$K_1 = \sqrt{\frac{E \cdot \sum_{i=1}^n E_{T_i}}{\sum_{i=1}^n d_i^{2 \cdot \lambda_1} \cdot I_{E1_i}}} \quad (3.14)$$

L'energia totale E_T è un valore che è possibile ricavare da ANSYS e che viene calcolato automaticamente risolvendo il modello, il modulo elastico E è un parametro noto del materiale, λ_1 dipende dall'angolo di apertura dell'intaglio e si ricava dall'equazione agli autovalori per il modo 1, I_{E1} e d dipendono dalla geometria dell'elemento, in particolare dalle coordinate nodali e quindi dalla mesh, e sono ricavabili in modo automatico tramite l'utilizzo di Matlab.

Il vantaggio di utilizzare tale metodo è che il SED è *meshing insensitive*, cioè non dipende dalla finitura della mesh, ma può essere calcolato anche con mesh grossolane, il che va a semplificare di molto la complessità delle analisi e il tempo impiegato per eseguirle.

Nel capitolo seguente viene quindi spiegata l'implementazione del metodo in un programma realizzato in Matlab per il calcolo del K_1 , prima come verifica dell'accuratezza nei risultati di mesh fitte, poi come test di modelli con mesh grossolane.

4. PROGRAMMA MATLAB

Per fare in modo che il metodo spiegato nel precedente capitolo sia efficace, è necessario l'utilizzo di un calcolatore per ricavare in tempi rapidi e in modo automatico i parametri fondamentali per il calcolo del K_1 , come i vari integrali I_a , I_{E1} , I_{E2} e I_{E12} , i vettori ρ_i che caratterizzano i lati dell'elemento e gli altri dati.

Per questo motivo è stato realizzato un programma in Matlab, consultabile nel capitolo "Appendice", che permette il calcolo in modo automatico del K_1 , programma che verrà diviso in sezioni per spiegare la logica secondo cui opera.

4.1 DEFINIZIONE PROPRIETÀ DEL MATERIALE E GEOMETRIA

Le prime righe del codice servono a definire come input i parametri relativi al materiale di cui si vuole effettuare l'analisi, come il modulo di Young E ed il coefficiente di Poisson ν . Oltre a questi viene introdotta una variabile *def* che può assumere valore 0 oppure 1 a seconda che si ricada nel caso di tensione piana o deformazione piana.

Sempre nelle prime righe del codice, viene chiesto all'utente di inserire come input l'angolo di apertura in gradi: questo serve per poter calcolare le variabili 2α e γ relativi all'intaglio.

Successivamente, vengono definite le 2 equazioni agli autovalori 1.3a - 1.3b (denominate s_1 e s_2) che, essendo trascendenti, è necessario calcolare numericamente. Per ricavare tali valori è stato impostato un ciclo *while* che le risolve per tentativi, andando ad incrementare il punto di partenza qualora non vengano rispettate le condizioni iniziali del ciclo, ovvero se il valore trovato eccede gli estremi in cui esso può assumere valore.

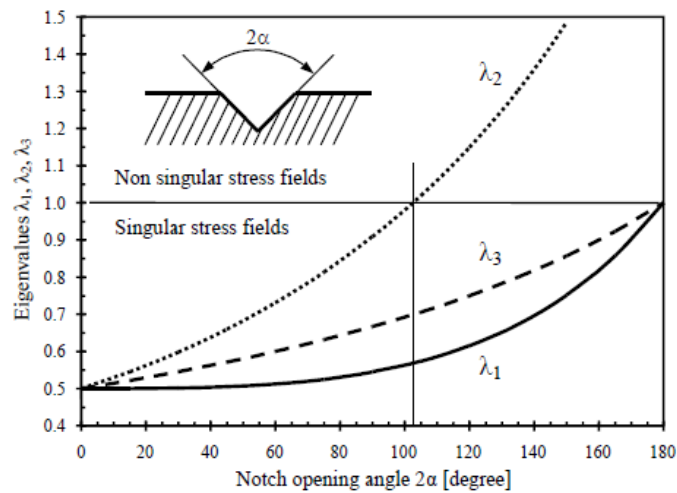


Fig. 4.1 - Valori di λ_i in funzione dell'angolo intaglio [9]

In figura sono riportati gli andamenti degli autovalori λ_i per i 3 Modi e si nota il range di validità spiegati poc'anzi:

$$0.5 \leq \lambda_1 < 1 \quad (4.1)$$

Per il caso di λ_2 viene fatta una distinzione a livello di angolo di apertura, in quanto dopo i 102° il campo di tensioni a Modo 2 non è più singolare e a livello di risoluzione dell'equazione agli autovalori, il punto iniziale di partenza risulta importante. Per questo motivo è stata introdotta una condizione per distinguere i 2 casi:

$$\begin{cases} 0.5 \leq \lambda_2 < 2 & \text{per } 2\alpha \leq 102^\circ \\ 1 & \text{per } 2\alpha > 102^\circ \end{cases} \quad (4.2)$$

A seguito di questo passaggio vengono quindi ricavate le due variabili λ_1 e λ_2 .

4.2 IMPORTAZIONE DATI DA ANSYS

Per poter calcolare i parametri relativi ad ogni elemento è necessario essere in possesso di tutte le coordinate nodali. Una volta risolto il modello in ANSYS, la procedura è quindi quella di esportare dal programma 3 file di testo contenenti rispettivamente:

1. coordinate nodali: sono riportate le coordinate di tutti i nodi del modello;
2. elementi: sono riportati gli elementi ed ogni nodo ad essi associati;
3. sene: contiene i valori di Strain Energy calcolati per ogni elemento.

Lo script Matlab andrà ad importare il contenuto di questi file per rielaborarlo secondo determinate considerazioni. Il primo passo è dunque quello di importare i dati dei 3 file, eliminare quelli superflui e riorganizzare i rimanenti in matrici.

NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX	ELEM	HAT	TYP	REL	ESY	SEC	NODES							
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00														
3	-0.71429	1.7244	0.0000	0.00	0.00	0.00	350	1	1	1	0	1	1282	1199	1269	1219	885	353	284	270
4	-1.4286	3.4489	0.0000	0.00	0.00	0.00	417	1	1	1	0	1	1219	4	1	143	271	3	142	269
142	1.9231	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	846	1	1	1	0	1	2562	143	1	1373	1612	142	1372	1614
143	3.8462	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00														
269	3.2924	1.9724	0.0000	0.00	0.00	0.00														
270	4.7677	4.0275	0.0000	0.00	0.00	0.00														
271	0.65500	3.6968	0.0000	0.00	0.00	0.00														
284	2.1545	5.8698	0.0000	0.00	0.00	0.00														
353	3.7146	8.0103	0.0000	0.00	0.00	0.00														
885	6.3279	6.1680	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1199	5.8589	8.2258	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1219	2.7386	3.9448	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1269	1.5703	7.7948	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1282	6.7969	4.1103	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1372	-0.71429	-1.7244	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1373	-1.4286	-3.4489	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1612	3.2924	-1.9724	0.0000	0.00	0.00	0.00														
1614	0.65500	-3.6968	0.0000	0.00	0.00	0.00														
2562	2.7386	-3.9448	0.0000	0.00	0.00	0.00														

(a)

(b)

Fig. 4.2 - a) File nodi; b) File elementi

Nella figura precedente vi sono 2 esempi di come vengono salvati i file delle coordinate dei nodi (Fig. 4.2a) e degli elementi (Fig. 4.2b). Si nota in Fig. 4.2a che i nodi sono elencati in ordine crescente, senza quindi nessuna informazione relativa all'elemento di appartenenza, a cui sono associate le 3 colonne relative alle coordinate nello spazio; e altre 3 colonne superflue, che verranno

eliminate in Matlab. Analogamente questo vale anche per il file degli elementi, che sono elencati nella prima colonna in ordine crescente, mentre le successive 13 colonne riportano i seguenti dati:

- colonne 2-6: dati relativi al tipo di elemento scelto;
- colonne 7-10: nodi dei vertici dell'elemento elencati dalla colonna 7 alla 10, seguendo il senso antiorario partendo da un nodo casuale;
- colonne 11-14: stesso criterio delle colonne 7-10 ma per i nodi delle mezzerie dei lati.

Per maggiore chiarezza, in Fig. 4.3, è riportato quanto appena spiegato per l'elemento n° 350 presente in Fig. 4.2b:

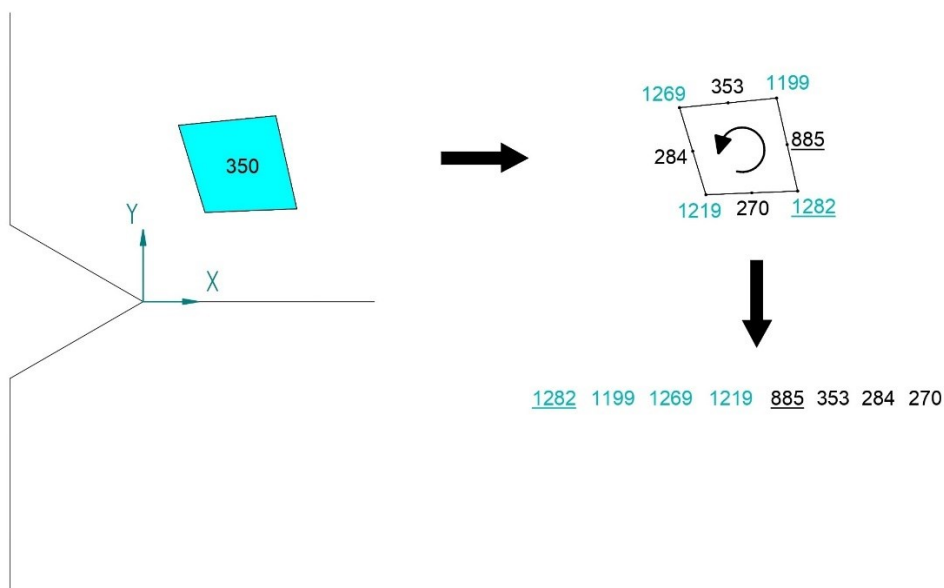


Fig. 4.3 - Organizzazione nodi elemento

Le colonne 2-6 e 11-14 riportano dati superflui ai fini dei calcoli e quindi vengono eliminate.

Una volta ottenute le matrici dei nodi e degli elementi, prima di ricavare la matrice delle coordinate nodali viene effettuata una scrematura di tutti gli elementi triangolari. Successivamente, per ottenere la suddetta matrice, il programma legge riga per riga la matrice degli elementi in cui sono elencati i

4 nodi che compongono l'elemento i-esimo, ricava dalla matrice dei nodi le coordinate X,Y relative ad ogni nodo e le riporta nella cosiddetta matrice delle coordinate nodali.

Essendo il primo nodo, nel file degli elementi, elencato in modo casuale (mentre, come visto nel Capitolo 3, la numerazione dei nodi parte sempre da quello in basso a sinistra), è necessario riorganizzare le righe della matrice delle coordinate.

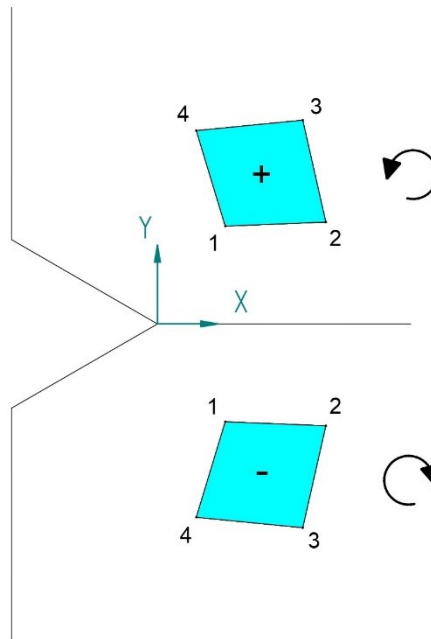


Fig. 4.4 - Sequenza nodi

In Fig. 4.4 è riportata la sequenza dei nodi anche per gli elementi al di sotto della bisettrice dell'intaglio.

Non conoscendo a priori quale sia il nodo di partenza per la numerazione dei nodi nel file, è stato ideato nel programma un metodo di verifica per identificare il primo nodo mediante il calcolo della distanza di ogni nodo da una specifica origine. L'idea è stata quella di trovare l'origine che più si avvicina a quello che dovrebbe essere il nodo 1 mediante le coordinate dei nodi dell'elemento analizzato. Le coordinate (x_0, y_0) dell'origine di riferimento vengono determinate come segue:

$$x_o = \min(x_i) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.3a)$$

$$y_o = \begin{cases} \min(y_i) & \text{se } \sum_{i=1}^4 y_i > 0 \\ \max(y_i) & \text{se } \sum_{i=1}^4 y_i < 0 \end{cases} \quad (4.3b)$$

In seguito, viene calcolata la distanza di ogni nodo dall'origine appena trovata, e il nodo 1 per la riorganizzazione delle righe è quello che fa riferimento alla distanza minore delle 4 trovate precedentemente. Questa operazione viene eseguita per ogni elemento presente nel file.

Alla fine di questo passaggio si ottiene una matrice delle coordinate, formata da un numero di righe pari al numero di elementi moltiplicato per il numero di nodi per elemento (4) e da 3 colonne (numero del nodo, coordinata X, coordinata Y).

Come ultimo step prima del calcolo dei dati di ogni elemento, viene importato in forma matriciale il file contenente i valori di *Strain Energy* di ogni elemento. La matrice sarà quindi formata da tante righe quanti sono gli elementi e da 2 colonne: n° di elemento e valore di *SE* associato.

4.3 CALCOLO DEI PARAMETRI DEGLI ELEMENTI E DEL K1

Una volta trovata la matrice delle coordinate, il programma prosegue con il calcolo dei parametri necessari per l'applicazione del metodo visto nel precedente capitolo. La parte centrale dello script è dunque un ciclo che ad ogni iterazione, partendo dal primo elemento, ricava dalla matrice delle coordinate una sottomatrice 4x2 contenente le coordinate dei nodi dell'elemento i-esimo oggetto di analisi.

Il primo passaggio per l'applicazione del metodo è capire in quale dei 6 casi visti nel Capitolo 3 l'elemento ricade. Per ogni nodo, viene quindi calcolato l'angolo che la retta passante per il nodo j-esimo e l'origine assoluta genera con l'ascissa. Una volta trovati i 4 angoli si risale al caso specifico mediante il seguente criterio:

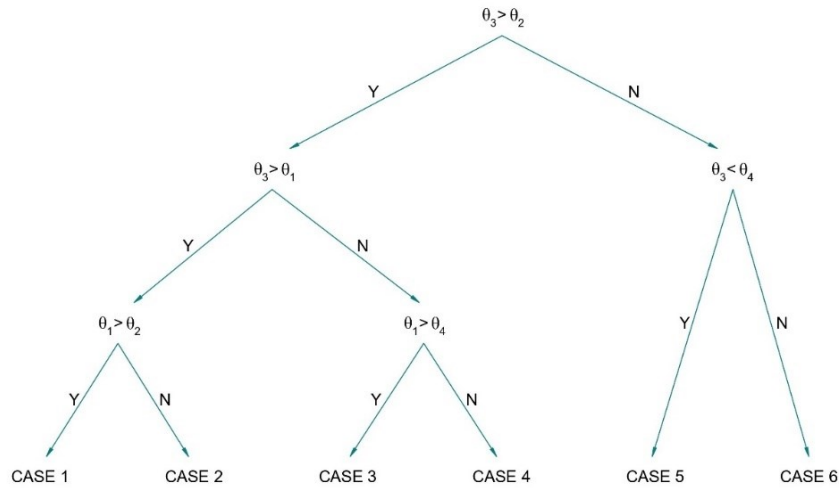


Fig. 4.5 - Algoritmo di determinazione caso elemento

Successivamente vengono calcolati tutti i parametri relativi all'area dell'elemento: m_i , q_i , d , ρ_i e in base al caso dell'elemento vengono assegnate tutte le variabili necessarie al calcolo degli integrali visti nel Capitolo 3.

A questo punto vengono definite tutte le variabili e le funzioni necessarie al calcolo degli integrali e poi si procede alla loro risoluzione.

Una volta acquisiti tutti i risultati, è possibile calcolare il valore del K_1 applicando la formula 3.13.

I risultati rilevanti ottenuti ad ogni iterazione, come i valori degli integrali, i lambda e altri dati, vengono salvati in rispettivi vettori che andranno infine a costituire una matrice appunto di risultati, salvata in un file di testo utilizzabile per l'analisi dei dati in un foglio di calcolo.

Il ciclo, quindi, termina e riparte con l'iterazione successiva fino a quando non sono stati passati in rassegna tutti gli elementi del modello in oggetto.

5. ANALISI

In questo capitolo vengono presentate le analisi effettuate in ANSYS® riguardanti alcune piastre bi-dimensionali che presentano un intaglio a spigolo vivo con differenti angoli di apertura.

Nel corso delle varie analisi sono stati seguiti diversi approcci, riguardanti la tipologia di mesh utilizzata e gli elementi oggetto di studio. In particolare, nel paragrafo 5.1 si è scelto di utilizzare una mesh omogenea per tutto il modello, variando solo la dimensione degli elementi. Nei paragrafi successivi, invece, i modelli sono stati discretizzati con una mesh globale rada, a cui è seguito un *refinement* nella zona circostante l'apice dell'intaglio.

Per quanto riguarda la grandezza degli elementi, per ogni piastra sono stati utilizzati elementi con dimensione progressivamente più piccola come si vedrà di seguito. Gli angoli di apertura intaglio 2α studiati sono: 135° , 90° , 60° e 45° . Nei paragrafi 5.1, 5.2 e 5.3 si è mantenuta una profondità d'intaglio a pari a 20 mm mentre nel paragrafo 5.4 verrà modificata.

Le geometrie oggetto di studio presentano la seguente condizione di vincolo e carico:

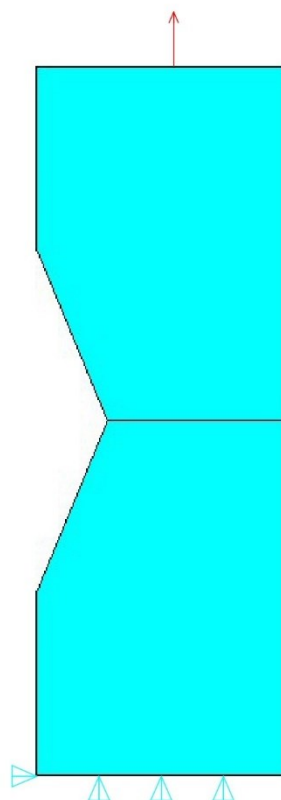


Fig. 5.1 - Vincoli e carichi applicati a piastra 2D con angolo intaglio 135 gradi

In figura è rappresentata una piastra avente angolo d'intaglio pari a 135 gradi, il carico applicato pari a 1 MPa indicato dalla freccia rossa, mentre i triangoli azzurri rendono nullo lo spostamento della linea e/o del nodo dove sono applicati.

5.1 MESH OMOGENEA

In questo paragrafo sono riportati i risultati relativi alle analisi condotte nelle quali la dimensione di elemento è la stessa in tutta la geometria. Le dimensioni utilizzate sono rispettivamente 8, 4, 2, 1 e 0.5 mm.

L'immagine sottostante riporta l'esempio per i casi con mesh globale da 8 mm (a sinistra) e 0.5 mm (a destra) e angolo di apertura intaglio pari a 135 gradi.

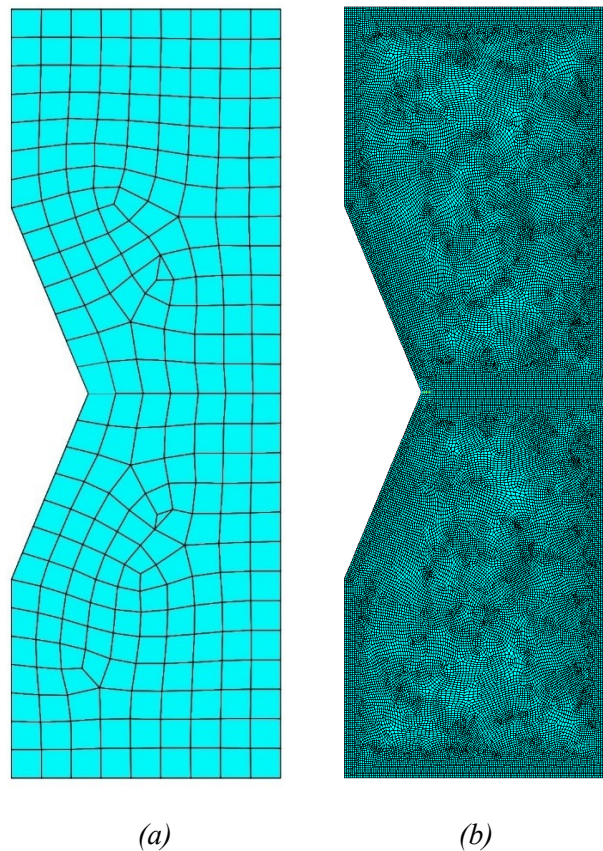


Fig. 5.2 - a) Mesh omogenea con elementi da 8 mm; b) Mesh omogenea con elementi da 0.5 mm

Si può notare che, al diminuire della dimensione globale, il numero totale di elementi costituenti la mesh aumenta in modo significativo, passando da 241 (caso $d = 8 \text{ mm}$) a 40572 elementi (caso $d = 0.5 \text{ mm}$).

Gli elementi oggetto di studio nelle varie analisi sono riportati in Fig. 5.3:

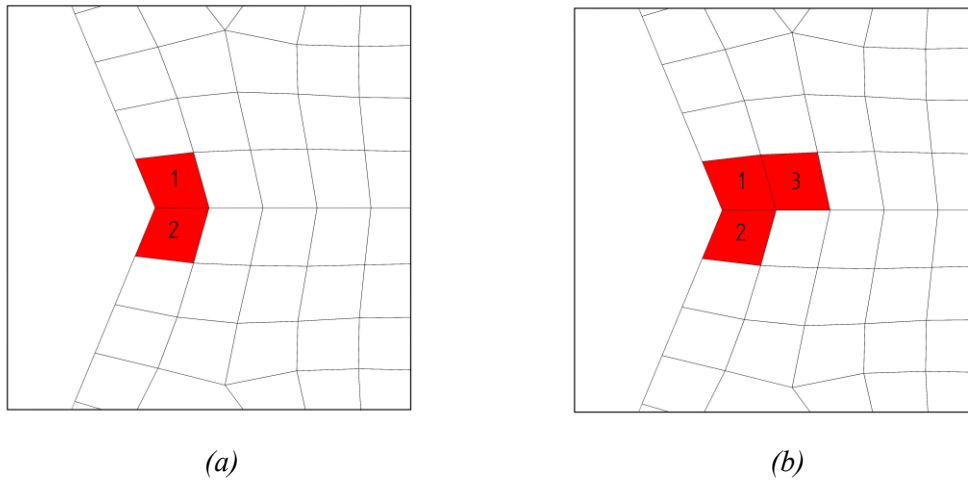


Fig. 5.3 - a) Analisi 2 elementi apice; b) Analisi 3 elementi apice

Nei prossimi paragrafi sono riportati i risultati dei diversi studi con variazione dell'angolo di intaglio.

5.1.1 135 GRADI

Tab. 5.1 - Risultati mesh omogenea, angolo intaglio 135 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.326}]	K1 calc [MPa mm ^{0.326}]	Var % [%]
1	112	7.1429	0.146731	0.001308	11.9059	11.3956	-4.2857
2	235	7.1429	0.146658	0.001307	11.9059	11.3958	-4.2839
3	113	7.1431	0.075811	0.000577	11.9059	10.5268	-11.5833
1	417	3.8462	0.134525	0.00054	11.9059	11.6046	-2.5306
2	846	3.8462	0.134525	0.00054	11.9059	11.6046	-2.5306
3	418	3.8461	0.066082	0.000246	11.9059	11.1718	-6.1655
1	1533	2	0.134668	0.000228	11.9059	11.7106	-1.6405
2	3088	2	0.134501	0.000228	11.9059	11.7109	-1.6378
3	1534	2	0.068056	0.000112	11.9059	11.555	-2.9475
1	5794	1	0.13579	9.12E-05	11.9059	11.7644	-1.1885
2	11776	1	0.13579	9.12E-05	11.9059	11.7644	-1.1885
3	5795	1	0.067728	4.55E-05	11.9059	11.7657	-1.1777
1	20219	0.5	0.136885	3.63E-05	11.9059	11.788	-0.9897
2	40473	0.5	0.136885	3.63E-05	11.9059	11.788	-0.9897
3	20220	0.5	0.068285	1.83E-05	11.9059	11.8671	-0.3254

Tab. 5.2 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh omogenea, angolo intaglio 135 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1429	11.9059	11.39535	0.9571179	-4.29	11.22245	0.9425956	-5.74
3.8462	11.9059	11.60409	0.9746502	-2.53	11.52009	0.9675952	-3.24
2	11.9059	11.71067	0.9836026	-1.64	11.67918	0.9809577	-1.90
1	11.9059	11.76242	0.9879491	-1.21	11.76273	0.9879752	-1.20
0.5	11.9059	11.78915	0.9901943	-0.98	11.80161	0.9912403	-0.88

5.1.2 90 GRADI

Tab. 5.3 - Risultati mesh omogenea, angolo intaglio 90 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 fine [MPa mm ^{0.456}]	K1 calc [MPa mm ^{0.456}]	Var % [%]
1	3	7.1429	0.089778	0.000456	13	11.0836	-14.7414
2	202	7.1429	0.099038	0.000518	13	11.2553	-13.4208
3	2	7.1431	0.054663	0.000328	13	12.0567	-7.2562
1	351	3.8462	0.117288	0.000325	13	11.4779	-11.7084
2	820	3.8462	0.10909	0.000302	13	11.4582	-11.8598
3	350	3.8461	0.044142	0.000137	13	12.1192	-6.775
1	6	2	0.108052	0.00015	13	11.5943	-10.813
2	3187	2	0.094023	0.000125	13	11.333	-12.8231
3	5	2	0.060389	9.55E-05	13	12.3736	-4.818
1	5608	1	0.118416	7.59E-05	13	11.4871	-11.6372
2	11373	1	0.093929	5.82E-05	13	11.2941	-13.1222
3	5607	1	0.037988	2.91E-05	13	12.5522	-3.4445
1	932	0.5	0.104229	3.12E-05	13	11.4609	-11.8388
2	39337	0.5	0.117114	3.62E-05	13	11.6389	-10.4699
3	931	0.5	0.040417	1.48E-05	13	12.6862	-2.4134

Tab. 5.4 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh omogenea, angolo intaglio 90 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1431	13	11.17356	0.8595045	-14.05	11.37771	0.8752083	-12.48
3.8461	13	11.46824	0.8821721	-11.78	11.57722	0.8905553	-10.94
2	13	11.47350	0.8825769	-11.74	11.68709	0.8990072	-10.10
1	13	11.40583	0.8773719	-12.26	11.58870	0.8914381	-10.86
0.5	13	11.55159	0.8885841	-11.14	11.73084	0.9023722	-9.76

5.1.3 60 GRADI

Tab. 5.5 - Risultati mesh omogenea, angolo intaglio 60 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.487}]	K1 calc [MPa mm ^{0.487}]	Var % [%]
1	84	7.1429	0.166701	0.000754	12.892	11.1499	-13.5128
2	223	7.1429	0.165799	0.000769	12.892	11.2898	-12.4281
3	83	7.1431	0.0584	0.000292	12.892	11.7318	-8.9993
1	390	3.8462	0.141401	0.000341	12.892	11.1837	-13.2511
2	883	3.8462	0.163072	0.00041	12.892	11.4138	-11.4663
3	389	3.8461	0.056583	0.000154	12.892	11.8758	-7.8822
1	1602	2	0.130589	0.000162	12.892	11.216	-13.0001
2	3337	2	0.160827	0.000208	12.892	11.4436	-11.2351
3	1601	2	0.052872	7.57E-05	12.892	12.0452	-6.5686
1	5616	1	0.130823	8.15E-05	12.892	11.3298	-12.1172
2	11364	1	0.131835	0.000082	12.892	11.3209	-12.1868
3	5615	1	0.052402	3.82E-05	12.892	12.26	-4.9022
1	19338	0.5	0.133634	4.13E-05	12.892	11.3808	-11.7216
2	39806	0.5	0.154255	4.92E-05	12.892	11.5619	-10.3169
3	19337	0.5	0.053608	1.97E-05	12.892	12.4001	-3.8156

Tab. 5.6 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh omogenea, angolo intaglio 60 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1431	12.892	11.22031	0.8703308	-12.97	11.29815	0.8763691	-12.36
3.8461	12.892	11.30794	0.8771288	-12.29	11.39899	0.8841910	-11.58
2	12.892	11.34246	0.8798059	-12.02	11.45259	0.8883485	-11.17
1	12.892	11.32394	0.8783694	-12.16	11.48392	0.8907791	-10.92
0.5	12.892	11.47712	0.8902516	-10.97	11.62836	0.9019827	-9.80

5.1.4 45 GRADI

Tab. 5.7 - Risultati mesh omogenea, angolo intaglio 45 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.495}]	K1 calc [MPa mm ^{0.495}]	Var % [%]
1	102	7.1429	0.213632	0.000994	12.834	11.4716	-10.6159
2	218	7.1429	0.213599	0.000994	12.834	11.4692	-10.6343
3	101	7.1431	0.07532	0.000372	12.834	11.8171	-7.9233
1	409	3.8462	0.178254	0.000441	12.834	11.4324	-10.9211
2	849	3.8462	0.174915	0.00043	12.834	11.4029	-11.1511
3	408	3.8461	0.063715	0.00017	12.834	11.8586	-7.6004
1	1598	2	0.176819	0.000225	12.834	11.3953	-11.2102
2	3181	2	0.176788	0.000225	12.834	11.4027	-11.1529
3	1597	2	0.059049	8.26E-05	12.834	11.9592	-6.8166
1	5917	1	0.148766	9.32E-05	12.834	11.3602	-11.4839
2	12100	1	0.148766	9.32E-05	12.834	11.3602	-11.4835
3	5916	1	0.061685	0.000044	12.834	12.1263	-5.5144
1	19017	0.5	0.15033	4.73E-05	12.834	11.4299	-10.9405
2	38941	0.5	0.149206	0.000047	12.834	11.4275	-10.9594
3	19016	0.5	0.062394	2.26E-05	12.834	12.2719	-4.3802

Tab. 5.8 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh omogenea, angolo intaglio 45 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1431	12.834	11.47049	0.8937580	-10.62	11.52322	0.8978665	-10.21
3.8461	12.834	11.41787	0.8896577	-11.03	11.48656	0.8950104	-10.50
2	12.834	11.39916	0.8882001	-11.18	11.48137	0.8946057	-10.54
1	12.834	11.36030	0.8851720	-11.48	11.49467	0.8956420	-10.44
0.5	12.834	11.42840	0.8904782	-10.95	11.57575	0.9019595	-9.80

5.1.5 PANORAMICA RISULTATI MESH OMOGENEA

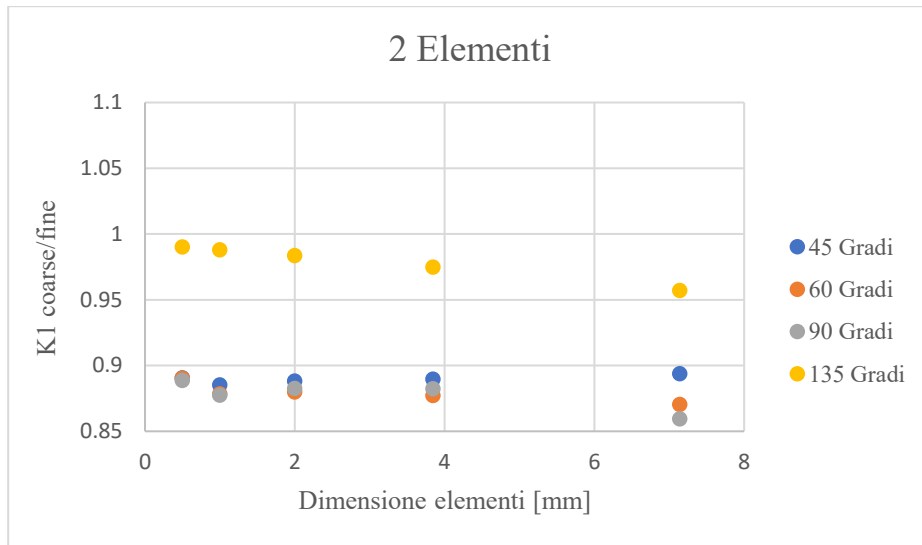


Fig. 5.4 - Risultati analisi su 2 elementi con mesh omogenea, $2\alpha = 45, 60, 90$ e 135 gradi

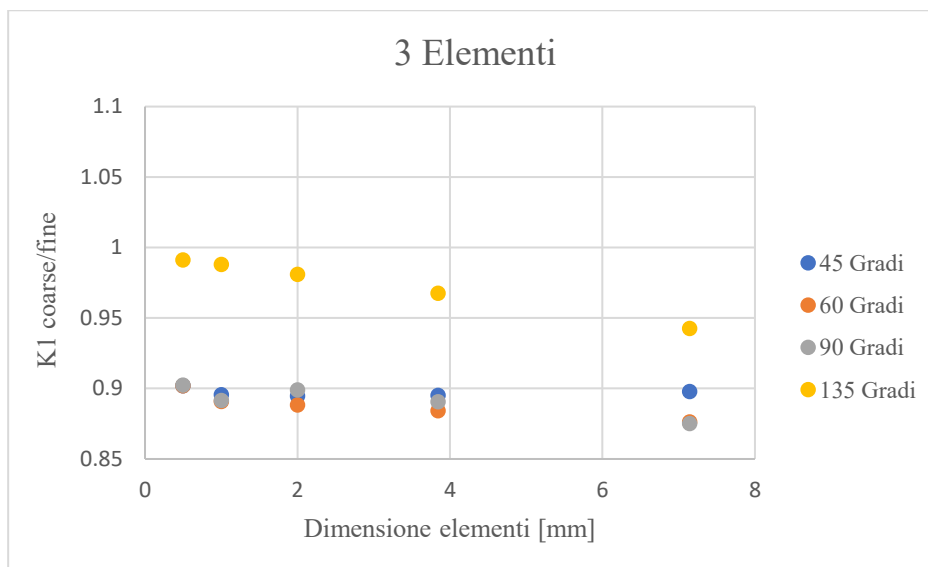


Fig. 5.5 - Risultati analisi su 3 elementi con mesh omogenea, $2\alpha = 45, 60, 90$ e 135 gradi

5.2 MESH REFINEMENT

In questa sezione sono riportati i risultati relativi alle analisi effettuate sulle stesse piastre viste nel paragrafo 5.1: in questo caso, però, è stata eseguita una mesh globale con elementi di dimensione circa 8 - 10 mm e un refinement, di diversa entità in base all'analisi, nella zona circostante l'apice dell'incisione. Le dimensioni di elemento pari a 4, 2, 1 e 0.5 mm si è cercato di ottenerle per gli elementi della zona dell'incisione.

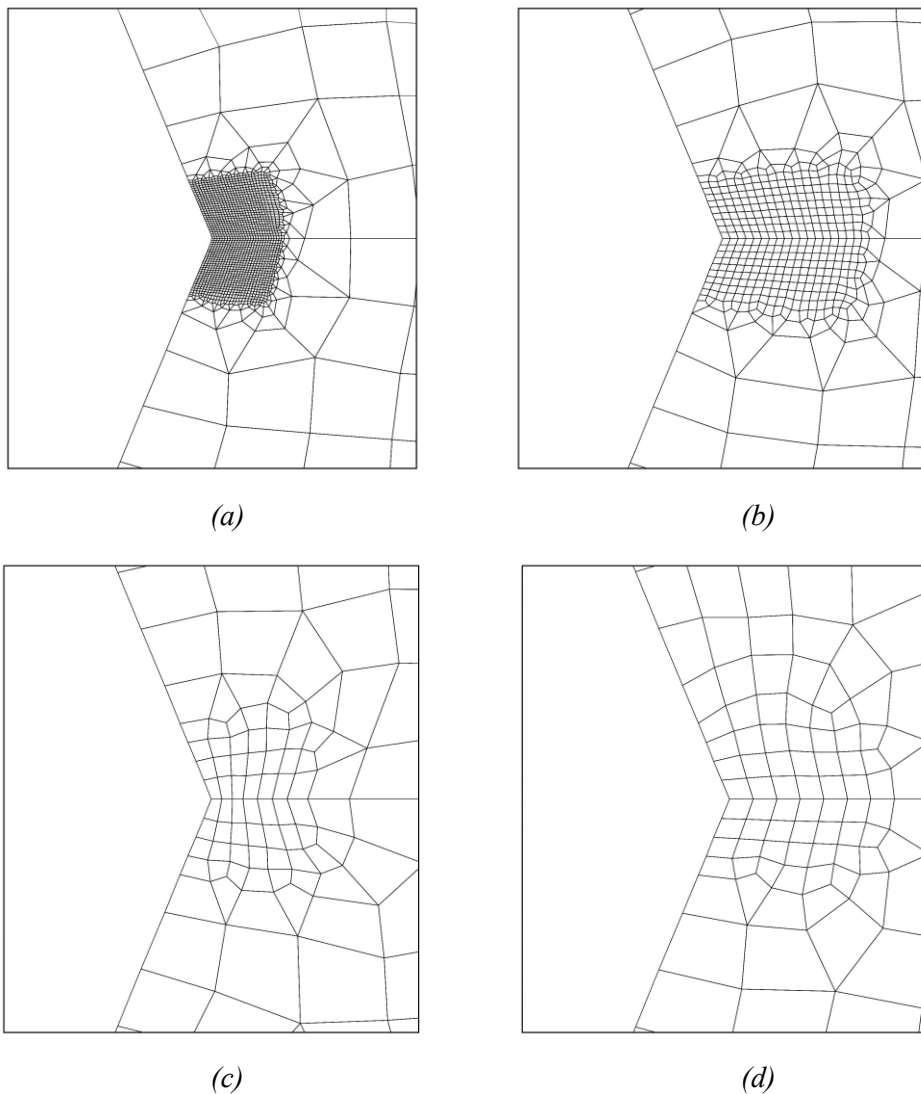


Fig. 5.6 - Livelli di refinement zona apice intaglio,
a) 0.5 mm; b) 1 mm; c) 2 mm; d) 4 mm

5.2.1 135 GRADI

Tab. 5.9 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 135 gradi

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1 fine	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.326}]	[MPa mm ^{0.326}]	[%]
1	73	7.1431	0.083318	0.0006362	11.9059	10.5483	-11.4022
2	147	7.1429	0.157368	0.0014044	11.9059	11.4042	-4.2136
3	72	7.1429	0.160001	0.0014278	11.9059	11.4038	-4.2167
1	49	3.3333	0.122223	0.0004063	11.9059	11.6304	-2.3142
2	105	3.3333	0.117700	0.0003915	11.9059	11.634	-2.2833
3	179	3.3334	0.058651	0.0001836	11.9059	11.2868	-5.1996
1	66	1.4825	0.237813	0.0002734	11.9059	11.804	-0.8555
2	134	1.4825	0.237857	0.0002734	11.9059	11.8027	-0.8664
3	194	1.4825	0.151652	0.0001682	11.9059	11.5932	-2.6260
1	448	1.1111	0.115044	0.0000889	11.9059	11.7524	-1.2891
2	239	1.1111	0.114123	0.0000882	11.9059	11.7534	-1.2804
3	449	1.1111	0.052158	0.0000404	11.9059	11.7597	-1.2282
1	1703	0.3704	0.113632	0.0000201	11.9059	11.7847	-1.0182
2	866	0.3704	0.113605	0.0000201	11.9059	11.7846	-1.0188
3	1704	0.3704	0.050594	0.0000091	11.9059	11.9056	-0.0022

Tab. 5.10 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 135 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1429	11.9059	11.40364	0.9578144	-4.22	11.23115	0.9433265	-5.67
3.3333	11.9059	11.63153	0.9769553	-2.30	11.56435	0.9713124	-2.87
1.4825	11.9059	11.80357	0.9914049	-0.86	11.75329	0.9871822	-1.28
1.1111	11.9059	11.75296	0.9871540	-1.28	11.75547	0.9873647	-1.26
0.3704	11.9059	11.78556	0.9898927	-1.01	11.80347	0.9913967	-0.86

5.2.2 90 GRADI

Tab. 5.11 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 90 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.456}]	K1 calc [MPa mm ^{0.456}]	Var % [%]
1	75	7.1429	0.175218	0.000933	13	11.3533	-12.6666
2	150	7.1429	0.173496	0.000925	13	11.3593	-12.6205
3	74	7.1431	0.059335	0.000341	13	11.7943	-9.2745
1	206	3.3333	0.155415	0.000379	13	11.6371	-10.4836
2	172	3.3333	0.139961	0.000334	13	11.5057	-11.4946
3	207	3.3334	0.059664	0.000159	13	12.175	-6.3464
1	204	1.7868	0.260954	0.000318	13	11.5469	-11.1776
2	168	1.7868	0.238668	0.000289	13	11.5162	-11.4134
3	205	1.7869	0.098544	0.000133	13	12.1566	-6.4874
1	227	1.1111	0.176241	0.000136	13	11.8904	-8.5353
2	267	1.1111	0.150060	0.000113	13	11.7617	-9.5253
3	228	1.1111	0.070910	0.000060	13	12.5112	-3.7602
1	1348	0.3704	0.174092	0.000041	13	11.962	-7.9847
2	831	0.3704	0.154031	0.000035	13	11.7538	-9.5863
3	1347	0.3704	0.069473	0.000018	13	12.6875	-2.4034

Tab. 5.12 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 90 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1431	13	11.35579	0.8735221	-12.65	11.42052	0.8785013	-12.15
3.3333	13	11.57510	0.8903926	-10.96	11.67809	0.8983146	-10.17
1.7868	13	11.53230	0.8871003	-11.29	11.63729	0.8951761	-10.48
1.1111	13	11.83178	0.9101368	-8.99	11.95529	0.9196376	-8.04
0.3704	13	11.86262	0.9125092	-8.75	12.01040	0.9238767	-7.61

5.2.3 60 GRADI

Tab. 5.13 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 60 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.487}]	K1 calc [MPa mm ^{0.487}]	Var % [%]
1	203	7.1429	0.166701	0.000754	12.892	11.1499	-13.5128
2	104	7.1429	0.165799	0.000769	12.892	11.2898	-12.4281
3	202	7.1431	0.058400	0.000292	12.892	11.7318	-8.9993
1	11	3.7805	0.336023	0.000893	12.892	11.841	-8.1523
2	247	3.7805	0.225034	0.000514	12.892	10.973	-14.8856
3	124	4.3093	0.147508	0.000471	12.892	12.1333	-5.8852
1	276	2.3808	0.197313	0.000313	12.892	11.596	-10.0526
2	257	2.3808	0.195195	0.000310	12.892	11.5991	-10.029
3	277	2.3809	0.074604	0.000130	12.892	12.1614	-5.6673
1	541	0.7936	0.195733	0.000100	12.892	11.5371	-10.51
2	356	0.7936	0.189307	0.000097	12.892	11.5579	-10.3479
3	542	0.7936	0.071639	0.000042	12.892	12.3525	-4.185
1	2256	0.2645	0.198492	0.000033	12.892	11.6087	-9.954
2	982	0.2645	0.190296	0.000032	12.892	11.6178	-9.8834
3	2255	0.2645	0.073688	0.000014	12.892	12.5195	-2.8895

Tab. 5.14 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 60 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1429	12.892	11.22031	0.8703308	-12.97	11.29815	0.8763691	-12.36
3.7805	12.892	11.50115	0.8921150	-10.79	11.65047	0.9036973	-9.63
2.3808	12.892	11.59753	0.8995915	-10.04	11.68976	0.9067454	-9.33
0.7936	12.892	11.54800	0.8957496	-10.43	11.67850	0.9058720	-9.41
0.2645	12.892	11.61541	0.9009779	-9.90	11.76735	0.9127641	-8.72

5.2.4 45 GRADI

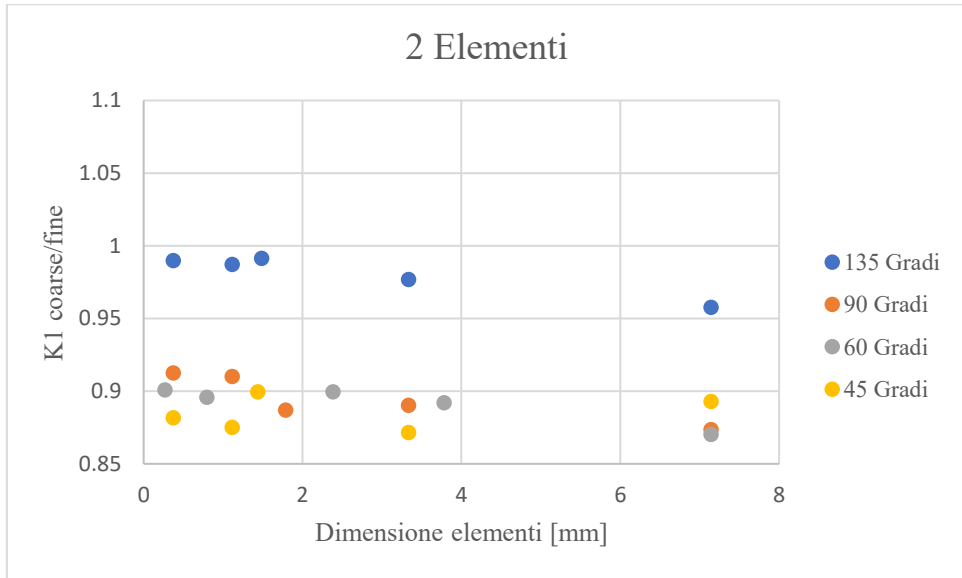
Tab. 5.15 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 45 gradi

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1_calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.495}]	[MPa mm ^{0.495}]	[%]
1	10	7.1429	0.201538	0.000925	12.834	11.3905	-11.2475
2	156	7.1429	0.225372	0.001058	12.834	11.5216	-10.2263
3	11	7.1431	0.078748	0.000398	12.834	11.9577	-6.8281
1	210	3.3333	0.147394	0.000303	12.834	11.2075	-12.6735
2	180	3.3333	0.140247	0.000286	12.834	11.1628	-13.0218
3	211	3.3334	0.048693	0.000110	12.834	11.7637	-8.3398
1	248	1.4358	0.288368	0.000274	12.834	11.6635	-9.1207
2	205	1.4358	0.268311	0.000245	12.834	11.4147	-11.0587
3	249	1.4359	0.122046	0.000125	12.834	12.1008	-5.7133
1	457	1.1111	0.150425	0.000103	12.834	11.2657	-12.2203
2	272	1.1111	0.137194	0.000093	12.834	11.1921	-12.7936
3	458	1.1111	0.053403	0.000042	12.834	12.0977	-5.7374
1	2176	0.3704	0.145990	0.000034	12.834	11.3567	-11.5107
2	893	0.3704	0.132519	0.000030	12.834	11.2801	-12.1078
3	2175	0.3704	0.051376	0.000014	12.834	12.3536	-3.7437

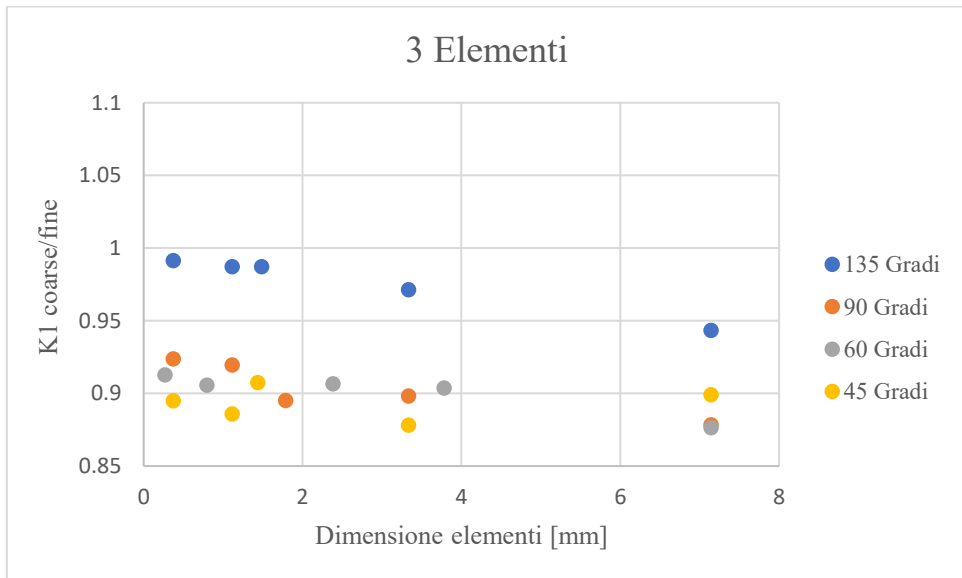
Tab. 5.16 - Risultati studio 2 e 3 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 45 gradi

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1429	12.834	11.46008	0.8929470	-10.71	11.53900	0.8990965	-10.09
3.3333	12.834	11.18566	0.8715643	-12.84	11.27152	0.8782549	-12.17
1.4358	12.834	11.54470	0.8995405	-10.05	11.64649	0.9074712	-9.25
1.1111	12.834	11.23148	0.8751347	-12.49	11.37148	0.8860435	-11.40
0.3704	12.834	11.31677	0.8817801	-11.82	11.48747	0.8950813	-10.49

5.2.5 PANORAMICA RISULTATI MESH REFINEMENT



*Fig. 5.7 – Risultati analisi su 2 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 45, 60, 90$ e 135 gradi*



*Fig. 5.8 – Risultati analisi su 3 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 45, 60, 90$ e 135 gradi*

5.3 ANALISI ELEMENTI BORDO INTAGLIO

Per le analisi in cui viene fatto il refinement della mesh a bordo intaglio, è stata provata anche un'ulteriore strada per calcolare il K1, cioè quella di prendere in considerazione i 4 elementi che “abbracciano” l'apice dell'intaglio, indicati in fig. 5.9:

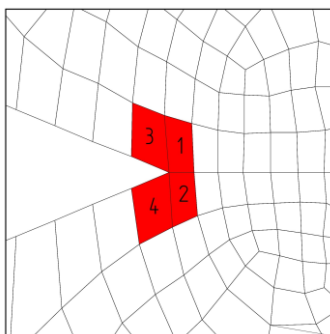


Fig. 5.9 - Elementi bordo intaglio analizzati, $2\alpha = 45$ gradi

Le modalità sono le stesse del paragrafo 5.2, mesh grossolana e refinement nella zona dell'intaglio, cambia parzialmente l'attenzione sugli elementi analizzati, come si può notare nell'immagine sottostante, raffigurante i 4 elementi studiati nei diversi casi di apertura dell'angolo intaglio.

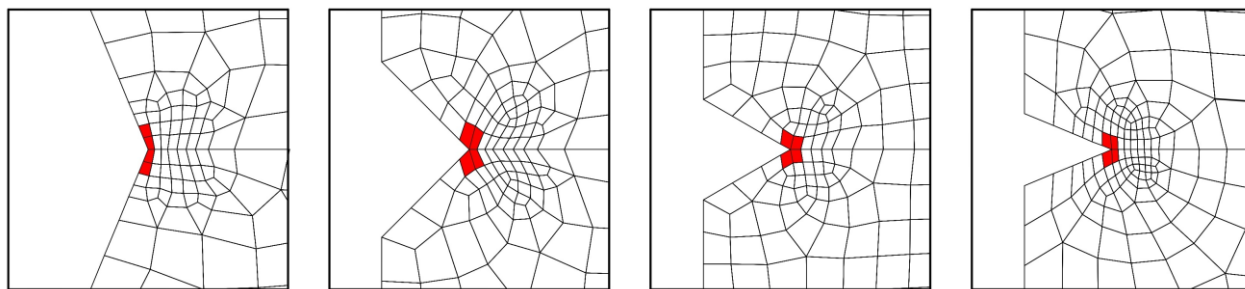


Fig. 5.10 - Elementi dell'apice analizzati per angolo intaglio 135, 90, 60 e 45gradi

Anche in questo caso sono riportati i risultati relativi a $2\alpha = 135, 90, 60$ e 45 gradi.

5.3.1 135 GRADI

Tab. 5.17 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 135 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.326}]	K1 calc [MPa mm ^{0.326}]	Var % [%]
1	72	7.1429	0.160001	0.001428	11.9059	11.4038	-4.2167
2	147	7.1429	0.157368	0.001404	11.9059	11.4042	-4.2136
3	146	7.7606	0.084173	0.000838	11.9059	11.3899	-4.3338
4	71	7.7469	0.090788	0.000893	11.9059	11.3334	-4.8085
1	49	3.3333	0.122223	0.000406	11.9059	11.6304	-2.3142
2	105	3.3333	0.117700	0.000392	11.9059	11.634	-2.2833
3	143	3.4597	0.070508	0.000262	11.9059	11.9921	0.7241
4	175	3.5452	0.077364	0.000295	11.9059	11.9524	0.391
1	66	1.4825	0.237813	0.000273	11.9059	11.804	-0.8555
2	134	1.4825	0.237857	0.000273	11.9059	11.8027	-0.8664
3	164	1.9528	0.098524	0.000169	11.9059	11.9634	0.4828
4	190	1.945	0.098969	0.000168	11.9059	11.9616	0.4679
1	448	1.1111	0.115044	0.000089	11.9059	11.7524	-1.2891
2	239	1.1111	0.114123	0.000088	11.9059	11.7534	-1.2804
3	240	1.1179	0.070818	0.000059	11.9059	12.1632	2.1612
4	447	1.1251	0.070894	0.000060	11.9059	12.1613	2.1452
1	1703	0.3704	0.113632	0.000020	11.9059	11.7847	-1.0182
2	866	0.3704	0.113605	0.000020	11.9059	11.7846	-1.0188
3	867	0.3709	0.070061	0.000013	11.9059	12.1977	2.4514
4	1708	0.3709	0.070107	0.000013	11.9059	12.1976	2.4501

Tab. 5.18 - Risultati studio 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 135 gradi

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.7606	11.9059	11.38721	0.9564338	-4.36
3.5452	11.9059	11.76720	0.9883506	-1.16
1.9528	11.9059	11.86291	0.9963891	-0.36
1.1251	11.9059	11.91310	1.0006050	0.06
0.3709	11.9059	11.94377	1.0031809	0.32

5.3.2 90 GRADI

Tab. 5.19 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 90 gradi

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.456}]	[MPa mm ^{0.456}]	[%]
1	75	7.1429	0.175218	0.000933	13	11.3533	-12.6666
2	150	7.1429	0.173496	0.000925	13	11.3593	-12.6205
3	122	3.1276	0.389560	0.001163	13	13.3297	2.5366
4	47	6.6667	0.174669	0.001178	13	13.2693	2.0714
1	206	3.3333	0.155415	0.000379	13	11.6371	-10.4836
2	172	3.3333	0.139961	0.000334	13	11.5057	-11.4946
3	174	1.7685	0.282857	0.000476	13	13.643	4.9463
4	188	2.2222	0.252802	0.000536	13	13.5295	4.0734
1	204	1.7868	0.260954	0.000318	13	11.5469	-11.1776
2	168	1.7868	0.238668	0.000289	13	11.5162	-11.4134
3	148	1.428	0.339575	0.000461	13	13.7705	5.9267
4	190	2.2222	0.208353	0.000455	13	13.731	5.6231
1	227	1.1111	0.176241	0.000136	13	11.8904	-8.5353
2	267	1.1111	0.150060	0.000113	13	11.7617	-9.5253
3	253	0.7229	0.278634	0.000178	13	13.6702	5.1552
4	221	0.7407	0.303977	0.000196	13	13.5534	4.2572
1	1348	0.3704	0.174092	0.000041	13	11.962	-7.9847
2	831	0.3704	0.154031	0.000035	13	11.7538	-9.5863
3	999	0.2317	0.229534	0.000044	13	14.0018	7.7062
4	1155	0.2469	0.282119	0.000057	13	13.8705	6.696

Tab. 5.20 - Risultati studio 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 90 gradi

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1429	13	12.32467	0.9480515	-5.19
3.3333	13	12.63361	0.9718160	-2.82
2.2222	13	12.72285	0.9786805	-2.13
1.1111	13	12.80656	0.9851197	-1.49
0.3704	13	12.91909	0.9937762	-0.62

5.3.3 60 GRADI

Tab. 5.21 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 60 gradi

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.487}]	K1 calc [MPa mm ^{0.487}]	Var % [%]
1	203	7.1429	0.166701	0.000754	12.892	11.1499	-13.5128
2	104	7.1429	0.165799	0.000769	12.892	11.2898	-12.4281
3	105	6.6667	0.133737	0.000847	12.892	13.6642	5.9895
4	204	6.6667	0.146941	0.000909	12.892	13.5049	4.7538
1	11	3.7805	0.336023	0.000893	12.892	11.841	-8.1523
2	247	3.7805	0.225034	0.000514	12.892	10.973	-14.8856
3	207	6.6667	0.100927	0.000671	12.892	14.0085	8.6604
4	2	6.6667	0.054528	0.000360	12.892	13.9531	8.2305
1	276	2.3808	0.197313	0.000313	12.892	11.596	-10.0526
2	257	2.3808	0.195195	0.000310	12.892	11.5991	-10.029
3	259	2.2222	0.148762	0.000321	12.892	14.0052	8.6348
4	284	2.2222	0.160585	0.000342	12.892	13.9083	7.8828
1	541	0.7936	0.195733	0.000100	12.892	11.5371	-10.51
2	356	0.7936	0.189307	0.000097	12.892	11.5579	-10.3479
3	448	0.7407	0.147627	0.000110	12.892	14.442	12.0227
4	677	0.7407	0.161039	0.000117	12.892	14.2599	10.6107
1	2256	0.2645	0.198492	0.000033	12.892	11.6087	-9.954
2	982	0.2645	0.190296	0.000032	12.892	11.6178	-9.8834
3	1816	0.2469	0.151995	0.000037	12.892	14.5189	12.6194
4	3482	0.2469	0.166104	0.000040	12.892	14.3362	11.2027

Tab. 5.22 - Risultati studio 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 60 gradi

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1429	12.892	12.31595	0.9553169	-4.47
3.7805	12.892	12.38120	0.9603785	-3.96
2.2222	12.892	12.64975	0.9812095	-1.88
0.7936	12.892	12.82009	0.9944223	-0.56
0.2645	12.892	12.90297	1.0008510	0.09

5.3.4 45 GRADI

Tab. 5.23 - Risultati mesh refinement, angolo intaglio 45 gradi

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.495}]	[MPa mm ^{0.495}]	[%]
1	10	7.1429	0.201538	0.000925	12.834	11.3905	-11.2475
2	156	7.1429	0.225372	0.001058	12.834	11.5216	-10.2263
3	151	6.6667	0.145512	0.000877	12.834	13.516	5.3135
4	75	6.6667	0.136575	0.000834	12.834	13.6091	6.0396
1	210	3.3333	0.147394	0.000303	12.834	11.2075	-12.6735
2	180	3.3333	0.140247	0.000286	12.834	11.1628	-13.0218
3	182	2.2222	0.202985	0.000414	12.834	13.6952	6.7098
4	216	2.2222	0.221005	0.000442	12.834	13.5553	5.6197
1	248	1.4358	0.288368	0.000274	12.834	11.6635	-9.1207
2	205	1.4358	0.268311	0.000245	12.834	11.4147	-11.0587
3	155	2.2222	0.124649	0.000272	12.834	14.1737	10.4387
4	71	2.2222	0.104663	0.000232	12.834	14.2885	11.3331
1	457	1.1111	0.150425	0.000103	12.834	11.2657	-12.2203
2	272	1.1111	0.137194	0.000093	12.834	11.1921	-12.7936
3	364	0.7407	0.194748	0.000136	12.834	13.9465	8.6678
4	593	0.7407	0.204589	0.000142	12.834	13.9239	8.4924
1	2176	0.3704	0.145990	0.000034	12.834	11.3567	-11.5107
2	893	0.3704	0.132519	0.000030	12.834	11.2801	-12.1078
3	1727	0.2469	0.192897	0.000045	12.834	13.9843	8.9626
4	3402	0.2469	0.200721	0.000047	12.834	14.0166	9.2141

Tab. 5.24 - Risultati studio 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 45 gradi

d	K1	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.1429	12.834	12.30372	0.9586817	-4.13
3.3333	12.834	12.45088	0.9701478	-2.99
2.2222	12.834	12.65957	0.9864087	-1.36
1.1111	12.834	12.60102	0.9818464	-1.82
0.3704	12.834	12.68744	0.9885807	-1.14

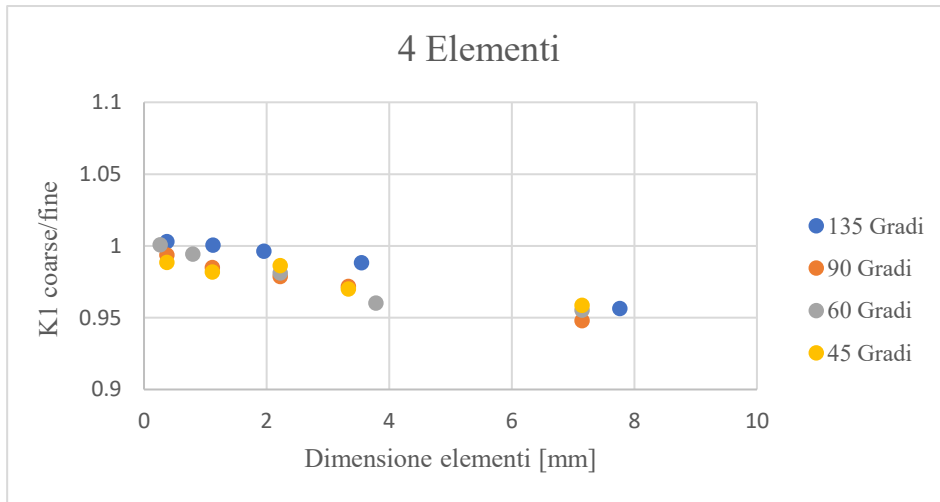


Fig. 5.11 - Risultati analisi su 4 elementi con mesh refinement
 $2\alpha = 45, 60, 90$ e 135 gradi

5.4 VARIAZIONE PROFONDITÀ INTAGLIO

In questo paragrafo vengono presentati i risultati relativi agli studi effettuati su piastre in cui, rispetto ai paragrafi precedenti, viene fatta variare la profondità d'intaglio a . In particolare, verranno mostrati 2 casi:

- Profondità $a = 5$ mm;
- Profondità $a = 10$ mm.

Gli elementi oggetto di analisi sono i medesimi dei paragrafi 5.2 e 5.3, analizzati su piastre aventi angolo d'apertura di 135, 90, 60 e 45 gradi, con dimensione degli elementi nella zona dell'apice pari a 8, 4, 2, 1 e 0.5 mm.

5.4.1 PROFONDITÀ 5 mm

5.4.1.1 135 GRADI

$$K_{1\text{fine}} = 5.1085 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.326}$$

Tab. 5.25 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 135 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
8.125	5.13170	1.0045413	0.45	5.35885	1.0490056	4.90	5.13438	1.0050653	0.51
4.236	5.02637	0.9839225	-1.61	5.13170	1.0045424	0.45	4.93446	0.9659313	-3.41
2.7083	5.04049	0.9866877	-1.33	5.08664	0.9957201	-0.43	5.06783	0.9920390	-0.80
0.9171	5.04551	0.9876699	-1.23	5.06123	0.9907467	-0.93	5.10376	0.9990723	-0.09
0.3014	5.02668	0.9839841	-1.60	5.05383	0.9892987	-1.07	5.11037	1.0003663	0.04

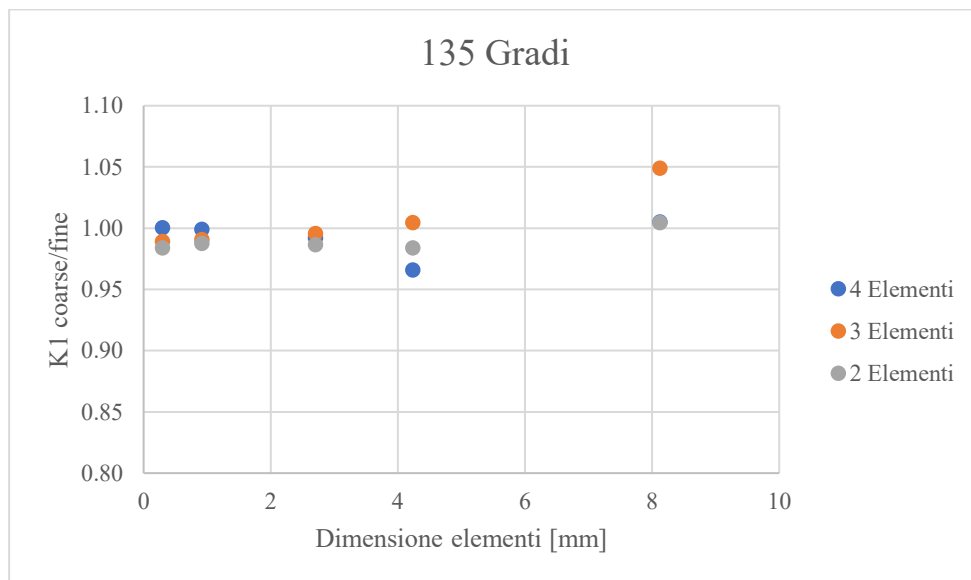


Fig. 5.12 - Risultati analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 135$ gradi, $a = 5$ mm

5.4.1.2 90 GRADI

$$K_{1_{fine}} = 4.957 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.456}$$

Tab. 5.26 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 90 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.0999	6.07131	1.2247945	22.48	5.800113	1.1700852	17.01	5.32661	1.0745634	7.46
3.6318	5.06679	1.0221494	2.21	5.487752	1.1070712	10.71	5.22438	1.0539389	5.39
2.3666	4.66242	0.9405723	-5.94	4.803331	0.9689996	-3.10	4.95552	0.9997008	-0.03
0.9028	4.51978	0.9117973	-8.82	4.576535	0.9232468	-7.68	4.91075	0.9906689	-0.93
0.3009	4.50334	0.9084803	-9.15	4.555143	0.9189315	-8.11	4.92511	0.9935673	-0.64

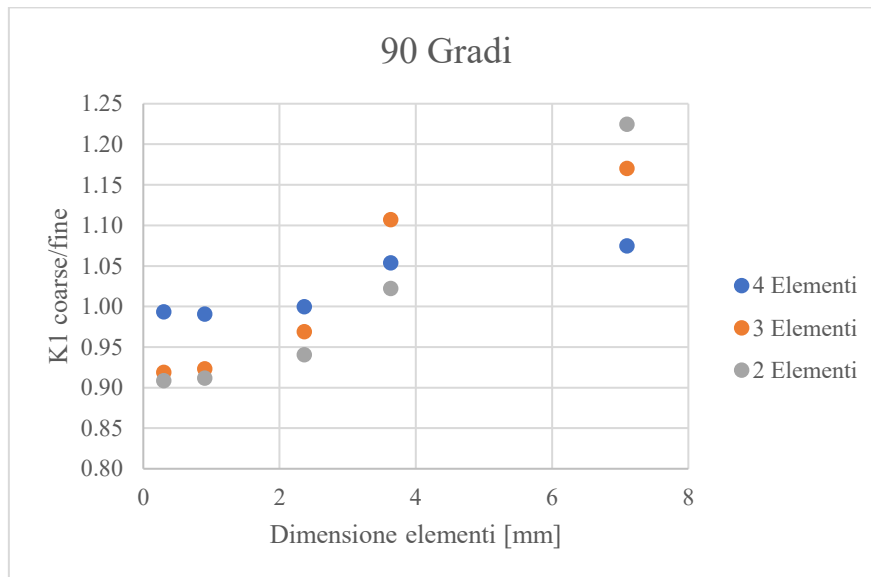


Fig. 5.13 - Risultati analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 90$ gradi, $a = 5$ mm

5.4.1.3 60 GRADI

$$K_{1_{fine}} = 4.7 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.489}$$

Tab. 5.27 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 60 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
10.296	4.99792	1.0633866	6.34	5.519975	1.1744627	17.45	5.59132	1.1896431	18.96
5	4.75678	1.0120806	1.21	5.041808	1.0727251	7.27	5.22367	1.1114184	11.14
2.1201	4.41947	0.9403124	-5.97	4.612363	0.9813538	-1.86	4.84452	1.0307487	3.07
0.5556	4.47176	0.9514377	-4.86	4.487888	0.9548698	-4.51	4.75983	1.0127293	1.27
0.1852	4.51929	0.9615512	-3.84	4.524885	0.9627415	-3.73	4.83179	1.0280413	2.80

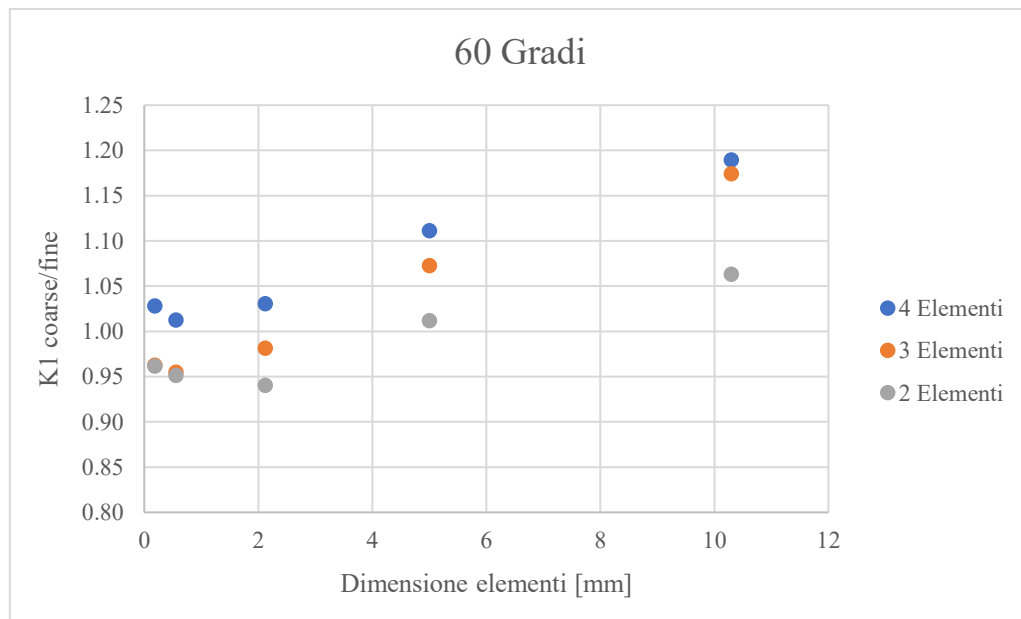


Fig. 5.14 - Risultati analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 60$ gradi, $a = 5$ mm

5.4.1.4 45 GRADI

$$K_{1\text{fine}} = 4.6684 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.495}$$

Tab. 5.28 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 45 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
8.125	6.57896	1.4092534	40.93	6.24158	1.3369848	33.70	5.53595	1.1858353	18.58
4.3871	5.48724	1.1753996	17.54	5.686476	1.2180781	21.81	5.46455	1.1705402	17.05
2.7083	4.60368	0.9861374	-1.39	4.779671	1.0238350	2.38	4.83052	1.0347269	3.47
0.9028	4.34218	0.9301215	-6.99	4.391267	0.9406364	-5.94	4.63444	0.9927246	-0.73
0.3009	4.22626	0.9052906	-9.47	4.273672	0.9154468	-8.46	4.60862	0.9871940	-1.28

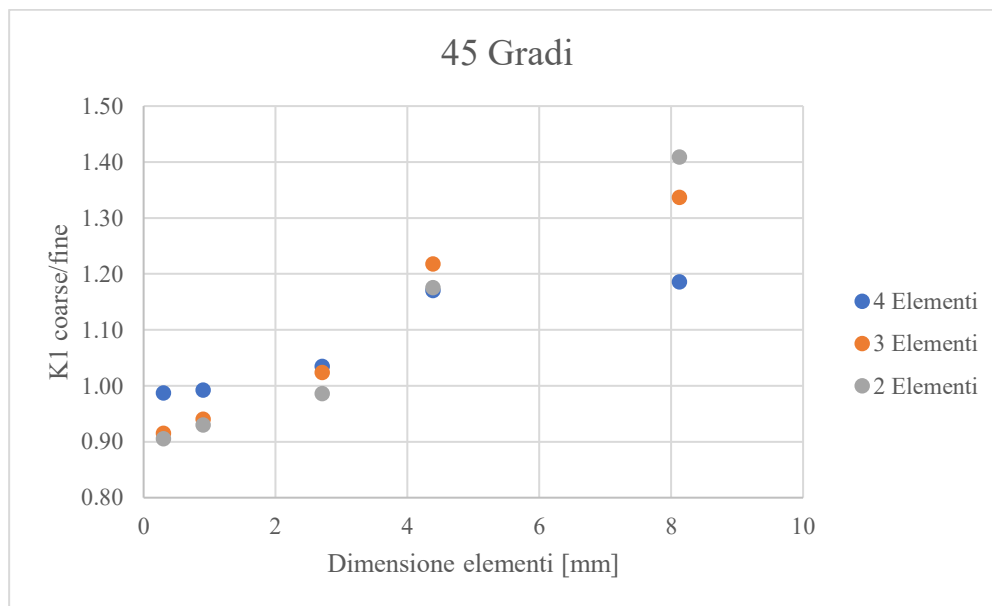


Fig. 5.15 - Risultati analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 45$ gradi, $a = 5$ mm

5.4.2 PROFONDITÀ 10 mm

5.4.2.1 135 GRADI

$$K_{1_{fine}} = 7.043 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.326}$$

Tab. 5.29 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 135 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
8.5616	6.86462	0.9746732	-2.53	6.96148	0.9884257	-1.16	6.81497	0.9676233	-3.24
4.6905	6.88432	0.9774702	-2.25	6.91544	0.9818884	-1.81	6.75242	0.9587417	-4.13
3.3334	6.92549	0.9833148	-1.67	6.94098	0.9855142	-1.45	6.98543	0.9918257	-0.82
1.1327	6.96189	0.9884842	-1.15	6.97283	0.9900372	-1.00	7.04939	1.0009073	0.09
0.3704	6.95453	0.9874380	-1.26	6.97319	0.9900880	-0.99	7.05250	1.0013483	0.13

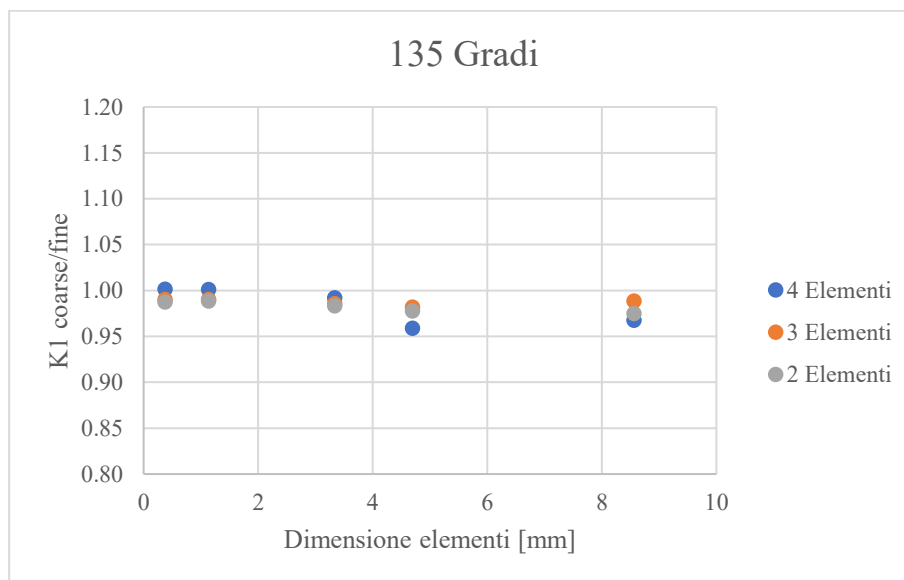


Fig. 5.16 - Risultati analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 135$ gradi, $a = 10$ mm

5.4.2.2 90 GRADI

$$K_{1_{fine}} = 7.364 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.456}$$

Tab. 5.30 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 90 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
8.5616	7.25793	0.9855962	-1.44	7.65420	1.0394073	3.94	7.47678	1.0153145	1.53
3.9102	6.66168	0.9046282	-9.54	6.94207	0.9427043	-5.73	7.18745	0.9760258	-2.40
1.8643	6.73821	0.9150207	-8.50	6.89172	0.9358670	-6.41	7.26877	0.9870677	-1.29
1.1111	6.65598	0.9038540	-9.61	6.74770	0.9163086	-8.37	7.26773	0.9869266	-1.31
0.3704	6.69306	0.9088898	-9.11	6.77860	0.9205050	-7.95	7.30956	0.9926068	-0.74

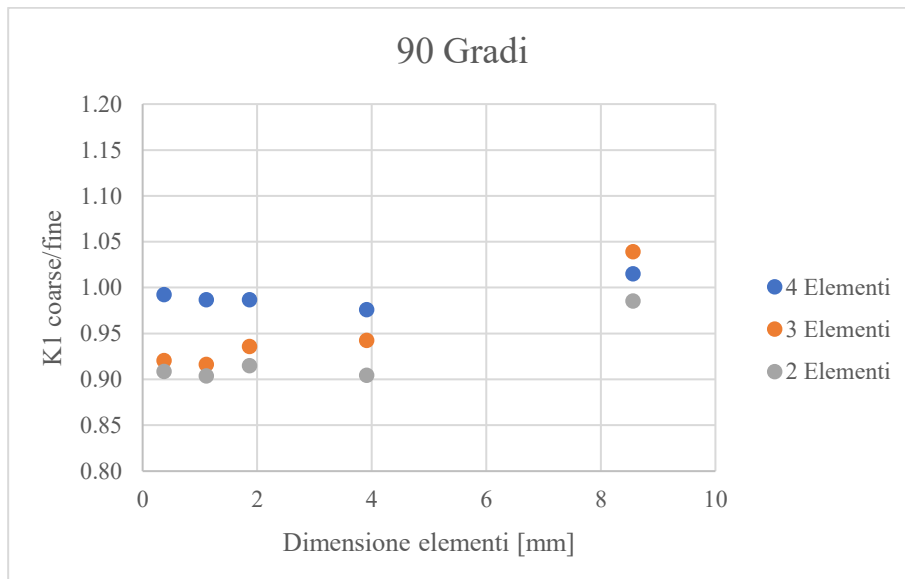


Fig. 5.17 - Risultati analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 90$ gradi, $a = 10$ mm

5.4.2.3 60 GRADI

$$K_{1\text{fine}} = 7.18 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.489}$$

Tab. 5.31 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 60 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
8.7355	7.13146	0.9932393	-0.68	7.57801	1.0554337	5.54	7.45553	1.0383749	3.84
3.9102	7.09186	0.9877245	-1.23	7.27162	1.0127601	1.28	7.37927	1.0277539	2.78
1.6667	6.50345	0.9057724	-9.42	6.64058	0.9248713	-7.51	7.11299	0.9906667	-0.93
1.1111	6.35814	0.8855354	-11.45	6.44100	0.8970751	-10.29	7.04989	0.9818785	-1.81
0.3704	6.38678	0.8895243	-11.05	6.46576	0.9005233	-9.95	6.85988	0.9554148	-4.46

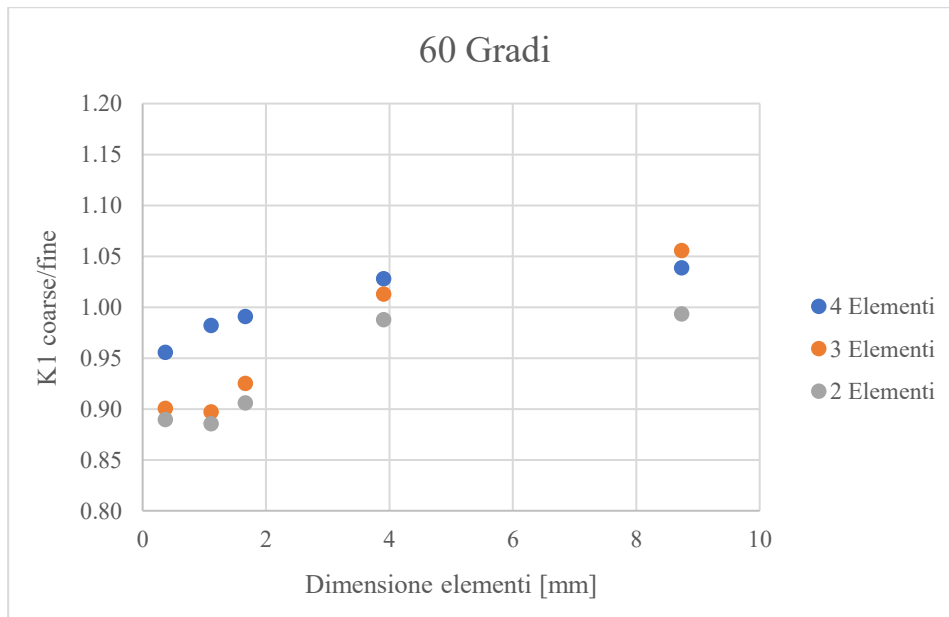


Fig. 5.18 - Risultati analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh, $2\alpha = 60$ gradi, $a = 10$ mm

5.4.2.4 45 GRADI

$$K_{1\text{fine}} = 7.09 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.495}$$

Tab. 5.32 - Risultati studio su 2, 3 e 4 elementi, mesh refinement, angolo intaglio 45 gradi

d	2 Elementi			3 Elementi			4 Elementi		
	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
10	7.23720	1.0207616	2.08	7.66431	1.0810029	8.10	7.57555	1.0684843	6.85
4.6905	7.17637	1.0121821	1.22	7.44666	1.0503048	5.03	7.35972	1.0380429	3.80
3.3333	6.52987	0.9209966	-7.90	6.68148	0.9423811	-5.76	7.09424	1.0005977	0.06
1.1111	6.33649	0.8937220	-10.63	6.42250	0.9058538	-9.41	6.96664	0.9826002	-1.74
0.3704	6.35108	0.8957794	-10.42	6.43571	0.9077161	-9.23	6.96258	0.9820277	-1.80

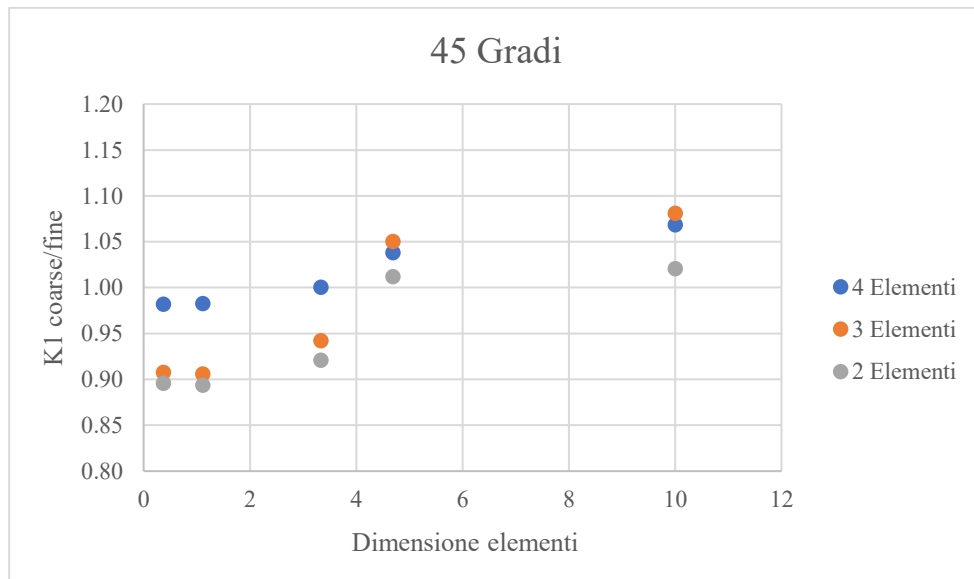


Fig. 5.19 - Risultati K_1 analisi su 2, 3 e 4 elementi con refinement mesh
 $2\alpha = 45$ gradi, $a = 10$ mm

5.5 OSSERVAZIONI

In questo capitolo sono stati mostrati diversi risultati, nel paragrafo 5.1 e 5.2 si è visto che l'analisi di 2 o 3 elementi è risultata efficace solo per i casi con angolo di apertura pari a 135 gradi, con valori di K_1 calcolato per tutte le dimensioni di elemento, sempre all'interno del margine di errore pari al 5%. Per gli altri angoli di apertura, invece, i risultati ricavati sono meno soddisfacenti, trovando nella maggior parte dei casi errori intorno al 10%.

Proprio per questo motivo, si è deciso nel paragrafo 5.3 di spostare l'attenzione sugli elementi analizzati, il che ha portato a dei risultati molto soddisfacenti, trovando, per ogni angolo di apertura e dimensione di elemento, valori di K_1 sempre all'interno del range di errore del 5%.

Nel paragrafo 5.4, dove è stata variata la profondità dell'intaglio, sono state messe a confronto le 3 tipologie, ovvero lo studio su 2, 3 oppure 4 elementi dell'apice, confermando i risultati trovati precedentemente. Lo studio sui 4 elementi risulta efficace per ogni angolo d'intaglio, se il focus invece è sui 2 o 3 elementi dell'apice, si trovano risultati accurati solo per i casi con apertura intaglio pari a 135 gradi.

6. GIUNZIONI SALDATE A CROCE CON CORDONE NON PORTANTE

Dopo aver testato il nuovo approccio con alcune analisi eseguite su piastre intagliate, in questo capitolo e in quello successivo verranno prese in considerazione alcune giunzioni saldate. Le analisi riportate nei prossimi paragrafi coinvolgono dei giunti a croce con cordone non portante. La giunzione rappresentata in Fig. 6.1 è formata da un piatto principale sottoposto a trazione, e da 2 piatti secondari uniti al principale tramite 4 cordoni di saldatura:

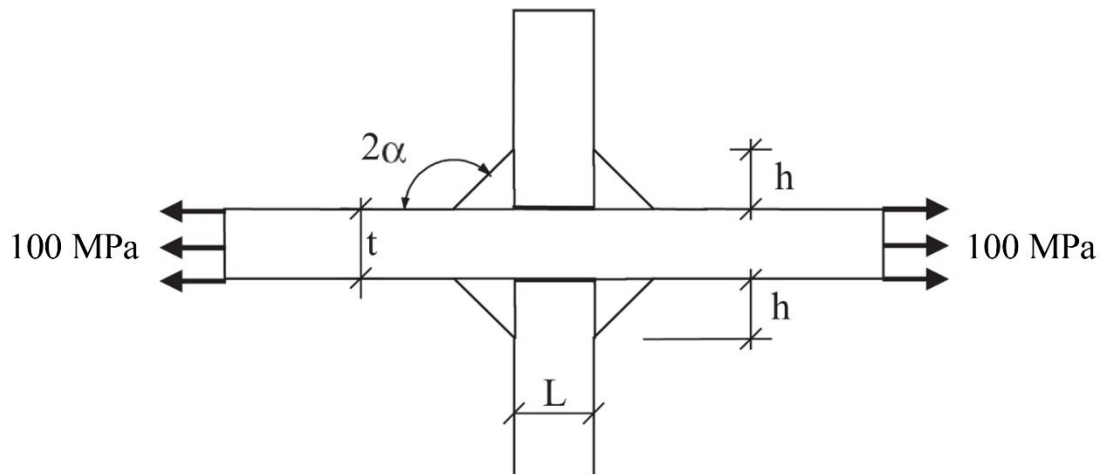


Fig. 6.1 - Saldatura a croce con cordone non portante [2]

La giunzione appena descritta è stata analizzata in 3 diversi casi, che differiscono tra loro solo per le dimensioni dei piatti e dell'altezza del cordone di saldatura:

- CASO 1: $t = 13$ mm, $h = 5$ mm, $L = 10$ mm;
- CASO 2: $t = 50$ mm, $h = 16$ mm, $L = 50$ mm;
- CASO 3: $t = 100$ mm, $h = 16$ mm, $L = 50$ mm.

Il valore dell'angolo 2α è mantenuto costante e vale 135 gradi.

Sfruttando la simmetria del modello, per ogni caso è stata modellata solo 1/4 della geometria, applicando però le opportune condizioni di vincolo lungo le linee degli assi interessati, come si può notare in Fig. 6.2:

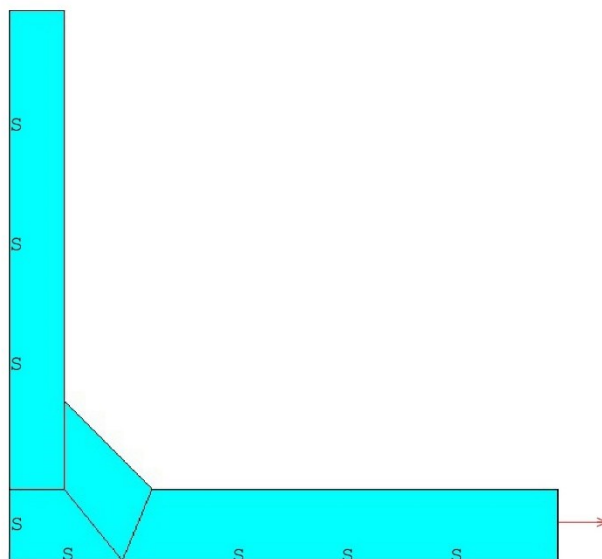


Fig. 6.2 - *Vincoli e carichi applicati al modello*

Per la mesh globale di partenza di ogni caso, è stata impostata una dimensione di elemento pari a 10 mm e successivamente è stato eseguito un infittimento degli elementi all'apice dell'intaglio, con la stessa procedura vista nel paragrafo 5.2.

Per facilitare la comprensione e la visualizzazione del modello, la terna degli assi è stata impostata coincidente con l'apice dell'intaglio relativo al piede del cordone di saldatura, con l'asse X corrispondente alla bisettrice, come si vedrà nelle figure seguenti.

Trattandosi di intagli con angolo apertura di 135 gradi, si è deciso di seguire la strada intrapresa nel paragrafo 5.2, analizzando quindi gli elementi mostrati in fig. 5.3.

6.1 CASO 1

Date le dimensioni contenute del modello, si nota che, per discretizzare i 2 piatti, è bastato un solo elemento.

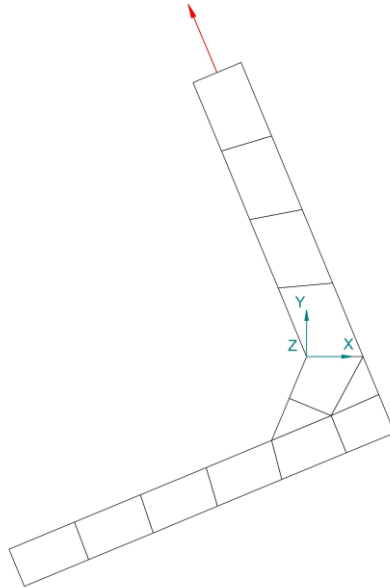


Fig. 6.3 - Mesh globale con dimensione elementi 7 mm

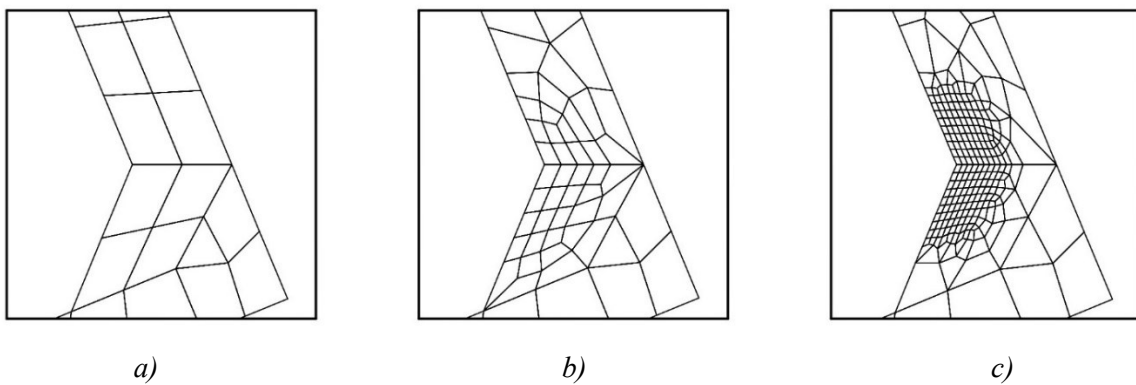


Fig. 6.4 - Livelli di refinement zona apice intaglio
Dimensione elementi: a) 3.5 mm; b) 1 mm; c) 0.4 mm

Tab. 6.1 - Risultati elementi, caso 1

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.326}]	[MPa mm ^{0.326}]	[%]
1	3	7.035	0.1564455	1.4273	268	368.3893	27.2509
2	8	7.035	0.1186722	0.53773	268	259.6202	-3.2277
1	5	3.5175	0.1688268	0.47396	268	325.9495	17.7787
2	22	3.5175	0.1614834	0.23512	268	234.7367	-14.1705
3	6	3.5175	0.0955395	0.32911	268	361.0592	25.7739
1	34	1.1725	0.1570057	0.07927	268	289.7207	7.4971
2	22	1.1725	0.1685244	0.060421	268	244.1436	-9.7715
3	35	1.1725	0.0833447	0.043212	268	293.5915	8.7167
1	55	0.3908	0.1669524	0.017444	268	276.2473	2.9855
2	248	0.3908	0.1734647	0.015232	268	253.2469	-5.8256
3	54	0.3908	0.0909107	0.0094302	268	275.2433	2.6316

Tab. 6.2 - Risultati studio su 2 e 3 elementi, caso 1

d	K1	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
7.035	268	325.94313	1.2162057	21.62	325.94313	1.2162057	21.62
3.5175	268	285.02105	1.0635114	6.35	303.73900	1.1333545	13.34
1.1725	268	267.09627	0.9966279	-0.34	272.70584	1.0175591	1.76
0.3908	268	264.79012	0.9880228	-1.20	267.03139	0.9963858	-0.36

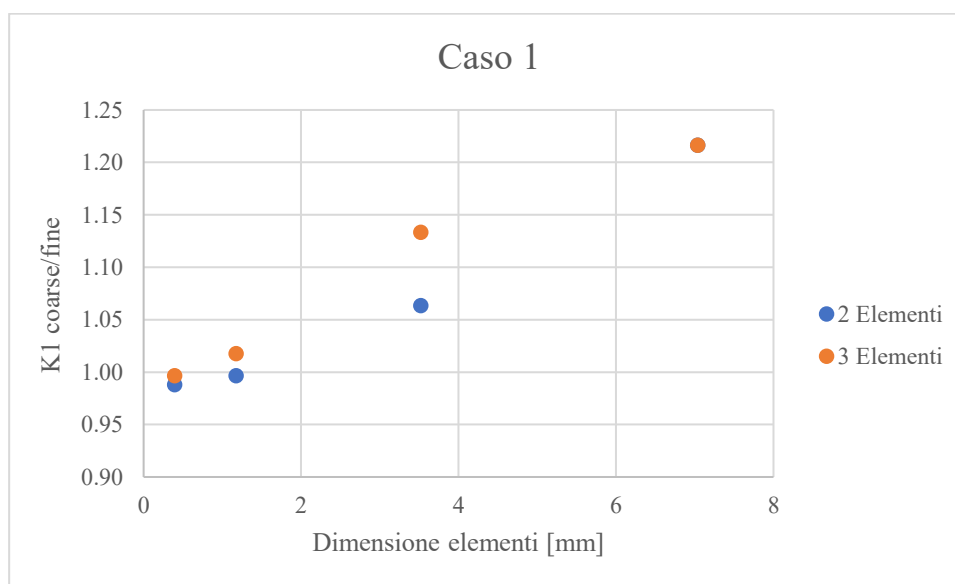


Fig. 6.5 - Risultati K₁ analisi su 2 e 3 elementi, caso 1

6.2 CASO 2

Per il secondo caso, invece, le dimensioni leggermente maggiori hanno consentito una migliore discretizzazione del modello.

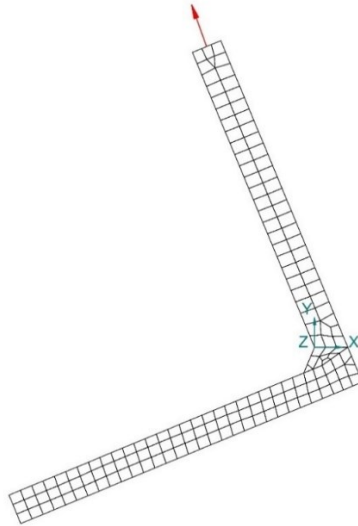
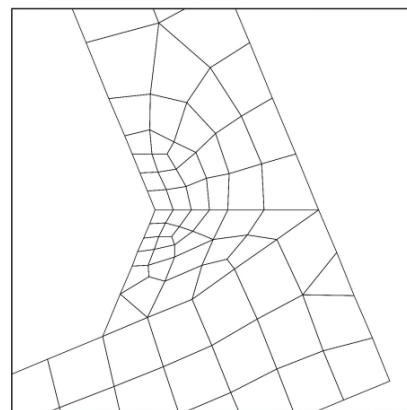
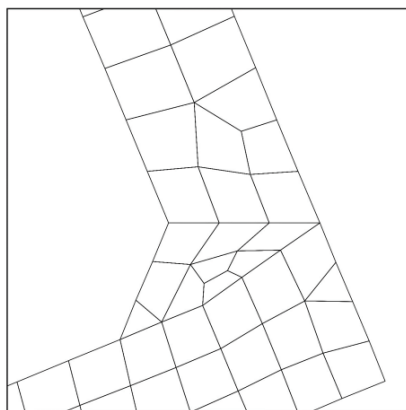


Fig. 6.6 - Mesh globale con dimensione elementi 9 mm



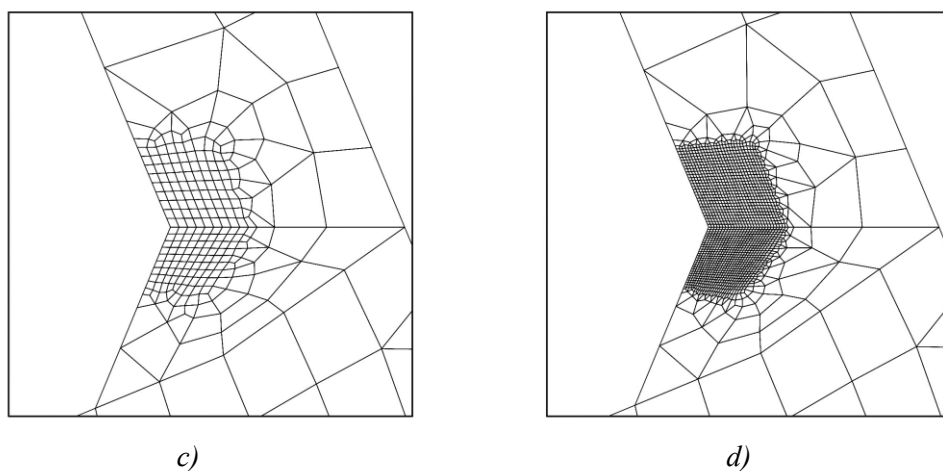


Fig. 6.7 - Livelli di refinement zona apice intaglio
a) Ingrandimento caso globale; Dimensione elementi: b) 3 mm; c) 1 mm; d) 0.4 mm

Tab. 6.3 - Risultati elementi, caso 2

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.326}]	K1 calc [MPa mm ^{0.326}]	Var % [%]
1	62	9.0199	0.140581	2.7514	396.5	456.3943	13.1234
2	9	9.0199	0.105568	1.3373	396.5	367.1766	-7.9862
3	61	9.0201	0.065105	1.5974	396.5	510.9971	22.4066
1	170	3.0066	0.141474	0.53662	396.5	421.1193	5.8462
2	187	3.0066	0.103118	0.31506	396.5	377.9547	-4.9068
3	171	3.0067	0.079495	0.30805	396.5	425.6397	6.8461
1	210	1.0022	0.135528	0.10919	396.5	406.7909	2.5298
2	327	1.0022	0.109689	0.078906	396.5	384.3863	-3.1514
3	211	1.0022	0.065825	0.05239	396.5	404.3154	1.933
1	429	0.3341	0.13527	0.024051	396.5	400.5373	1.008
2	1270	0.3341	0.109875	0.018365	396.5	388.3507	-2.0985
3	428	0.3341	0.065264	0.011553	396.5	399.6507	0.7884

Tab. 6.4 - Risultati studio su 2 e 3 elementi, caso 2

d	K1	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
9.0199	396.5	420.4401	1.0603785	6.04	440.9189	1.1120275	11.20
3.0066	396.5	403.4767	1.0175956	1.76	409.0223	1.0315822	3.16
1.0022	396.5	396.9227	1.0010661	0.11	398.4986	1.0050406	0.50
0.3341	396.5	395.0969	0.9964614	-0.35	396.0551	0.9988780	-0.11

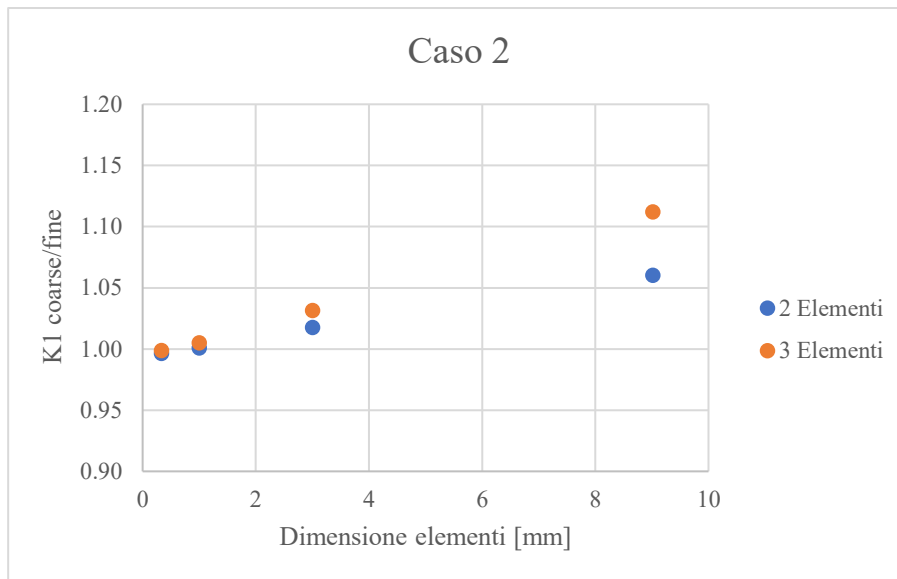


Fig. 6.8 - Risultati K_1 analisi su 2 e 3 elementi, caso 2

6.3 CASO 3

Come per i modelli precedenti, viene riportata l'immagine inerente alla mesh globale con elementi di lato pari a 9 mm, con i successivi refinement eseguiti nella zona d'intaglio.

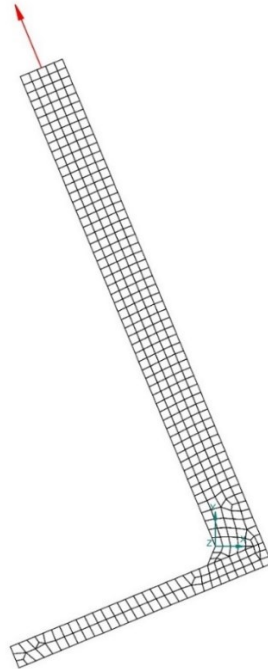
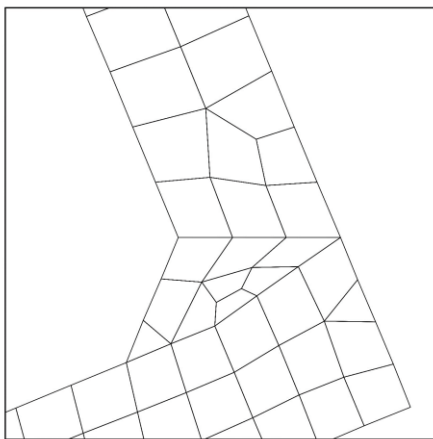
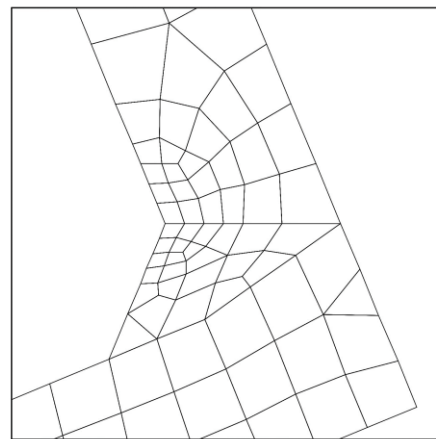


Fig. 6.9 - Mesh globale con dimensione elementi 9 mm



a)



b)

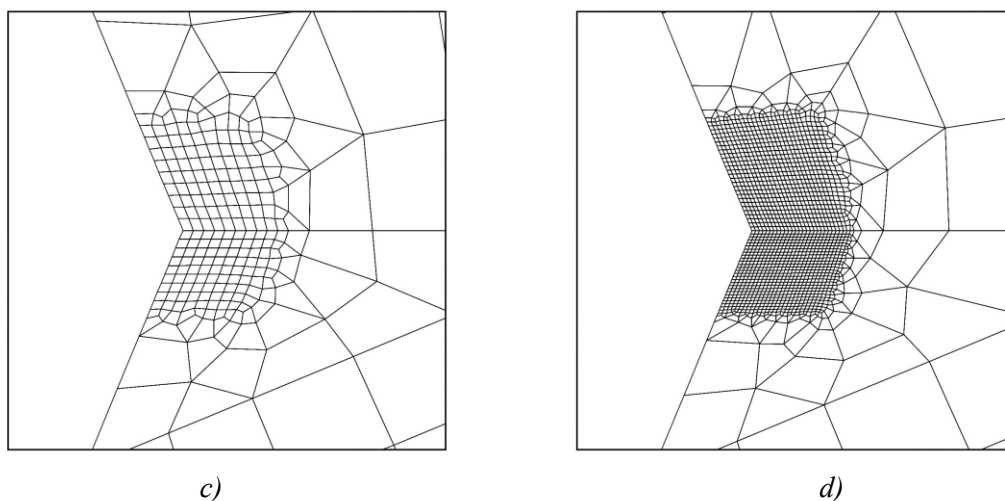


Fig. 6.10 – Livelli di refinement zona apice intaglio
 a) Ingrandimento caso globale; Dimensione elementi: b) 3 mm; c) 1 mm; d) 0.3 mm

Tab. 6.5 - Risultati elementi, caso 3

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.326}]	K1_calc [MPa mm ^{0.326}]	Var % [%]
1	285	8.362	0.1539086	3.0557	413	483.7322	14.6222
2	293	8.362	0.118397	1.4911	413	385.2692	-7.1978
3	284	8.362	0.0793948	1.9562	413	538.8793	23.3595
1	400	2.7873	0.1475867	0.56008	413	443.2693	6.8287
2	381	2.7873	0.1147194	0.3411	413	392.3636	-5.2595
3	401	2.7874	0.0748115	0.28538	413	444.4084	7.0675
1	538	0.9291	0.1435529	0.11496	413	426.7894	3.231
2	423	0.9291	0.1166024	0.082126	413	400.2513	-3.1852
3	539	0.9291	0.0719936	0.056684	413	423.1874	2.4073
1	1477	0.3097	0.1430255	0.025179	413	419.42	1.5307
2	642	0.3097	0.1165125	0.019127	413	405.0176	-1.9709
3	1476	0.3097	0.0711111	0.012415	413	417.6594	1.1156

Tab. 6.6 - Risultati studio su 2 e 3 elementi, caso 3

d	K1	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
8.362	413	443.5986	1.0740885	7.41	466.8055	1.1302796	13.03
2.7873	413	421.7542	1.0211967	2.12	426.8838	1.0336169	3.36
0.9291	413	415.1053	1.0050976	0.51	416.8698	1.0093701	0.94
0.3097	413	413.0156	1.0000377	0.00	414.0224	1.0024756	0.25

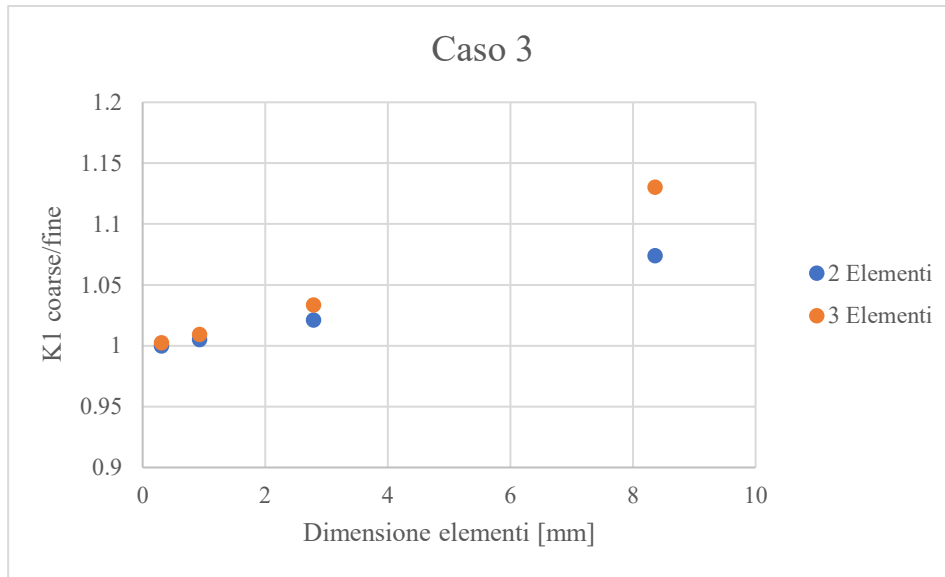


Fig. 6.11 - Risultati K_1 analisi su 2 e 3 elementi, caso 3

6.4 OSSERVAZIONI

Trattandosi di giunzioni saldate con piede del cordone di saldatura di 135 gradi, i risultati ottenuti per il K_1 seguono l'andamento di quelli trovati nel capitolo 5. Si nota che l'accuratezza dei risultati aumenta con la diminuzione della dimensione degli elementi, riscontrando errori inferiori all'1% anche con elementi di lato pari a 1 mm.

6BIS. GIUNZIONE SALDATA A CROCE CON CORDONE PORTANTE

In questa sezione è riportata una variante della giunzione saldata presa in esame nel capitolo 6, con la differenza che in questo caso il carico viene applicato al cordone portante.

Questa analisi è stata effettuata per verificare dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo di una mesh fine in un'esercitazione svolta durante il corso di studi.

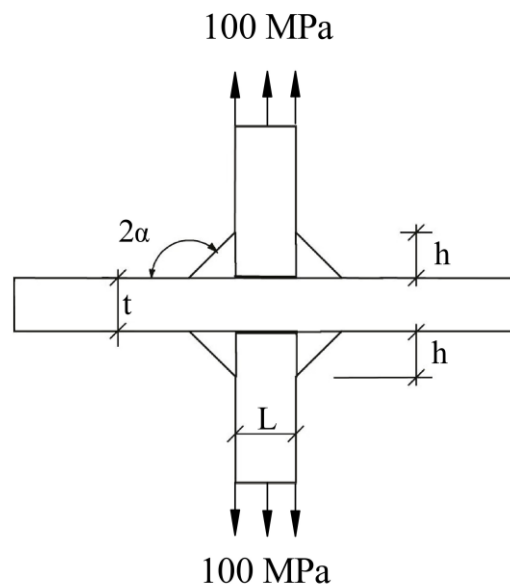


Fig. 6BIS.1 - Saldatura a croce con cordone portante

Grazie alla doppia simmetria del modello è stata realizzata solo un quarto della geometria, definendo, come nei capitoli precedenti, una mesh globale ed eseguendo vari livelli di refinement al piede del cordone di saldatura e nella zona della mancata penetrazione.



Fig. 6BIS.2 - Refinement del piede cordone di saldatura e zona cricca, condizione deformata

Lo studio sul piede del cordone e sull'apice della cricca è stato svolto analizzando i 4 elementi in prossimità degli stessi, applicando la stessa metodologia vista nel paragrafo 5.3.

PIEDE

Tab 6BIS.1 - Risultati elementi, piede del cordone di saldatura

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa mm ^{0.326}]	K1 calc [MPa mm ^{0.326}]	Var % [%]
1	53	1.804	0.08231	0.098079	468.7	332.9649	-28.96
2	38	1.804	0.083449	0.12296	468.7	370.2623	-21.00
3	78	1.804	0.157789	0.26917	468.7	398.3945	-15.00
4	37	1.804	0.175019	0.34888	468.7	430.6595	-8.12
1	76	1.0824	0.136487	0.10659	468.7	380.2618	-18.87
2	56	1.0824	0.094497	0.084916	468.7	407.9024	-12.97
3	100	1.0824	0.230326	0.21393	468.7	414.7033	-11.52
4	57	1.0824	0.161082	0.17617	468.7	450.0035	-3.99
1	94	0.6014	0.082942	0.036323	468.7	423.0611	-9.74
2	165	0.6014	0.088105	0.039976	468.7	430.6252	-8.12
3	95	0.6013	0.158361	0.074444	468.7	438.3448	-6.48
4	164	0.6013	0.161992	0.084537	468.7	461.8495	-1.46
1	173	0.2005	0.083013	0.0094983	468.7	453.2521	-3.30
2	474	0.2005	0.081048	0.0094746	468.7	458.1414	-2.25
3	174	0.2004	0.158128	0.018255	468.7	455.3096	-2.86
4	479	0.2004	0.155322	0.019054	468.7	469.35	0.14

Tab 6BIS.2 - Risultati studio su 3 elementi apice, piede cordone di saldatura

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
1.804	468.7	395.7082	0.8442676	-15.57
1.0824	468.7	415.9607	0.8874775	-11.25
0.6014	468.7	442.3802	0.9438452	-5.62
0.2005	468.7	460.0635	0.9815735	-1.84

RADICE

Tab 6BIS.3 - Risultati elementi, radice del cordone di saldatura

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa√mm]	K1_calc [MPa√mm]	Var % [%]
1	36	2.5	0.17514	0.21176	364.6	315.6415	-13.43
2	29	2.5	0.207169	0.13651	364.6	233.0154	-36.09
3	35	2.5	0.069395	0.21657	364.6	507.1059	39.09
4	27	2.5	0.080201	0.29497	364.6	550.5047	50.99
1	63	1	0.21657	0.12359	364.6	342.8692	-5.96
2	40	1	0.15862	0.02014	364.6	161.7283	-55.64
3	62	1	0.034728	0.050617	364.6	547.9466	50.29
4	41	1	0.245527	0.20583	364.6	415.5625	13.98
1	152	0.8333	0.167771	0.055288	364.6	285.4199	-21.72
2	115	0.8333	0.199016	0.043999	364.6	233.7786	-35.88
3	148	0.8333	0.080335	0.080804	364.6	498.6388	36.76
4	113	0.8333	0.06608	0.091598	364.6	585.3685	60.55
1	355	0.2778	0.173126	0.019845	364.6	291.5648	-20.03
2	661	0.2778	0.207118	0.01386	364.6	222.7733	-38.90
3	319	0.2778	0.081461	0.027701	364.6	502.1683	37.73
4	630	0.2778	0.080237	0.034304	364.6	563.0667	54.43

Tab 6BIS.4 - Risultati studio su 4 elementi apice, radice cordone di saldatura

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
2.5	364.6	364.9623	1.0009937	0.10
1.0	364.6	354.6431	0.9726909	-2.73
0.8	364.6	361.7631	0.9922191	-0.78
0.3	364.6	361.8842	0.9925512	-0.74

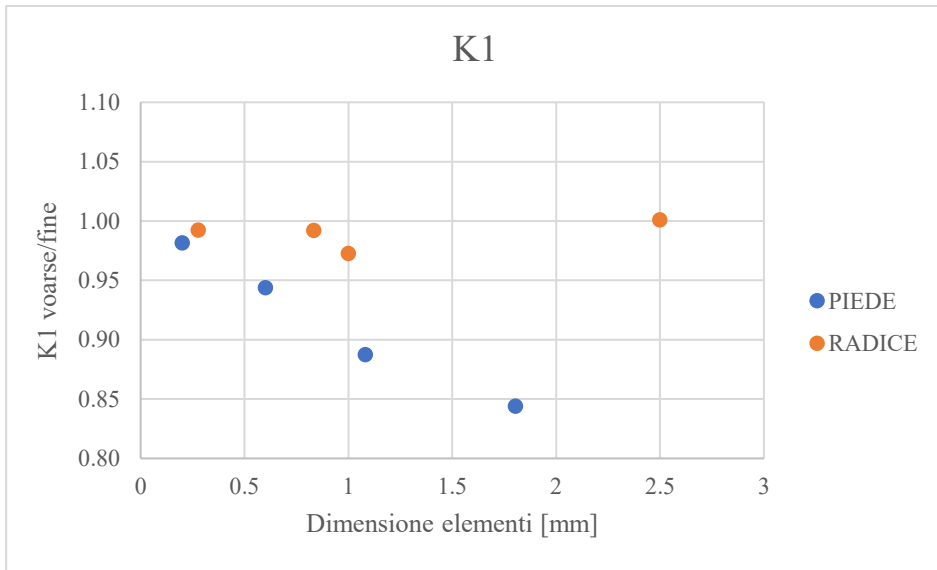


Fig. 6BIS.3 - Risultati K_1 analisi piede e radice cordone di saldatura

7. GIUNTI SALDATI TESTA - TESTA

Dopo aver testato il metodo su alcune giunzioni saldate con cordone non portante, nelle prossime pagine verranno trattati giunti saldati con modalità testa - testa in 2 tipologie:

- 1- Giunti a *Totale Penetrazione*;
- 2- Giunti a *Parziale Penetrazione*.

La geometria in questione è la seguente:

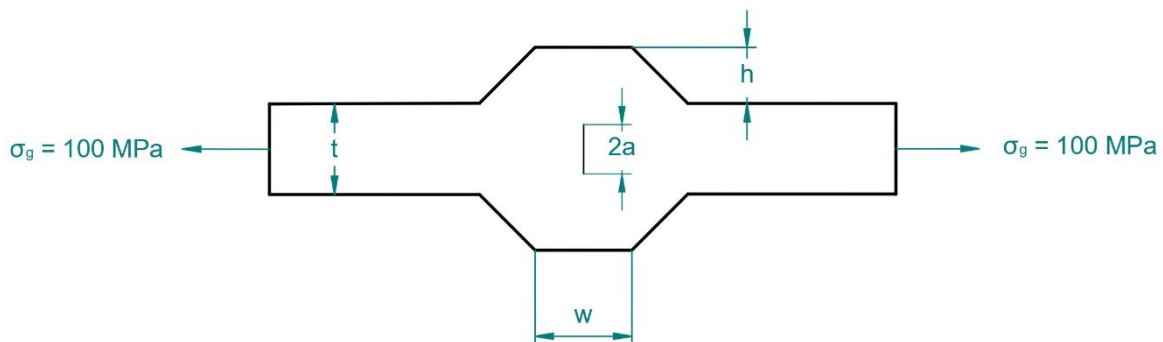


Fig. 7.1 - Saldatura di testa a parziale penetrazione

In figura è rappresentata una giunzione formata da due piattini uniti tra loro da un cordone di saldatura centrale. Se la saldatura è completa si parla di giunzione a totale penetrazione, in caso contrario si ha invece una saldatura parziale e questo comporta un'imperfetta giunzione tra i 2 piattini, con l'assenza quindi del materiale d'apporto nella zona di mancata penetrazione. Questa zona, piccola o grande che sia, può essere ricondotta ad una cricca.

Di seguito verranno quindi presentate alcune analisi eseguite su 2 modelli, che differiscono tra loro solo dimensionalmente, in cui sono state studiate entrambe le tipologie.

Nei casi a totale penetrazione è stato analizzato il piede del cordone di saldatura, essendo il punto più critico. Nei casi a parziale penetrazione è stato studiato anche l'apice della cricca.

Di seguito sono riassunti i parametri, indicati in fig. 7.1, dei 2 modelli di giunzione:

Tab. 7.1 - Dimensioni geometriche dei 2 casi

Caso	w	h	t	2a
[n°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	20	4.5	25	7.5
2	6	1.5	5	2.5

Data la doppia simmetria del modello, si è deciso di semplificare la geometria in 2 modi: uno in cui viene realizzata metà geometria, l'altro in cui ne viene realizzata un quarto, impostando le opportune condizioni di vincolo e di carico.

7.1 SEMPLIFICAZIONE A DOPPIA SIMMETRIA

In questo paragrafo vengono dunque trattate le analisi effettuate sfruttando la doppia simmetria del modello, realizzando quindi un quarto della geometria e applicando le opportune condizioni di vincolo e carico mostrate in fig. 7.2.

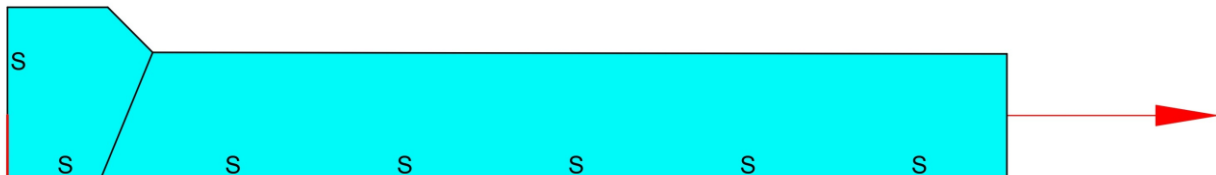


Fig. 7.2 - Vincoli e carichi applicati al modello

Seguendo la stessa filosofia presentata nei capitoli precedenti, per quanto riguarda il piede del cordone sono stati analizzati i 2 elementi dell'apice d'intaglio, aggiungendo anche il terzo successivamente, come mostrato in Fig. 5.3.

Nei casi invece di parziale penetrazione, avendo modellato 1/4 di geometria, la bisettrice della cricca si trova in corrispondenza di una linea di divisione del modello: pertanto, si è scelto di analizzare solo 2 elementi, uno all'apice dell'intaglio, l'altro appartenente al bordo, come mostrato in Fig. 7.3:

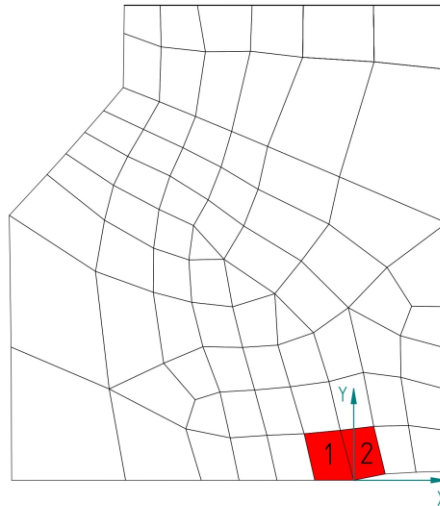


Fig. 7.3 - Elementi apice cricca analizzati

Di seguito sono quindi riportati i risultati relativi ai 2 casi seguendo il criterio di analisi appena presentato. Come accennato precedentemente, i risultati riguardanti i casi di totale penetrazione fanno riferimento al solo piede del cordone di saldatura, i casi a parziale penetrazione riportano anche quelli relativi alla radice.

7.1.1 CASO 1

7.1.1.1 TOTALE PENETRAZIONE

Tab. 7.2 - Risultati elementi piede cordone di saldatura, totale penetrazione, caso 1

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1_calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.326}]	[MPa mm ^{0.326}]	[%]
1	44	4.5096	0.149003	0.70812	288	358.735	24.5608
2	11	4.5096	0.114382	0.34903	288	287.4559	-0.1889
3	45	4.5096	0.070574	0.45011	288	415.5789	44.2982
1	44	1.5032	0.156132	0.13278	288	318.0686	10.4405
2	11	1.5032	0.099762	0.061946	288	271.784	-5.6306
3	59	1.5032	0.093324	0.086326	288	331.7201	15.1806
1	144	0.5011	0.148619	0.025441	288	299.0974	3.8532
2	270	0.5011	0.098690	0.01418	288	274.0208	-4.8539
3	145	0.501	0.075292	0.012762	288	297.6359	3.3458
1	791	0.167	0.148604	0.005482	288	291.0178	1.0478
2	1650	0.167	0.096488	0.003223	288	276.9333	-3.8426
3	792	0.167	0.075299	0.002728	288	288.3774	0.131

Tab. 7.3 - Risultati studio su 2 e 3 elementi piede cordone di saldatura, totale penetrazione, caso 1

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
4.5096	288	329.6701	1.1446877	14.47	349.5860	1.2138402	21.38
1.5032	288	300.8689	1.0446837	4.47	309.4142	1.0743548	7.44
0.5011	288	289.3389	1.0046488	0.46	291.2997	1.0114574	1.15
0.167	288	285.5759	0.9915830	-0.84	286.2443	0.9939038	-0.61

7.1.1.2 PARZIALE PENETRAZIONE

PIEDE

Tab. 7.4 - Risultati elementi, piede cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 1

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.326}]	[MPa mm ^{0.326}]	[%]
1	44	4.5096	0.149003	0.75599	306	370.6622	11.6453
2	11	4.5096	0.114382	0.39095	306	304.2289	-8.3648
3	45	4.5096	0.070574	0.44484	306	413.1389	24.4394
1	44	1.5032	0.154153	0.14813	306	338.1002	1.8374
2	11	1.5032	0.106808	0.077421	306	293.6484	-11.5517
3	60	1.5032	0.09597	0.097517	306	347.6729	4.7208
1	144	0.5011	0.148619	0.029601	306	322.6255	-2.8236
2	495	0.5011	0.09869	0.016758	306	297.8904	-10.274
3	145	0.501	0.075292	0.01472	306	319.6538	-3.7187
1	791	0.167	0.148604	0.006449	306	315.6521	-4.9241
2	3329	0.167	0.096488	0.003823	306	301.5952	-9.1581
3	792	0.167	0.075299	0.003204	306	312.5385	-5.8619

Tab. 7.5 - Risultati studio su 2 e 3 elementi piede cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 1

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
4.5096	306	343.3852	1.1221738	12.22	359.2539	1.1740322	17.40
1.5032	306	320.6489	1.0478721	4.79	328.1331	1.0723305	7.23
0.5011	306	312.9760	1.0227975	2.28	314.5508	1.0279439	2.79
0.167	306	310.2159	1.0137775	1.38	310.7715	1.0155930	1.56

RADICE

Tab. 7.6 - Risultati elementi, radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 1

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa \sqrt{mm}]	[MPa \sqrt{mm}]	[%]
1	6	4.4167	0.07057	0.64203	332	651.4044	96.2061
2	9	3.75	0.269912	0.47196	332	309.9273	-6.6484
1	83	1.4722	0.06686	0.14959	332	559.5234	68.5311
2	9	1.25	0.262136	0.13361	332	289.8256	-12.7031
1	290	0.4908	0.070332	0.043005	332	506.6253	52.598
2	406	0.4167	0.264414	0.038497	332	268.296	-19.188
1	1670	0.1636	0.072286	0.013934	332	492.6825	48.3983
2	2578	0.1389	0.266686	0.012371	332	262.3109	-20.9907

Tab. 7.7 - Risultati studio su 2 elementi radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 1

d	K1	K1	K1 coarse/fine	Var %
3.75	332	416.345	1.2540511	25.41
1.25	332	370.0192	1.1145158	11.45
0.4167	332	340.6304	1.0259952	2.60
0.1389	332	332.9952	1.0029976	0.30

7.1.2 CASO 2

7.1.2.1 TOTALE PENETRAZIONE

Tab. 7.8 - Risultati elementi, piede cordone di saldatura, totale penetrazione, caso 2

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa $mm^{0.326}$]	[MPa $mm^{0.326}$]	[%]
1	30	1.353	0.129136	0.048066	178.5	225.8869	26.5473
2	9	1.353	0.131887	0.033872	178.5	187.6357	5.118
3	29	1.353	0.060238	0.031006	178.5	265.633	48.814
1	40	0.451	0.125417	0.008474	178.5	201.7235	13.0104
2	9	0.451	0.112231	0.005867	178.5	177.4366	-0.5958
3	41	0.451	0.061008	0.004536	178.5	211.5931	18.5396
1	83	0.1503	0.129565	0.001811	178.5	192.3184	7.7414
2	255	0.1503	0.109272	0.001326	178.5	179.1566	0.3678
3	84	0.1503	0.060994	0.000863	178.5	193.4294	8.3638

Tab. 7.9 - Risultati studio su 2 e 3 elementi piede cordone di saldatura, totale penetrazione, caso 2

d	K1	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
1.353	178.5	207.4411	1.1621352	16.21%	219.5302	1.2298610	22.99
0.451	178.5	190.6395	1.0680082	6.80%	195.1026	1.0930120	9.30
0.1503	178.5	186.4346	1.0444514	4.45%	187.8853	1.0525790	5.26

7.1.2.2 PARZIALE PENETRAZIONE

PIEDE

Tab. 7.10 - Risultati elementi, piede cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 2

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa mm ^{0.326}]	[MPa mm ^{0.326}]	[%]
1	30	1.353	0.129136	0.050347	200.4	231.1846	15.3616
2	9	1.353	0.131887	0.038187	200.4	199.2291	-0.5843
3	29	1.353	0.060238	0.028275	200.4	253.665	26.5793
1	39	0.451	0.126105	0.009628	200.4	214.4291	7.0006
2	9	0.451	0.12382	0.007753	200.4	194.181	-3.1033
3	40	0.451	0.06139	0.004877	200.4	218.7348	9.1491
1	83	0.1503	0.129565	0.002121	200.4	208.1368	3.8607
2	479	0.1503	0.109254	0.001608	200.4	197.3292	-1.5323
3	84	0.1503	0.060994	0.000999	200.4	208.1334	3.859

Tab. 7.11 - Risultati studio su 2 e 3 elementi piede cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 2

d	K1 fine	2 Elementi			3 Elementi		
		K1	K1 coarse/fine	Var %	K1	K1 coarse/fine	Var %
1.353	200.4	215.629	1.0759932	7.60	223.2548	1.1140460	11.40
0.451	200.4	204.6478	1.0211966	2.12	207.5013	1.0354358	3.54
0.1503	200.4	203.2885	1.0144139	1.44	204.29	1.0194112	1.94

RADICE

Tab. 7.12 - Risultati elementi, radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso2

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa \sqrt{mm}]	[MPa \sqrt{mm}]	[%]
1	4	1.375	0.064403	0.038039	166	297.4685	48.4374
2	5	1.25	0.213502	0.026096	166	141.9274	-29.178
1	70	0.4583	0.061549	0.009888	166	268.7047	34.0842
2	74	0.4167	0.224776	0.007986	166	132.5389	-33.8628
1	279	0.1528	0.063682	0.002935	166	249.2809	24.3916
2	315	0.1389	0.215194	0.002041	166	118.6097	-40.8135

Tab. 7.13 - Risultati studio su 2 elementi radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 2

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
1.25	166	192.7981	1.1614340	16.14
0.4167	166	173.8171	1.0470911	4.71
0.1389	166	160.8478	0.9689628	-3.10

7.2 SEMPLIFICAZIONE A SINGOLA SIMMETRIA

Per analogia con il metodo utilizzato nei capitoli 5 e 6, in questo paragrafo è stato analizzato metà modello, in modo da eseguire l'analisi sui 4 elementi dell'apice della cricca per i casi a parziale penetrazione. Nei risultati seguenti è stato quindi trascurato lo studio del piede del cordone di saldatura, avendolo già riportato nel paragrafo precedente.

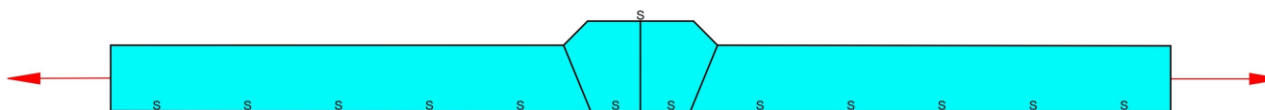


Fig. 7.4 - Vincoli e carichi applicati al modello a metà geometria

Sfruttando lo stesso criterio dei capitoli precedenti, è stata realizzata una mesh globale dei vari modelli a cui è seguito un refinement nella zona dell'apice della cricca, come si può notare in

fig. 7.5:

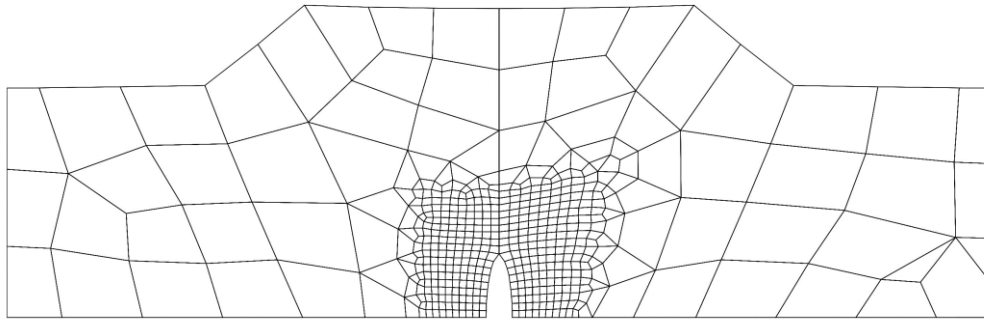


Fig. 7.5 - Ingrandimento zona mancata penetrazione, condizione deformata

Di seguito sono riportati i risultati relativi ai 2 casi riportati in tabella 7.1.

7.2.1 CASO 1

Tab 7.14 - Risultati elementi, radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 1

Pos [n°]	Elemento [n°]	d [mm]	IE1 /	Sene [N mm]	K1 [MPa \sqrt{mm}]	K1 calc [MPa \sqrt{mm}]	Var % [%]
1	9	3.3125	0.2135346	0.45664	319.6	364.6776	14.10
2	101	3.3125	0.2358608	0.53667	319.6	376.1682	17.70
3	17	3.75	0.0724184	0.24943	319.6	434.978	36.10
4	104	3.75	0.0805459	0.27346	319.6	431.8597	35.13
1	25	2.2083	0.2114487	0.26139	319.6	339.5843	6.25
2	133	2.2083	0.2294572	0.29364	319.6	345.5114	8.11
3	29	1.875	0.1223783	0.19457	319.6	417.9434	30.77
4	134	1.875	0.1531501	0.2398	319.6	414.7609	29.78
1	9	1.1042	0.2047979	0.10291	319.6	306.1807	-4.20
2	201	1.1042	0.3109248	0.19114	319.6	338.6568	5.96
3	238	1.25	0.0778012	0.07815	319.6	406.863	27.30
4	203	1.25	0.1583046	0.15189	319.6	397.6443	24.42
1	497	0.368	0.2182166	0.034467	319.6	297.3295	-6.97
2	284	0.368	0.2222509	0.03435	319.6	294.1182	-7.97
3	523	0.4167	0.0723086	0.019104	319.6	361.4095	13.08
4	320	0.4167	0.0857126	0.022317	319.6	358.7796	12.26

Tab 7.15 - Risultati studio su 4 elementi radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 1

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
3.3125	319.6	389.1727	1.2176870	21.77
2.2083	319.6	369.8174	1.1571258	15.71
1.1042	319.6	353.3708	1.1056657	10.57
0.368	319.6	315.6382	0.9876038	-1.24

Date le dimensioni ridotte del modello, per questo secondo caso sono state percorse 2 strade, caratterizzate dalla variazione della mesh globale di partenza per ottenere un miglioramento nel risultato finale del K_1 .

La mesh globale utilizzata come primo tentativo è di 2 mm e successivamente è stata ridotta a 1 mm.

7.2.2 CASO 2

7.2.2.1 MESH GLOBALE 2 mm

Tab. 7.16 - Risultati elementi, radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 2, mesh globale 2 mm

Pos	Elemento	d	IE1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa \sqrt{mm}]	[MPa \sqrt{mm}]	[%]
1	20	1.375	0.184174	0.037564	166.9	174.8059	-12.7715
2	30	1.375	0.1822	0.036971	166.9	174.3572	-12.9954
3	22	1.25	0.111974	0.031547	166.9	215.4754	7.5227
4	31	1.25	0.111988	0.031544	166.9	215.4512	7.5106
1	33	0.6261	0.255699	0.022738	166.9	171.0448	-14.6483
2	56	0.6261	0.226	0.018788	166.9	165.3802	-17.4749
3	34	0.625	0.096611	0.012242	166.9	204.3637	1.9779
4	57	0.625	0.084491	0.010896	166.9	206.1664	2.8774
1	20	0.1528	0.213369	0.0034376	166.9	147.3931	-26.4506
2	120	0.1528	0.18722	0.0026596	166.9	138.4035	-30.9364
3	164	0.1389	0.106628	0.0024084	166.9	183.0258	-8.6698
4	31	0.1389	0.138606	0.0029562	166.9	177.8522	-11.2514

Tab 7.17 - Risultati studio su 4 elementi radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 2, mesh globale 2 mm

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
1.375	166.9	190.1973	1.139588133	13.96
0.6261	166.9	179.2073	1.073740729	7.37
0.1528	166.9	157.4257	0.943233881	-5.68

7.2.2.2 MESH GLOBALE 1 mm

Tab 7.18 - Risultati elementi, radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 2, mesh globale 1 mm

Pos	Elemento	d	I_E1	Sene	K1	K1 calc	Var %
[n°]	[n°]	[mm]	/	[N mm]	[MPa \sqrt{mm}]	[MPa \sqrt{mm}]	[%]
1	43	0.9167	0.124043	0.011487	166.9	144.2601	-28.0139
2	66	0.9167	0.182787	0.02155	166.9	162.7723	-18.7763
3	54	0.625	0.245057	0.028973	166.9	197.4029	-1.4956
4	74	0.625	0.162498	0.021999	166.9	211.2358	5.4071
1	76	0.3152	0.252277	0.0095507	166.9	157.3017	-21.5061
2	115	0.3152	0.245712	0.0096735	166.9	160.4106	-19.9548
3	77	0.2832	0.162507	0.0080807	166.9	190.1879	-5.0959
4	116	0.2832	0.101776	0.0051433	166.9	191.7312	-4.3257

Tab 7.19 - Risultati studio su 4 elementi radice cordone di saldatura, parziale penetrazione, caso 2, mesh globale 1 mm

d	K1 fine	K1	K1 coarse/fine	Var %
0.9167	166.9	179.6871	1.0766154	7.66
0.3152	166.9	169.8095	1.0174326	1.74

7.3 PANORAMICA RISULTATI

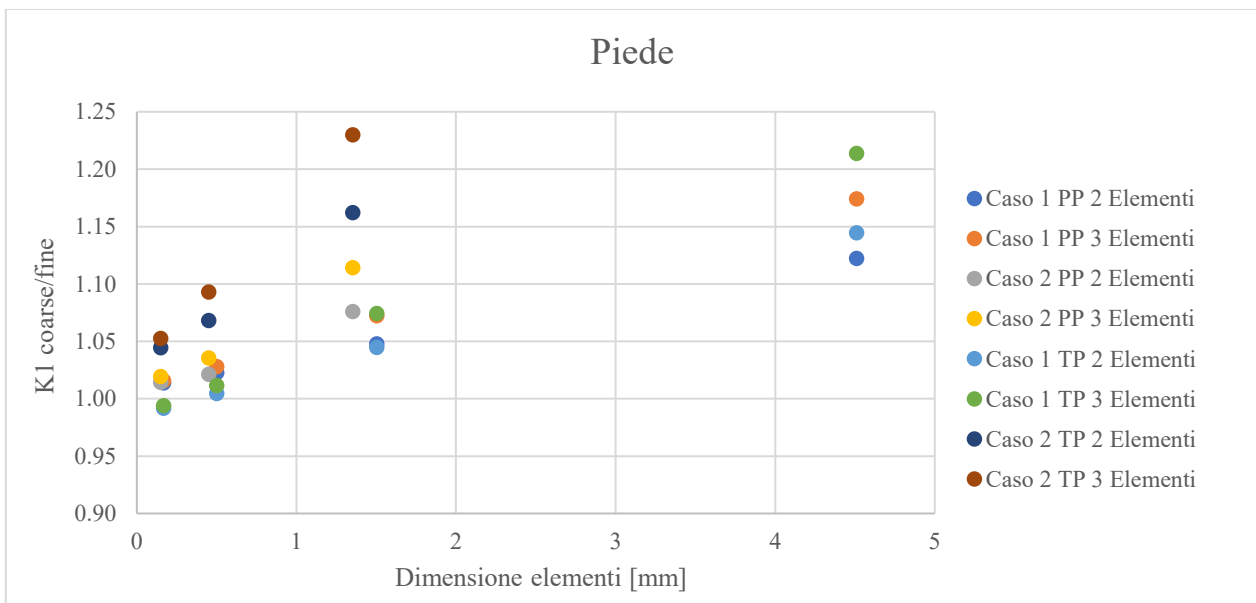


Fig. 7.6 - Risultati K_1 analisi del piede del cordone di saldatura, casi a Parziale Penetrazione (PP) e a Totale Penetrazione (TP)

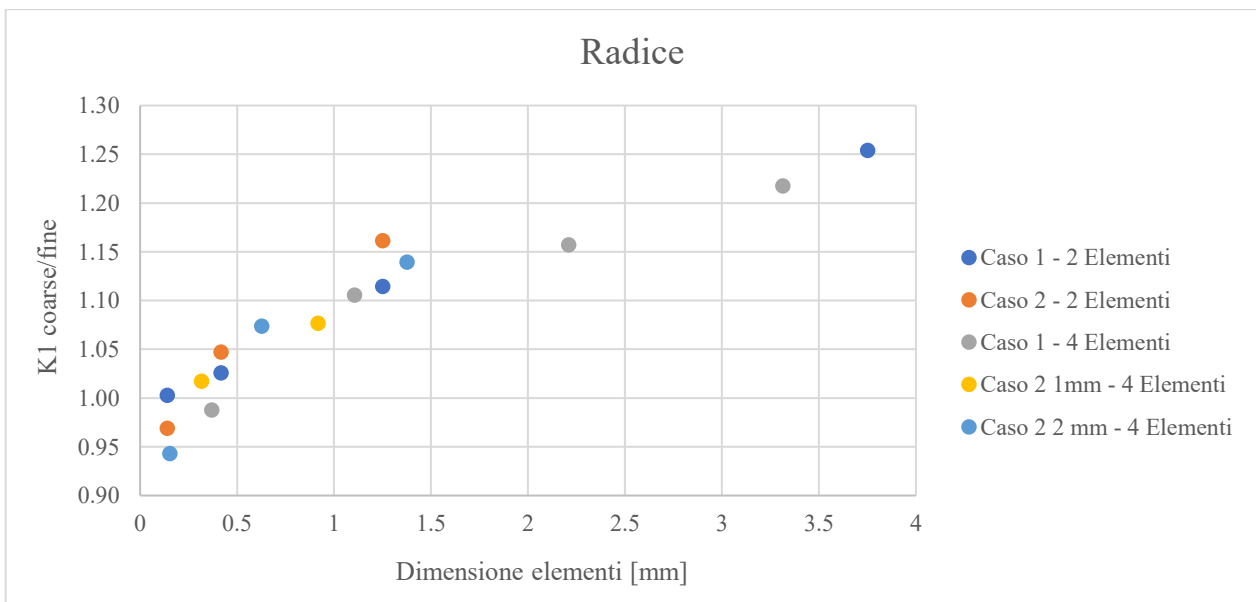


Fig. 7.7 - Risultati K_1 analisi della radice del cordone di saldatura, casi a Parziale Penetrazione

8. CONCLUSIONI

Lo scopo del lavoro svolto è di confrontare il nuovo metodo proposto con quello preesistente e consolidato. Ciò è stato effettuato analizzando diversi modelli in ANSYS© e implementando in Matlab® un programma che, partendo dai risultati ottenuti, permette di ricavare i parametri necessari al calcolo del fattore di intensificazione delle tensioni.

Il nuovo metodo non ha l'obiettivo di risultare più efficace, ma di essere il più possibile accurato, entro un certo valore di errore, operando delle semplificazioni che lo portino ad essere più facilmente applicabile e di immediato utilizzo.

I dati emersi dalle analisi trattate hanno confermato le ipotesi iniziali, e che è quindi possibile ottenere risultati soddisfacenti impiegando minor tempo e risorse.

Inoltre, è stato ulteriormente verificato che, con la progressiva diminuzione della dimensione degli elementi nelle zone interessate da criticità, che corrisponde ad una migliore discretizzazione del modello preso in considerazione, i valori ottenuti migliorano di volta in volta.

I casi presentati in questa tesi sono ovviamente dei modelli semplificati che non replicano la realtà in tutta la sua complessità, seppur sufficientemente rappresentativi di essa.

Partendo da questa consapevolezza, questo lavoro può porre le basi per studi futuri; alcuni esempi possono essere i seguenti: verificare l'efficacia del metodo per sollecitazioni di Modo 2 e Modo misto, estendere le analisi anche al caso tridimensionale e studiare strutture di maggiore complessità geometrica, di vincolo e/o di carico.

9. APPENDICE

Di seguito è riportato il codice realizzato in Matlab, il cui funzionamento viene spiegato in maniera approfondita nel capitolo 4.

```
clearvars
close all
clc

% Parametri materiale
E=206000;
v=0.3;
def=0;

% Geometria intaglio
ang_intaglio = input('Angolo apertura intaglio [deg]:');
duealpha = ang_intaglio*pi/180;
gamma = pi-duealpha/2;

s1 = @(lambda) sin(2*lambda*gamma)+lambda*sin(2*gamma);
s2 = @(lambda) sin(2*lambda*gamma)-lambda*sin(2*gamma);

lambda1 = 0;
x0 = 0;
incremento = 0.1;
while lambda1 < 0.5 || lambda1 > 1
lambda1 = fzero(s1,x0);
x0 = x0 + incremento;
end

lambda2 = 0;
x0 = 0;
incremento = 0.1;
if ang_intaglio <= 102
marg_inf = 0.5;
else
marg_inf = 1;
end
while lambda2 <= marg_inf || lambda2 > 2
lambda2 = fzero(s2,x0);
x0 = x0 + incremento;
end

% Matrice coordinate nodi degli elementi selezionati

dim_mesh = input('Dimensione elementi mesh [mm]:');
str_ele = strcat('elementi_',string(ang_intaglio),'_',string(dim_mesh),'.txt');
file_elementi = fopen(str_ele);
allData = textscan(file_elementi,'%s','delimiter','\n');
allData = allData{1};
allDataNumeric = cellfun(@str2num,allData,'UniformOutput',false);
ele = allDataNumeric(~cellfun(@isempty,allDataNumeric));
a=length(ele{1});
ele = ele(cellfun(@length,ele)==a);
ele = cell2mat(ele);
```

```

ele(:,2:6) = [];
num_elementi = size(ele,1);

% Identificazione elementi triangolari
ele_triang = zeros(num_elementi,1);
riga = 1;
    for i=1:size(ele,1)
        for j=2:4
            for k=j+1:5
                if ele(i,j) == ele(i,k)
                    ele_triang(i) = ele(i,1);
                    riga = riga + 1;
                end
            end
        end
    end
end
%ele(ele_triang,:) = [];
fclose(file_elementi);

% Creazione matrice coordinate nodi
str_nodi = strcat('nodi_',string(ang_intaglio),'_',string(dim_mesh),'.txt');
file_nodi = fopen(str_nodi);
allData = textscan(file_nodi,'%s','delimiter','\n');
allData = allData{1};
allDataNumeric = cellfun(@str2num,allData,'UniformOutput',false);
nodi = allDataNumeric(~cellfun(@isempty,allDataNumeric));
b=length(nodi{1});
nodi = nodi(cellfun(@length,nodi)==b);
nodi = cell2mat(nodi);
fclose(file_nodi);
mat_nodi = nodi;

% Creazione matrice coordinate nodi
mat_coord = zeros(num_elementi*4,3);
riga = 1;
for i = 1:size(ele,1)
    for k = 2:5
        index = find(nodi(:,1)==ele(i,k));
        mat_coord(riga,:) = nodi(index,[1 2 3]);
        riga = riga + 1;
    end
end

% Ordinamento coordinate

% Vettori per lo scambio delle righe
uno_n = [1 4 3 2];
due_p = [2 3 4 1];
due_n = [2 1 4 3];
tre_p = [3 4 1 2];
tre_n = [3 2 1 4];
quattro_p = [4 1 2 3];
quattro_n = [4 3 2 1];

for j = 1:4:(size(ele,1)*4)
    mat = mat_coord(j:j+3,[1 2 3]);
    segno = sum(mat(:,3)); % serve a determinare se l'elemento è sopra o sotto la
    bisettrice
    dist = zeros(4,1);
    % setta origine vicino a nodo 1 in base a coordinate minime

```

```

x_min = min(mat(:,2));

if segno > 0
    y_min = min(mat(:,3));
else
    y_min = max(mat(:,3));
end

origine = [x_min,y_min];

for m = 1:4
    dist(m,:) = norm(origine - mat(m,[2 3])); % distanza di ogni punto dall'origine
end

% Simmetria elemento rispetto asse X
for i=1:4
    mat(:,3) = abs(mat(:,3));
end

[val, pos] = min(dist);
nodo_1 = ele(ceil(j/4),pos+1);

if segno > 0
    if pos == 2
        mat_coord(j:j+3,:) = mat(due_p,:);
    elseif pos == 3
        mat_coord(j:j+3,:) = mat(tre_p,:);
    elseif pos == 4
        mat_coord(j:j+3,:) = mat(quattro_p,:);
    end
else
    if pos == 2
        mat_coord(j:j+3,:) = mat(due_n,:);
    elseif pos == 3
        mat_coord(j:j+3,:) = mat(tre_n,:);
    elseif pos == 4
        mat_coord(j:j+3,:) = mat(quattro_n,:);
    else
        mat_coord(j:j+3,:) = mat(uno_n,:);
    end
end
end

% Matrice sene elementi
str_sene = strcat('sene_',string(ang_intaglio),'_',string(dim_mesh),'.txt');
file_sene = fopen(str_sene);
allData = textscan(file_sene,'%s','delimiter','\n');
allData = allData{1};
allDataNumeric = cellfun(@str2num,allData,'UniformOutput',false);
sene = allDataNumeric(~cellfun(@isempty,allDataNumeric));
a=length(sene{1});
sene = sene(cellfun(@length,sene)==a);
mat_sene = cell2mat(sene);
fclose(file_sene);

% Calcolo K1 tramite nodi bisetttrice
% str_bise = strcat('sigma_y_',string(ang_intaglio),'.txt');
% nodi_bise = fopen(str_bise);
% %nodi_bise = fopen('sigma_y_fine.txt');
% allData = textscan(nodi_bise,'%s','delimiter','\n');

```

```

% allData = allData{1};
% allDataNumeric = cellfun(@str2num,allData,'UniformOutput',false);
% bise = allDataNumeric(~cellfun(@isempty,allDataNumeric));
% lun = length(bise{1});
% bise = bise(cellfun(@length,bise)==lun);
% bise = cell2mat(bise);
% bise(1,:) = [];
% fclose(nodi_bise);
%
% r = bise(:,1);
% sigma_y = bise(:,2);
% K1_nodo = sqrt(2*pi).*r.^(1-lambda1).*sigma_y;
% K1 = sum(K1_nodo)/length(K1_nodo);

% Inserimento manuale valore K1 fine
K1 = 178.5;

% Creazione vettori vuoti
d_mat = zeros(num_elementi,1);
I_a_mat = zeros(num_elementi,1);
A_mat = zeros(num_elementi,1);
I_E1_mat = zeros(num_elementi,1);
I_E2_mat = zeros(num_elementi,1);
I_E12_mat = zeros(num_elementi,1);
I_theta_1_mat = zeros(num_elementi,1);
I_theta_2_mat = zeros(num_elementi,1);
sigma_theta_av_mat = zeros(num_elementi,1);
sigma_rtheta_av_mat = zeros(num_elementi,1);
K1_calc = zeros(num_elementi,1);
var_K1 = zeros(num_elementi,1);

% ANALISI DI OGNI ELEMENTO
for row = 1:num_elementi
    elemento = ele(row,1);
    disp(elemento)

    % Salta il calcolo per gli elementi triangolari
    if ele(row,1) == ele_triang(row)
        continue
    end

% Matrice coordinate elemento
N = mat_coord((row-1)*4+1:(row-1)*4+4,2:3);

%Tolleranza a nodi = 0
eps = 0.00001;

% Aggiunge eps al nodo sull'apice
for i=1:4
    if N(i,1) == N(i,2) && N(i,1) == 0
        N(i,1) = N(i,1) + eps;
    end
end

% Evita che m_i risulti infinito
% % %
if N(1,1) == N(4,1)
    N(4,1) = N(4,1) + eps;
end

```



```

if N(3,1) == N(2,1)
    N(3,1) = N(3,1) + eps;
end

if N(3,1) == N(4,1)
    N(3,1) = N(3,1) + eps;
end
% % %

% Calcolo angoli
theta = zeros(4,1);
for i=1:4
    theta(i,:) = atan2(N(i,2),N(i,1));

    % Aggiunge eps ai theta = 0
    if theta(i) == 0
        theta(i) = theta(i) + eps;
    end

    % Aggiunge eps nel caso 2 theta uguali
    for j=1:3
        if theta(j) == theta(j+1)
            theta(j+1) = theta(j+1) + eps;
        end
    end

    if theta(1) == theta(4)
        theta(4) = theta(4) + eps;
    end
end
disp(theta)
theta_deg = theta.*180./pi;

% Calcolo caso
if theta(3) > theta(2) % Casi 1,2,3,4
    if theta(3) > theta(1) % Casi 1,2
        if theta(1) < theta(2) % CASO 1
            caso = 1;
            disp('Caso 1')
        else % CASO 2
            caso = 2;
            disp('Caso 2')
        end
    else % Casi 3,4
        if theta(1) < theta(4) % CASO 3
            caso = 3;
            disp('Caso 3')
        else % CASO 4
            caso = 4;
            disp('Caso 4')
        end
    end
end
else % Casi 5,6
    if theta(3) < theta(4) % CASO 5
        caso = 5;
        disp('Caso 5')
    else % CASO 6
        caso = 6;
    end
end

```

```

end

% Calcolo parametri area
m = zeros(4,1);
for i=1:3
    m(i,:) = (N(i+1,2)-N(i,2))/(N(i+1,1)-N(i,1));
end
m(4,:) = (N(1,2)-N(4,2))/(N(1,1)-N(4,1));

q = zeros(4,1);
for i=1:3
    q(i,:) = -N(i,1)*(N(i+1,2)-N(i,2))/(N(i+1,1)-N(i,1))+N(i,2);
end
q(4,:) = -N(4,1)*(N(1,2)-N(4,2))/(N(1,1)-N(4,1))+N(4,2);

d = abs(N(2,1)-N(1,1));
d_mat(row) = d;

% Calcolo vettori
p1= @(ang) q(1)./(sqrt(1+(m(1).^2)).*sin(ang-atan(m(1))).*d);
p2= @(ang) q(2)./(sqrt(1+(m(2).^2)).*sin(ang-atan(m(2))).*d);
p3= @(ang) q(3)./(sqrt(1+(m(3).^2)).*sin(ang-atan(m(3))).*d);
p4= @(ang) q(4)./(sqrt(1+(m(4).^2)).*sin(ang-atan(m(4))).*d);

% Assegnazione variabili in base al caso
% CASO 1
if caso == 1
theta_m1=theta(1); theta_m2=theta(2); theta_m3=theta(2);
theta_m4=theta(3); theta_m5=theta(3); theta_m6=theta(4);
p_n1=p4; p_n2=p1; p_n3=p4;
p_n4=p2; p_n5=p4; p_n6=p3;
end

% CASO 2
if caso == 2
theta_m1=theta(2); theta_m2=theta(1); theta_m3=theta(1);
theta_m4=theta(3); theta_m5=theta(3); theta_m6=theta(4);
p_n1=p1; p_n2=p2; p_n3=p4;
p_n4=p2; p_n5=p4; p_n6=p3;
end

% CASO 3
if caso == 3
theta_m1=theta(2); theta_m2=theta(3); theta_m3=theta(3);
theta_m4=theta(1); theta_m5=theta(1); theta_m6=theta(4);
p_n1=p1; p_n2=p2; p_n3=p1;
p_n4=p3; p_n5=p4; p_n6=p3;
end

% CASO 4
if caso == 4
theta_m1=theta(2); theta_m2=theta(3); theta_m3=theta(3);
theta_m4=theta(4); theta_m5=theta(4); theta_m6=theta(1);
p_n1=p1; p_n2=p2; p_n3=p1;
p_n4=p3; p_n5=p1; p_n6=p4;
end

% CASO 5 (3 4 1 2)
if caso == 5

```

```

theta_m1=theta(1); theta_m2=theta(2); theta_m3=theta(3);
theta_m4=theta(4); theta_m5=theta(4); theta_m6=theta(1);
p_n1=p2; p_n2=p1; p_n3=p2;
p_n4=p3; p_n5=p2; p_n6=p4;
end

% CASO 6 (4 3 1 2)
if caso == 6
theta_m1=theta(1); theta_m2=theta(2); theta_m3=theta(3);
theta_m4=theta(2); theta_m5=theta(4); theta_m6=theta(3);
p_n1=p2; p_n2=p1; p_n3=p2;
p_n4=p4; p_n5=p3; p_n6=p4;
end

% EQUAZIONI DI WILLIAMS
X1 = -(sin((1-lambda1)*gamma))/sin((1+lambda1)*gamma);
omega1 = 1/((1+lambda1) + X1*(1-lambda1));

% Parte angolare
sigma_theta_s_1 = @(ang) (1./sqrt(2.*pi)).*omega1.*((1+lambda1).*cos((1-lambda1).*ang)
+ X1.*(1-lambda1).*cos((1+lambda1).*ang));
sigma_r_s_1 = @(ang) (1./sqrt(2.*pi)).*omega1.*((3-lambda1).*cos((1-lambda1).*ang) -
X1.*(1-lambda1).*cos((1+lambda1).*ang));
sigma_rtheta_s_1 = @(ang) (1./sqrt(2.*pi)).*omega1.*((1-lambda1).*sin((1-lambda1).*ang)
+ X1.*(1-lambda1).*sin((1+lambda1).*ang));

% Eq. Williams MODO I
sigma_theta_1 = @(ang) ((r.^(lambda1-1)).*K1).*sigma_theta_s_1(ang);
sigma_r_1 = @(ang) ((r.^(lambda1-1)).*K1).*sigma_r_s_1(ang);
sigma_rtheta_1 = @(ang) ((r.^(lambda1-1)).*K1).*sigma_rtheta_s_1(ang);

% EQUAZIONI DI WILLIAMS MODO 2
X2 = -(sin((1-lambda2)*gamma))/sin((1+lambda2)*gamma);
omega2 = 1/((1-lambda2) + X2*(1+lambda2));

% Parte angolare
sigma_theta_s_2 = @(ang) (1./sqrt(2.*pi)).*omega2.*(-(1+lambda2).*sin((1-lambda2).*ang)
- X2.*(1+lambda2).*sin((1+lambda2).*ang));
sigma_r_s_2 = @(ang) (1./sqrt(2.*pi)).*omega2.*(-(3-lambda2).*sin((1-lambda2).*ang) +
X2.*(1+lambda2).*sin((1+lambda2).*ang));
sigma_rtheta_s_2 = @(ang) (1./sqrt(2.*pi)).*omega2.*((1-lambda2).*cos((1-lambda2).*ang)
+ X2.*(1+lambda2).*cos((1+lambda2).*ang));

% Eq. Williams MODO 2
sigma_theta_2 = @(ang) ((r.^(lambda2-1))*K2).*sigma_theta_s_2(ang);
sigma_r_2 = @(ang) ((r.^(lambda2-1))*K2).*sigma_r_s_2(ang);
sigma_rtheta_2 = @(ang) ((r.^(lambda2-1))*K2).*sigma_rtheta_s_2(ang);

% Elastic Strain Energy
if def == 0
sigma_z_s_1 = @(ang) 0; % Plane Stress
sigma_z_s_2 = @(ang) 0;
else
sigma_z_s_1 = @(ang) v.*(sigma_r_s_1(ang) + sigma_theta_s_1(ang));
sigma_z_s_2 = @(ang) v.*(sigma_r_s_2(ang) + sigma_theta_s_2(ang));
end

W1_s = @(ang) 0.5*(sigma_theta_s_1(ang).*sigma_theta_s_1(ang) + ...
sigma_r_s_1(ang).*sigma_r_s_1(ang) + ...
sigma_z_s_1(ang).*sigma_z_s_1(ang) - ...

```

```

2.*v.*(sigma_theta_s_1(ang).*sigma_r_s_1(ang) + ...
    sigma_theta_s_1(ang).*sigma_z_s_1(ang)+ ...
    sigma_r_s_1(ang).*sigma_z_s_1(ang)) + ...
2.*(1+v).*sigma_rtheta_s_1(ang).*sigma_rtheta_s_1(ang));

W2_s = @(ang) 0.5*(sigma_theta_s_2(ang).^2 + sigma_r_s_2(ang).^2 + sigma_z_s_2(ang).^2
- ...
    2.*v.*(sigma_theta_s_2(ang).*sigma_r_s_2(ang) + ...
        sigma_theta_s_2(ang).*sigma_z_s_2(ang) + ...
        sigma_r_s_2(ang).*sigma_z_s_2(ang)) + ...
    2.*(1+v).*sigma_rtheta_s_2(ang).^2);

W12_s = @(ang) sigma_theta_s_1(ang).*sigma_theta_s_2(ang) +
sigma_r_s_1(ang).*sigma_r_s_2(ang) + sigma_z_s_1(ang).*sigma_z_s_2(ang) - ...
    v.*(sigma_theta_s_1(ang).*sigma_r_s_2(ang) +
sigma_theta_s_1(ang).*sigma_z_s_2(ang) + ...
    sigma_r_s_1(ang).*sigma_theta_s_2(ang) +
sigma_r_s_1(ang).*sigma_z_s_2(ang) + ...
    sigma_z_s_1(ang).*sigma_theta_s_2(ang) +
sigma_z_s_1(ang).*sigma_r_s_2(ang)) + ...
    2.*(1+v).*sigma_rtheta_s_1(ang).*sigma_rtheta_s_2(ang);

W = @(ang) (1/E).*(K1_av.^2).*r.^(2.*(lambda1-1)).*W1_s(ang) + ...
(1/E).*(K2.^2).*r.^(2*(lambda2-1)).*W2_s(ang) + ...
(1/E).*(K1_av.*K2).*r.^(lambda1+lambda2-2).*W12_s(ang);

I_a = 0.5*(integral(@(ang) p_n2(ang).^2 - p_n1(ang).^2,theta_m1,theta_m2) + ...
    integral(@(ang) p_n4(ang).^2 - p_n3(ang).^2,theta_m3,theta_m4) + ...
    integral(@(ang) p_n6(ang).^2 - p_n5(ang).^2,theta_m5,theta_m6));

I_a_mat(row) = I_a;

% Area regione quadrata
A = (d^2)*I_a;
A_mat(row) = A;

I_E1 = (1/(2*lambda1))*(integral(@(ang) ((p_n2(ang).^2 - p_n1(ang).^2).*(W1_s(ang)),theta_m1,theta_m2) + ...
    integral(@(ang) ((p_n4(ang).^2 - p_n3(ang).^2).*(W1_s(ang)),theta_m3,theta_m4) + ...
    integral(@(ang) ((p_n6(ang).^2 - p_n5(ang).^2).*(W1_s(ang)),theta_m5,theta_m6)));

I_E1_mat(row) = I_E1;

I_E2 = (1/(2*lambda2))*(integral(@(ang) ((p_n2(ang).^2 - p_n1(ang).^2).*(W2_s(ang)),theta_m1,theta_m2) + ...
    integral(@(ang) ((p_n4(ang).^2 - p_n3(ang).^2).*(W2_s(ang)),theta_m3,theta_m4) + ...
    integral(@(ang) ((p_n6(ang).^2 - p_n5(ang).^2).*(W2_s(ang)),theta_m5,theta_m6)));

I_E2_mat(row) = I_E2;

L=lambda1+lambda2;
I_E12 = (1/L)*(integral(@(ang) ((p_n2(ang).^L - p_n1(ang).^L).*(W12_s(ang)),theta_m1,theta_m2) + ...
    integral(@(ang) ((p_n4(ang).^L - p_n3(ang).^L).*(W12_s(ang)),theta_m3,theta_m4) + ...

```

```

        integral(@(ang) ((p_n6(ang).^L -
p_n5(ang).^L).*W12_s(ang)),theta_m5,theta_m6));

I_E12_mat(row) = I_E12;

E_t = K1^2*d^(2*lambda1)*I_E1/E + K2^2*d^(2*lambda2)*I_E2/E +
K1*K2*d^(lambda1+lambda2)*I_E12/E;

W_med = E_t/A;

% Strada alternativa - Averaged stresses
I_theta_1 = (1/((lambda1+1)*I_a)).*(integral(@(ang) (p_n2(ang).^(lambda1+1) -
p_n1(ang).^(lambda1+1)).*sigma_theta_s_1(ang),theta_m1,theta_m2) + ...
        integral(@(ang) (p_n4(ang).^(lambda1+1) -
p_n3(ang).^(lambda1+1)).*sigma_theta_s_1(ang),theta_m3,theta_m4) + ...
        integral(@(ang) (p_n6(ang).^(lambda1+1) -
p_n5(ang).^(lambda1+1)).*sigma_theta_s_1(ang),theta_m5,theta_m6));
I_theta_1_mat(row) = I_theta_1;

I_theta_2 = (1/((lambda2+1)*I_a)).*(integral(@(ang) (p_n2(ang).^(lambda2+1) -
p_n1(ang).^(lambda2+1)).*sigma_theta_s_2(ang),theta_m1,theta_m2) + ...
        integral(@(ang) (p_n4(ang).^(lambda2+1) -
p_n3(ang).^(lambda2+1)).*sigma_theta_s_2(ang),theta_m3,theta_m4) + ...
        integral(@(ang) (p_n6(ang).^(lambda2+1) -
p_n5(ang).^(lambda2+1)).*sigma_theta_s_2(ang),theta_m5,theta_m6));
I_theta_2_mat(row) = I_theta_2;

I_rtheta_1 = (1/((lambda1+1)*I_a)).*(integral(@(ang) (p_n2(ang).^(lambda1+1) -
p_n1(ang).^(lambda1+1)).*sigma_rtheta_s_1(ang),theta_m1,theta_m2) + ...
        integral(@(ang) (p_n4(ang).^(lambda1+1) -
p_n3(ang).^(lambda1+1)).*sigma_rtheta_s_1(ang),theta_m3,theta_m4) + ...
        integral(@(ang) (p_n6(ang).^(lambda1+1) -
p_n5(ang).^(lambda1+1)).*sigma_rtheta_s_1(ang),theta_m5,theta_m6));

I_rtheta_2 = (1/((lambda2+1)*I_a)).*(integral(@(ang) (p_n2(ang).^(lambda2+1) -
p_n1(ang).^(lambda2+1)).*sigma_rtheta_s_2(ang),theta_m1,theta_m2) + ...
        integral(@(ang) (p_n4(ang).^(lambda2+1) -
p_n3(ang).^(lambda2+1)).*sigma_rtheta_s_2(ang),theta_m3,theta_m4) + ...
        integral(@(ang) (p_n6(ang).^(lambda2+1) -
p_n5(ang).^(lambda2+1)).*sigma_rtheta_s_2(ang),theta_m5,theta_m6));

sigma_theta_av = K1*d^(lambda1-1)*I_theta_1 + K2_av*d^(lambda2-1)*I_theta_2;
sigma_theta_av_mat(row) = sigma_theta_av;

sigma_rtheta_av = K1*d^(lambda1-1)*I_rtheta_1 + K2_av*d^(lambda2-1)*I_rtheta_2;
sigma_rtheta_av_mat(row) = sigma_rtheta_av;

% Calcolo K1 tramite SENE
K1_calc(row) = sqrt(mat_sene(row,2).*E./abs(I_E1))*d^(-lambda1);
%K2_calc = sqrt(sene(:,2).*E./I_E2)*d^(-lambda2);

% Variazione percentuale
var_K1(row) = ((K1_calc(row)/K1)-1)*100;
%var_K2 = ((K2-K2_calc)/K2)*100;

end

```

```

% Scrittura dati su file .txt
str_risultati = strcat('risultati_',string(ang_intaglio),'_',string(dim_mesh),'.txt');
filename = fopen(str_risultati,"a");
fprintf (filename,'\n Angolo intaglio = %6.2f gradi',ang_intaglio);
fprintf (filename,'\n \n
Elemento\t d\t lambda1\t I_E1\t I_theta1\t sigma_theta_av\t SENE\t K1\t K1_calc\t var_perc
entuale \n');
for row = 1:num_elementi
    fprintf (filename,'\n %2d %15.4f %12.4f %15.7f %15.7f %15.7f %15.7f %15.4f %15.4f
%15.4f',...

    ele(row,1),d_mat(row),lambda1,I_E1_mat(row),I_theta_1_mat(row),sigma_theta_av_mat(row),
    mat_sene(row,2),K1,K1_calc(row),var_K1(row));
end
fclose(filename);

% Matrice risultati
mat_res =
[ele(:,1),d_mat,A_mat,I_a_mat,I_E1_mat,I_E2_mat,I_E12_mat,mat_sene(:,2),K1_calc,var_K1]
;

```

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. L. Williams, "Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension," *Journal of Applied Mechanics*, 1952.
- [2] M. Zappalorto, A. Pontefisso and P. A. Carraro, "On the use of elemental quantities to compute NSIFs at pointed V-notches with non regular coarse meshes," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021.
- [3] G. Cricri, "Appunti di Meccanica della Frattura Elastica lineare".
- [4] C. E. Inglis, *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*, 1913.
- [5] R. Nobile, "Lezioni del corso di Calcolo e Progetto di Macchine".
- [6] G. B. Airy, "On the Strains in the Interiors of Beams," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pp. 49-79, 1863.
- [7] B. Gross and A. Mendelson, "Elastostatic analysis of V-Notched plates," *International Journal of Fracture Mechanics*, 1972.
- [8] P. Lazzarin and R. Zambardi, "A finite-volume-energy based approach to predict the static and fatigue behavior of components with sharp V-shaped notches," *International Journal of Fracture*, pp. 275-298, 2001.
- [9] M. Colussi, "Massive fatigue assessment of welded megastructures by advanced methods".
- [10] M. Zappalorto, *Appunti del corso di Meccanica dei materiali*, 2019-2020.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio innanzitutto il professore Michele Zappalorto, per l'opportunità e la disponibilità mostrata durante il lavoro.

Ringrazio in particolare la mia ragazza Alberta, che mi ha accompagnato durante tutto questo percorso, dandomi la spinta necessaria quando più ne avevo bisogno.

Un ringraziamento anche ai miei genitori Ermelinda e Carlo, che mi hanno supportato in questi anni universitari, e a mio fratello Stefano, che mi aiutato a superare più di qualche esame.

Ringrazio anche le mie due compagnie, i DALE e gli Herta, che tra serate e calcetti mi hanno distratto (in senso positivo) dai libri.

Infine, voglio concludere con la citazione di un luminare dei nostri tempi, le cui parole sono per me grande fonte d'ispirazione: "Non è nelle stelle che è conservato il nostro destino, ma in noi stessi. Uomini forti, destini forti; uomini deboli, destini deboli, non c'è altra strada".