



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

TESI MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**COMPORTAMENTO STATICO E A FATICA DI
PROVINI INTAGLIATI, REALIZZATI IN PPS
RINFORZATO CON FIBRE CORTE DI VETRO**

RELATORE
MAURO RICOTTA
UNIVERSITÀ DI PADOVA

CANDIDATO
LUCA DARIO

Anno accademico 2021-2022

13 aprile, 2022

Sommario

I materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre corte, oggi giorno vengono sempre più utilizzati in ambito strutturale perché possiedono ottime proprietà di resistenza in relazione al proprio peso, basso costo di realizzazione, e hanno la possibilità, tramite il processo di stampaggio ad iniezione, di essere utilizzati per dare vita a componenti che hanno geometrie complesse, senza rinunciare agli alti volumi produttivi.

In questo elaborato vengono condotte delle prove sperimentali su provini aventi un intaglio a V raccordato realizzati in PPS-40GF mediante il processo di stampaggio ad iniezione. I risultati sperimentali vengono confrontati con quelli ottenuti su provini costituiti dallo stesso materiale ma aventi degli intagli realizzati tramite il processo di fresatura (le prove sperimentali sui provini fresati sono state condotte precedentemente in altri studi). Da tale confronto è emerso che i provini iniettati hanno sempre mostrato una resistenza statica e a fatica sempre superiore rispetto ai provini fresati (tra il 10% e il 30% superiore).

Per la statica, viene proposta la verifica strutturale tramite l'approccio basato sul fattore di intensificazione delle tensioni generalizzato (GSIF) normalizzato; i risultati sperimentali ottenuti dalle prove statiche sono in buon accordo con il modello ipotizzato. Per la fatica, viene proposto il criterio basato sulla densità di energia di deformazione lineare elastica (SED) mediata all'interno del volume di controllo. Tale criterio è stato in grado di condensare i punti sperimentali relativi, sia alle prove a fatica condotte sui provini fresati che sugli iniettati, indipendentemente dalla geometria dell'intaglio, in un'unica curva con la relativa banda di dispersione.

L'elaborato si suddivide in 7 capitoli, che vengono riassunti brevemente qui di seguito.

- **Capitolo 1:** vengono riportati alcuni dei più importanti criteri per la verifica strutturale e a fatica applicabili al PPS-40GF
- **Capitolo 2:** viene descritta la realizzazione dei provini, e analizzata la morfologia degli stessi tramite delle simulazioni di processo e delle analisi tomografiche
- **Capitolo 3:** vengono riportate le prove sperimentali statiche condotte sui provini iniettati, con i relativi risultati confrontati con quelli dei provini fresati
- **Capitolo 5:** vengono riportate le prove sperimentali a fatica condotte sui provini iniettati, con i relativi risultati confrontati con quelli dei provini fresati
- **Capitolo 6:** vengono riportate le analisi strutturali e a accoppiate strutturali e di processo; i risultati di tali analisi vengono utilizzati per applicare i criteri di verifica strutturale, sia per la statica che per la fatica

- **Capitolo 7:** in questo capitolo finale vengono riassunti i risultati più importanti ottenuti nei capitoli precedenti

Indice

SOMMARIO	iii
INDICE DELLE FIGURE	vii
INDICE DELLE TABELLE	xiii
I RICERCA BIBLIOGRAFICA	I
I.1 Statica	I
I.1.1 Cohesive zone model	2
I.1.2 Effetto della lunghezza delle fibre	6
I.1.3 Effetto scala	6
I.1.4 Altri studi	7
I.1.5 Modelli proposti sul PPS	8
I.1.6 Criterio di resistenza basato sul fattore di intensificazione delle tensioni generalizzato	14
I.2 Fatica	17
I.2.1 La curva Atzori-Lazzarin-Meneghetti	19
I.2.2 Estensioni MFLE agli intagli a V a spigolo vivo	21
I.2.3 Criterio basato sulla densità di energia di deformazione	24
I.2.4 Esempi di applicazione del SED	25
I.2.5 Altri studi	27
2 REALIZZAZIONE PROVINI E ANALISI MORFOLOGICHE	31
2.1 Stampaggio	31
2.2 Simulazioni di processo	33
2.3 Analisi tomografica dei provini	37
2.4 Confronto tra analisi tomografica e simulazione di processo <i>Moldflow</i>	42
2.5 Stima delle proprietà elastiche	44
3 CARATTERIZZAZIONE STATICA DEL MATERIALE	47
3.1 Apparato strumentale	47
3.2 proprietà elastiche dei provini realizzati per fresatura	51
3.3 Prove di trazione sui provini lisci	53
3.4 Prove di trazione su provini intagliati	56
3.5 Analisi delle superfici di frattura	60

3.6	Analisi dei risultati e confronto con i risultati dei provini fresati	64
4	CARATTERIZZAZIONE A FATICA DEL MATERIALE	69
4.1	Introduzione	69
4.2	Apparato sperimentale	70
4.3	Prove a fatica sui provini lisci	70
4.4	Prove a fatica su provini intagliati	71
4.5	Risultati prove sperimentali	74
4.6	Confronto con provini fresati	79
4.7	Analisi delle superfici di frattura	83
5	ANALISI FEM E ANALISI DEI RISULTATI	89
5.1	Analisi preliminari	89
5.1.1	Determinazione delle proprietà elastiche da utilizzare nelle simulazioni	92
5.1.2	Studio della convergenza	95
5.2	Campi di tensione	97
5.3	Calcolo della tenacità a frattura	102
5.4	Calcolo del GSIF normalizzato per i provini testati staticamente	103
5.5	Analisi dei dati a fatica in termini di GSIF	105
5.6	Analisi dei dati a fatica tramite il SED	108
5.7	Analisi dei provini in PPS-40GF a fatica tramite il SED	112
6	CONCLUSIONI	115
A	GUIDA HELIUS PFA	119
B	SCHEDE PROVINO	133
C	CODICE PYTHON	189
	BIBLIOGRAFIA	231

Indice delle figure

1.1	<i>cohesive crack</i> all'apice di un intaglio a V	4
1.2	Valori di GSIF adimensionale per intagli ad U in funzione del raggio dell'intaglio adimensionale	5
1.3	Diagramma schematico che mostra la tecnica di previsione della resistenza	7
1.4	Geometria di un intaglio a V raccordato con relativo sistema di riferimento	12
1.5	Dati sperimentali su ceramici e polimeri riassunti in termini di GSIF adimensionale	14
1.6	Grafico schematico della tenacità a frattura apparente e dell'effetto del parametro m nell'eq. (1.38)	17
1.7	Diagramma Kitagawa-Takahashi [1]	19
1.8	Diagramma Atzori-Lazzarin-Meneghetti [1]	20
1.9	Sistema di riferimento in coordinate cilindriche per un V-notch [2]	22
1.10	Diagramma di Kitagawa generalizzato [2]	23
1.11	Volume strutturale per V-notch raccordato [3]	25
1.12	Effetto della concentrazione delle tensioni sulla resistenza a fatica per $R = -1$	26
1.13	Dati sperimentali riordinati in termini di SED mediato all'interno del volume di controllo [4]	27
1.14	Riassunto dei più importanti micromodelli di frattura durante la propagazione stabile della cricca nei polimeri rinforzati con fibre di vetro corte	29
1.15	Velocità di propagazione della cricca nel nylon66 rinforzato, basse velocità di iniezione, in funzione di (grafico sinistra) fattore di intensificazione delle tensioni (δK) e (grafico destra) in funzione del SERR (δG) (punto) parallelo, (croce) perpendicolare	30
1.16	Schematizzazione del meccanismo <i>fiber avoidance mode</i>	30
2.1	Immagini dell'interno della pressa: a sinistra lo stampo, a destra il gruppo di iniezione	32
2.2	a) Geometria della cavità dello stampo, b) dettaglio della strizione e c) geometria inserto per provini con raggio intaglio di $5mm$	33
2.3	Schema dell'effetto <i>skin-core-skin</i> in componenti realizzati per stampaggio ad iniezione	34
2.4	Mesh utilizzata nelle simulazioni di stampaggio ad iniezione con Moldflow. Le zone in prossimità degli intagli sono state infittite essendo le aree di maggiore interesse [5]	35

2.5	Mapa a colori rappresentativa del tensore di orientazione T_{yy} per i 3 tipi di raggio di raccordo degli in tagli: (a) $R = 0.2mm$, (b) $R = 1mm$ e (c) $R = 5mm$. È presente anche un'immagine di dettaglio per ogni geometria focalizzata nella zona intagliata	36
2.6	Schema di funzionamento della tomografia computerizzata a raggi X	37
2.7	Radiografia della sezione frontale del provino con $R = 1mm$. Si riescono a notare le fibre che presentano una tonalità di grigio più chiara	38
2.8	Esempio di modello 3D ottenuto dal tomografo, vengono anche riportate alcune viste in scala di grigi, a sinistra dell'immagine la legenda che indica a cosa si riferiscono le varie tonalità di grigio	39
2.9	Provini stampati in <i>PPSGF40</i> e campioni prelevati per le analisi tomografiche; (a) $R = 0.2mm$, (b) $R = 1mm$ e (c) $R = 5mm$. L'intaglio destro e sinistro sono distinti da un pallino bianco [5]	39
2.10	Verifica di simmetria nell'orientazione delle fibre tra intaglio sinistro e destro del provino $R = 1mm$	40
2.11	Risultati tomografia per le tre geometrie di intaglio. (a) $R = 0.2mm$, (b) $R = 1mm$ e (c) $R = 5mm$	41
2.12	Confronto tra i risultati dell'analisi tomografica e della simulazione mold-flow per il provino $R = 1mm$	42
2.13	Confronto tra i risultati dell'analisi tomografica e della simulazione mold-flow per il provino $R = 0.2mm$	43
3.1	Macchina di prova servo-pneumatica utilizzata per le prove sperimentali	48
3.2	Apparato sperimentale utilizzato per osservare la cricca costituito da base di supporto e microscopio	49
3.3	Apparato sperimentale utilizzato per osservare la cricca nel retro del provino costituito da base di supporto e microscopio	49
3.4	Immagine della macchina di prova Mini-Bionix utilizzata per le prove sperimentali	50
3.5	Estensometro posizionato nella zona di strizione del provino durante le prove di trazione statiche dei provini lisci	50
3.6	Schematizzazione della piastra stampata ad iniezione da cui sono ottenuti diversi provini a differenti orientazioni θ [6]	52
3.7	Curve <i>stress-strain</i> ingegneristiche per uno stato assiale di (a) trazione e (b) compressione [6]	53
3.8	Geometria dei provini lisci	54
3.9	Curve <i>stress-strain</i> dei provini lisci testati	55
3.10	Valutazione del modulo elastico tramite una regressione lineare sui valori sperimentali, vengono qui considerati i valori di tensione fino a 30 MPa	56
3.11	Geometrie utilizzate per la caratterizzazione statica di provini intagliati	57
3.12	Grafico Forza-Spostamento dei provini $r = 0.2 mm$ testati	58

3.13	Grafico Forza-Spostamento dei provini $r = 1 \text{ mm}$ testati	58
3.14	Grafico Forza-Spostamento dei provini $r = 5 \text{ mm}$ testati	59
3.15	a) Macchinario <i>Denton Vacuum Desk VHP</i> per il rivestimento e b) un'immagine del SEM	60
3.16	Superficie di frattura osservata nei provini testati staticamente in [6]	61
3.17	Superficie di frattura osservata nei provini testati staticamente nel presente lavoro	62
3.18	Superficie di frattura osservata nei provini testati staticamente: in questa immagine ingrandita si può notare la deformazione della matrice	63
3.19	Grafico Forza-spostamento dei provini intagliati testati a trazione in [6]	65
3.20	Grafico che mostra la tensione netta a rottura al variare di K_{tn} dei provini testati in [6]	65
3.21	Tabella riassuntiva dei dati delle prove di trazione [6], a è la profondità dell'intaglio	66
3.22	dati sperimentali dei provini [6] analizzati in termini di GSIF, in rosso la funzione di equazione ???	67
4.1	Grafico <i>stress-life</i> dei provini lisci testati, confrontati con quelli Rocchi [7]	71
4.2	Geometrie utilizzate per la caratterizzazione a fatica di provini intagliati	72
4.3	Cricca osservata al microscopio digitale sul provino <i>R1_11_fat</i> nel lato frontale a 671981 cicli	73
4.4	Cricca osservata al microscopio digitale sul provino <i>R1_11_fat</i> nel retro a 680000 cicli	73
4.5	Curve <i>Stress-life</i> dei provini $r = 0.2 \text{ mm}$ testati	76
4.6	Curve <i>Stress-life</i> dei provini $r = 1 \text{ mm}$ testati	76
4.7	Curve <i>Stress-life</i> dei provini $r = 5 \text{ mm}$ testati	77
4.8	Curve inneschi per le tre geometrie testate	77
4.9	Curve di rottura per le tre geometrie testate	78
4.10	Curve <i>Stress-life</i> dei provini fresati Rocchi [7]	79
4.11	Confronto delle curve inneschi fresati e iniettati per i provini con $R = 0.2 \text{ mm}$	81
4.12	Confronto delle curve inneschi fresati e iniettati per i provini con $R = 1 \text{ mm}$	81
4.13	Confronto delle curve inneschi fresati e iniettati per i provini con $R = 5 \text{ mm}$	82
4.14	Confronto delle curve di rottura fresati e iniettati per i provini con $R = 0.2 \text{ mm}$	82
4.15	Confronto delle curve di rottura fresati e iniettati per i provini con $R = 1 \text{ mm}$	83
4.16	Confronto delle curve di rottura fresati e iniettati per i provini con $R = 5 \text{ mm}$	83
4.17	Confronto tra percentuale di vita a fatica dei provini iniettati contro fresati	84
4.18	Immagini SEM a vari ingrandimenti della superficie di frattura in corrispondenza dell'apice dei provini testati a fatica	85

4.19	A sinistra la superficie di frattura dei provini a fatica nella zona di rottura di schianto, a destra la superficie di frattura dei provini testati staticamente . . .	86
4.20	A sinistra la superficie di frattura dei provini a fatica all'apice, a destra la superficie di frattura dei provini testati staticamente all'apice	86
4.21	Immagine che mostra la zona di transizione tra la rottura di schianto (nella parte destra dell'immagine) e la zona in cui avviene propagazione della cricca (a sinistra dell'immagine)	87
5.1	Schematizzazione del modello strutturale Ansys (destra) che combina le proprietà del materiale ritagliate nel modello Moldflow (sinistra)	90
5.2	Schematizzazione del modello Ansys e del modello Moldflow con angolo di 45° tra direzione fibre e direzione di applicazione del carico	91
5.3	Schematizzazione del modello Ansys e del modello Moldflow con angolo di 90° tra direzione fibre e direzione di applicazione del carico	91
5.4	Grafico delle coppie di punti tensione-deformazione utilizzate per le analisi, relative alle proprietà di compromesso scelte di tabella 5.4	93
5.5	Rette di approssimazione per il tratto iniziale dei punti di figura 5.4, la pendenza delle rette (che corrisponde al modulo elastico) è in linea con le proprietà di tabella 5.4	94
5.6	Schema del modello FEM dei provini realizzati in Ansys	95
5.7	Affinamento della mesh in corrispondenza dell'apice intaglio	96
5.8	Esempio di mesh utilizzata nelle simulazioni	96
5.9	Grafico di convergenza per determinare la dimensione di elemento da utilizzare	97
5.10	mesh all'apice utilizzata nelle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 0.2 \text{ mm}$	98
5.11	Schema rappresentativo della disposizione fibre nel provino fresato (a sinistra) e di quello iniettato (a destra)	99
5.12	Campi di tensione ricavati dalle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 0.2 \text{ mm}$	99
5.13	Campi di tensione ricavati dalle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 1 \text{ mm}$	100
5.14	Campi di tensione ricavati dalle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 5 \text{ mm}$	100
5.15	Valori delle tensioni ricavati da figura 5.12 per il calcolo di λ (grado di singolarità delle tensioni)	103
5.16	Valori di K_I calcolati per i punti di figura 5.15 con la formula 1.46	104
5.17	Grafico che mostra i valori sperimentali rianalizzati in termini di GSIF normalizzato. I dati sperimentali vengono condensati in un'unica curva con le relative bande di dispersione al 20%	105
5.18	Grafico GSIF-Numero cicli ad innesco, in cui i valori sperimentali vengono approssimati da una unica curva indipendentemente dalla geometria	107

5.19	Grafico Ampiezza tensione-Numero cicli ad innesco, in cui i valori sperimentali vengono approssimati da una unica curva indipendentemente dalla geometria	107
5.20	Esempio del raggio di controllo utilizzato nei provini $r = 0 \text{ mm}$	109
5.21	Dati sperimentali rianalizzati in termini di SED mediato sul composito . . .	109
5.22	Dati sperimentali rianalizzati in termini di SED mediato sulla matrice . . .	111
5.23	Dati sperimentali sul PPS-40GF rianalizzati a fatica in termini di ampiezza di tensione	113
5.24	Dati sperimentali sul PPS-40GF rianalizzati a fatica in di SED mediato . . .	113
6.1	Schema della disposizione delle fibre all'apice intaglio nel provino fresato (sinistra) e nel provino iniettato (destra)	115
6.2	Grafico che mostra i valori sperimentali rianalizzati in termini di GSIF normalizzato. I dati sperimentali vengono condensati in un'unica curva con le relative bande di dispersione al 20%	116
6.3	Dati sperimentali sul PPS-40GF rianalizzati a fatica in termini di SED mediato	117

Indice delle tabelle

3.1	Caratteristiche di resistenza dei lisci in PPS GF40 [6]	52
3.2	Proprietà meccaniche dei provini [6]	52
3.3	Proprietà elastiche derivanti dalla teoria dell'elasticità per PPS GF40 [6]	53
3.4	Dimensioni principali dei provini lisci	54
3.5	Dimensioni principali dei provini lisci	54
3.6	Tabella riassuntiva dei provini $r = 0.2 \text{ mm}$ testati	56
3.7	Tabella riassuntiva dei provini $r = 1 \text{ mm}$ testati	57
3.8	Tabella riassuntiva dei provini $r = 5 \text{ mm}$ testati	57
3.9	Tabella comparativa dei dati di σ_{UTS} dei provini fresati [6] e di quelli iniettati	67
4.1	Risultati sperimentali delle prove a fatica sui provini lisci	70
4.2	Misure geometriche dei provini testati a fatica	74
4.3	Risultati sperimentali prove a fatica	75
4.4	Risultati sperimentali delle prove a fatica sui provini intagliati di Rocchi[7]	80
4.5	Risultati sperimentali delle prove a fatica sui provini intagliati di Rocchi[7]	80
5.1	Proprietà elastiche del materiale [6]	90
5.2	Proprietà elastiche ricavate dalle simulazioni	91
5.3	Tentativi eseguiti per trovare le proprietà elastiche di compromesso	92
5.4	Proprietà elastiche di compromesso, scelte per le successive simulazioni	92
5.5	Dati dello studio convergenza relativi alla figura	97
5.6	Valori di tensione di picco ricavati dalle analisi FEM svolte	101
5.7	Dati corrispondenti a $\lambda - 1$ ricavati dalla figura 5.15	102
5.8	Valori di GSIF (K_{Iai}) calcolati per ogni punto sperimentale	106
5.9	Valori del raggio di controllo ricavati dalle operazioni di taratura	110
5.10	Tabella comparativa dei valori di dispersione relativa ai quattro approcci utilizzati per l'analisi risultati a fatica	112
5.11	Tabella comparativa dei valori di dispersione relativa all'analisi in ampiezza tensione e SED mediato sui dati sperimentali ricavati dalle prove a fatica sui provini in PPS-40GF (sia iniettati che fresati)	114

1

Ricerca bibliografica

I.1 STATICA

In letteratura vengono proposti diversi criteri per la previsione della resistenza statica di componenti intagliati e criccati.

Gli autori P.K. Govindan Potti, B.N. Rao e V.K. Srivastava [8] applicano il criterio *Point stress* e il criterio *Average stress* per convalidare la resistenza di provini intagliati realizzati per stampaggio ad iniezione e provini intagliati realizzati per fresatura di piastre lisce ricavate per stampaggio ad iniezione.

Il *Point stress criterion* stabilisce che la rottura finale del composito avviene quando la tensione in una certa zona supera la resistenza del laminato, σ_0 . In particolare, la rottura avviene quando la tensione $\sigma_y \geq \sigma_0$ ad una certa distanza d_0 dalla discontinuità, ossia:

$$\sigma_y(x, 0) = \sigma_0 \quad (1.1)$$

con $x = R + d_0$.

Il *Average Stress criterion* similmente, stabilisce che la rottura avviene quando la tensione media, calcolata fino ad una certa distanza a_0 dall'intaglio, raggiunge il valore di rottura del materiale σ_0 :

$$(1/a_0) \int_R^{R+a_0} \sigma_y(x, 0) dx = \sigma_0 \quad (1.2)$$

Vengono presentate una serie di relazioni per determinare le dimensioni caratteristiche da combinare con i due sopra citati criteri di resistenza. Sono state testate due piastre in compositi in fibra lunga e corta di Nylon/vetro con un foro centrato realizzato per fresatura in un caso, e per stampaggio ad iniezione nell'altro. La relazione lineare tra $K_{Q\infty}$ e σ_N^∞ (1.3) assunta per i due criteri, rappresenta la dimensione caratteristica come una funzione polinomiale quadratica in termini di σ_N^∞ . Essa è utile per la determinazione della dimensione caratteristica che serve per il computo della resistenza del composito. La variazione della dimensione caratteristica dipende dal valore del parametro m . Se m è zero, la dimensione caratteristica è indipendente dalla dimensione dell'intaglio.

$$K_{Q\infty} = K_F(1 - m(\sigma_N^\infty/\sigma_0)) \quad (1.3)$$

F.J. Gómez, G.V. Guinea e M. Elices [9] invece hanno studiato dei criteri di resistenza applicabili a materiali elastici con intagli ad U. In questo caso infatti la meccanica della frattura lineare elastica non è applicabile perchè non c'è singolarità delle tensioni. Nel loro studio vengono rivisti diversi criteri proposti da altri autori (tra cui per citarne qualcuno, il criterio basato sul SED di Lazzarin e Zambardi (2001) o il criterio della tensione media). Tutti questi criteri possono essere riassunti in uno solo in cui:

$$\frac{K_C^U}{K_{IC}} = \sqrt{1 + \frac{\pi R}{4 l_{ch}}} \quad (1.4)$$

dove K_C^U è il fattore di intensificazione delle tensioni critico, K_{IC} è la tenacità a frattura del materiale, e l_{ch} è la lunghezza caratteristica. Questa espressione in effetti è una rielaborazione del criterio della tensione media. Questo criterio funziona bene per i 18 materiali ceramici testati e per il PMMA a $-60^\circ C$ (figura 1.5). Inoltre, ha restituito buoni risultati per materiali fragili che possono essere modellati usando il *cohesive zone model*.

1.1.1 COHESIVE ZONE MODEL

Il *cohesive zone model* [10] è generalmente accettato come una semplificazione realistica della frattura di materiali fragili (figura 1.1). Le più semplici assunzioni riguardo tale modello sono:

- la *cohesive zone crack* inizia nel punto in cui la massima tensione principale σ_1 raggiunge per prima un valore di tensione critico nominato *cohesive strength* (σ_t). La *cohesive crack* si forma perpendicolare alla direzione della tensione principale. Dato che questa tensione è indotta dall'intaglio, la *cohesive zone* si forma adiacente all'intaglio.

- dopo la sua formazione la *cohesive zone* si propaga trasferendo le tensioni da una faccia all'altra. Una volta che la cricca è iniziata, la tensione trasferita (*cohesive stress*) è una funzione storia di avanzamento della cricca. Per modo I in apertura, la tensione trasferita, σ , è perpendicolare alle facce della cricca ed è una funzione unica dell'apertura della cricca (di *softening curve*)

$$\sigma = f(\omega) \quad (1.5)$$

Notiamo due proprietà della *softening curve*:

1. σ_t è la tensione corrispondente alla creazione ed inizio apertura della cricca

$$\sigma(0) = \sigma_t \quad (1.6)$$

2. la *cohesive fracture energy* G_C , è l'energia esterna richiesta per creare rompere completamente una superficie unitaria della *cohesive crack* ed è data dall'area al di sotto della *softening curve*:

$$G_C = \int_0^{\omega_c} f(\omega) d\omega \quad (1.7)$$

dove ω_c è la *critical crack opening*, dopo cui il *cohesive stress* diventa zero.

La semplice formulazione del *cohesive model* è in grado di catturare gli aspetti principali della frattura di materiali fragili, in particolare di componenti con intagli raccordati che non mostrano singolarità delle tensioni. Questo modello può essere generalizzato in modi diversi:

1. il materiale al di fuori della zona di processo, considerato fin qui isotropo lineare elastico, si può modellare in maniera più complessa.
2. la *softening curve* può dipendere dalla triassialità o dalla storia di carico precedente
3. la formulazione per il modo I, può essere generalizzata al modo I misto

Il *cohesive zone model* viene utilizzato da Gomez et al. [11] per determinare il carico di rottura di componenti con intagli a V raccordati. In questi casi infatti non è possibile utilizzare la MFLE, poichè non c'è singolarità delle tensioni. Sono state poi eseguite delle simulazioni numeriche, in cui il *cohesive zone model* è stato utilizzato per determinare il carico massimo, utilizzato a sua volta per determinare il fattore di intensificazione delle tensioni generalizzato critico. I risultati sono stati poi confrontati con i test sperimentali, che si sono rilevati essere in buon accordo con le previsioni numeriche. Viene quindi esteso il concetto di fattore di

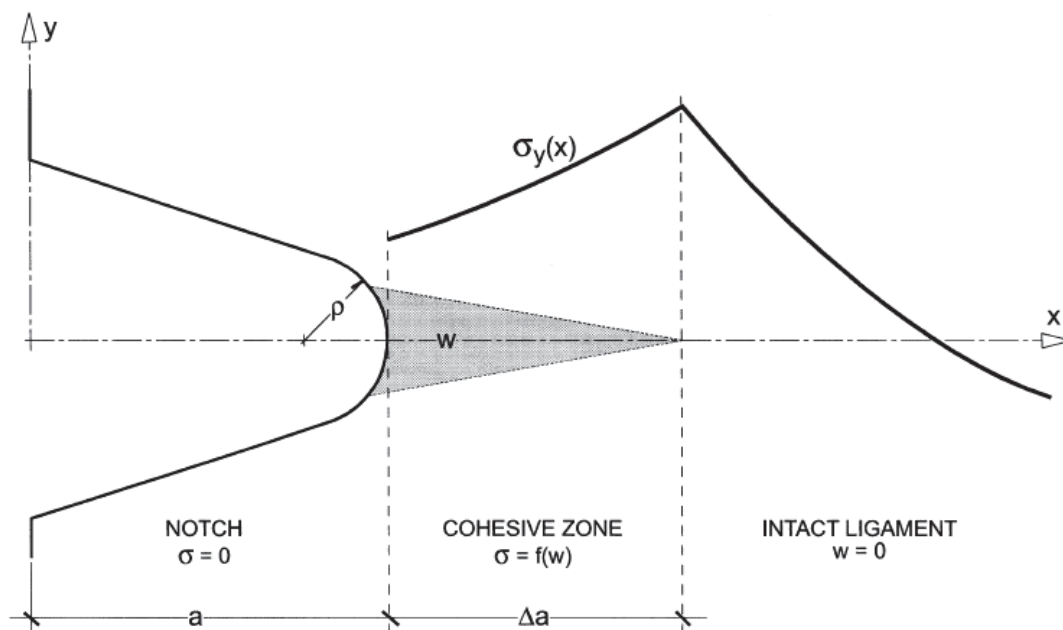


Figura 1.1: cohesive crack all'apice di un intaglio a V

concentrazione delle tensioni critico (ben noto nel caso di intagli a V acuti) ad alcuni casi di intagli a V raccordati (l'estensione può considerarsi valida nel caso in cui il campo di tensione all'apice dell'intaglio è simile a quello singolare che si ottiene nel caso di intaglio a V acuti). Viene infine proposto un approccio adimensionale in cui il fattore di intensificazione delle tensioni generalizzato viene diviso per $K_C l^{(0.5 - \lambda)}_{ch}$ dove l_{ch} è la lunghezza caratteristica e il raggio di raccordo viene diviso per l_{ch} . In figura 1.2 c'è un grafico che mostra un esempio di come i dati sperimentali e i valori numerici possano essere rappresentati secondo questo approccio.

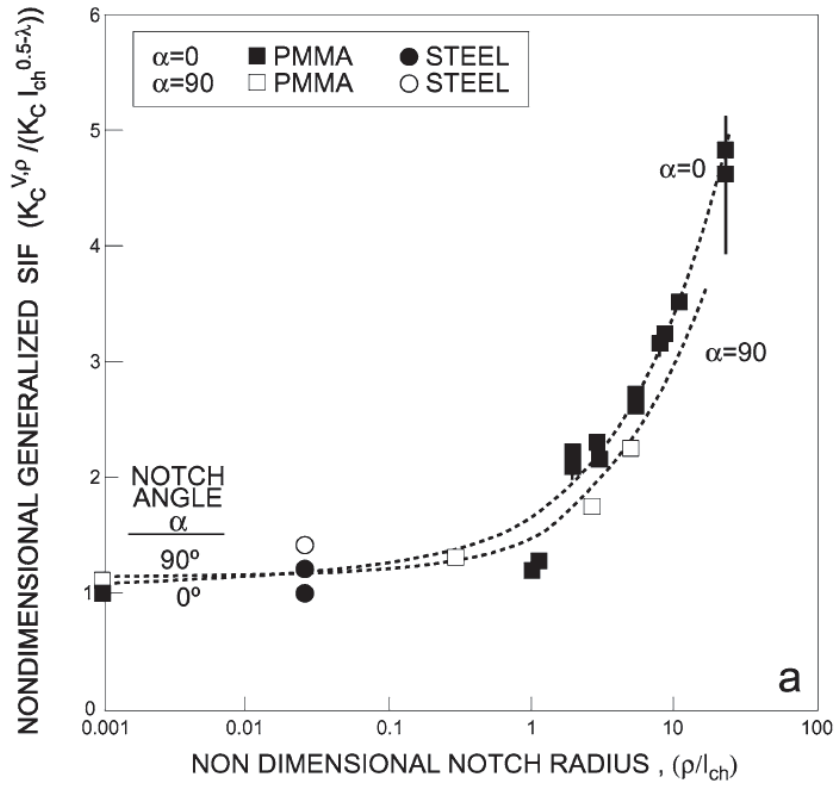


Figura 1.2: Valori di GSIF adimensionale per intagli ad U in funzione del raggio dell'intaglio adimensionale

Nel caso di intagli a V raccordati in materiali ceramici un criterio di resistenza viene proposto da F.J. Gomez e M. Elices [12]. La procedura proposta per il calcolo del carico di rottura dei componenti a partire da la tensione di rottura del materiale e la tenacità a frattura (oltre alle informazioni sulla geometria) è la seguente;

- calcolo del raggio adimensionale R/l_{ch}
- si valuta il fattore di intensificazione delle tensioni attraverso la seguente:
- dopo aver calcolato $K_C^{V,R}$, il carico di rottura P_{max} , può essere determinato dalla seguente: dove $K^{V,R}(P_1)$ può essere ottenuto da simulazioni elastiche per un valore arbitrario del carico P_1 .

$$\frac{K_C^{V,R}}{K_{IC} l_{ch}^{0.5-\lambda}} = 0.82403 + 0.64091(R/l_{ch})^{1/2} + 0.03307(R/l_{ch}) \quad (1.8)$$

Questa procedura è ben supportata dal già citato metodo del *cohesive zone* e da prove sperimentali su diversi materiali ceramici. Viene infine mostrato che il valore limite del raggio critico R_c (ossia il raggio dell'intaglio sotto il quale il comportamento è assimilabile a quello di una cricca) è all'incirca $0.1l_{ch}$.

1.1.2 EFFETTO DELLA LUNGHEZZA DELLE FIBRE

Gli autori in [13] studiano l'effetto della lunghezza delle fibre nella resistenza di compositi epossidici rinforzati con fibre di carbonio. Viene sviluppato un modello per la previsione della resistenza a fatica. Esso si basa sulla sviluppo di una zona danneggiata nel materiale che parte dall'apice dell'intaglio. Nella figura 1.3 vediamo due curve che determinano l'andamento della tensione al variare della dimensione della zona danneggiata (*damaged zone*). La curva *Stabel crack growth*, ricavata utilizzando il criterio della tensione media, indica che lo stress necessario per far aumentare la zona danneggiata aumenta con l'aumentare della stessa. La curva *Propagation* invece (ricavata seguendo l'approccio della meccanica della frattura), indica che lo stress diminuisce all'aumentare della dimensione della cricca (*damaged zone*). La resistenza del composito corrisponde al punto dove le due curve si incontrano. Questo punto rappresenta la dimensione critica della *damaged zone*.

I dati sperimentali poi danno una ragionevole conferma dei valori di resistenza predetti dal modello proposto.

S. Toll e C. G. Aronsoni in [14] hanno studiato la resistenza di compositi in poliammide intagliati. I compositi a fibra lunga hanno mostrato una minore sensibilità all'intaglio rispetto a compositi a fibra corta; i primi hanno una tensione di rottura (provino liscio) più bassa rispetto ai secondi (questo per l'orientazione delle fibre). Il comportamento opposto si ha invece per i componenti intagliati. E' stata poi riscontrata una differenza dal 6% al 25% tra le piastre con un foro centrale realizzate per stampaggio ad iniezione (maggior resistenza) rispetto alle stesse piastre il cui foro è stato ricavato per fresatura (minor resistenza). Sono poi stati applicati 5 diversi modelli per la previsione della tensione di rottura; sono stati ricavati dei buoni risultati nella previsione dell'effetto della dimensione della cricca.

1.1.3 EFFETTO SCALA

Gli autori in [15] mostrano come ci sia una dipendenza dell'effetto scala nella resistenza di laminati compositi. L'effetto scala osservato (che è in accordo con la formulazione proposta da Bazant [16]) mostra un tratto iniziale costante (in un grafico doppio logaritmico resistenza

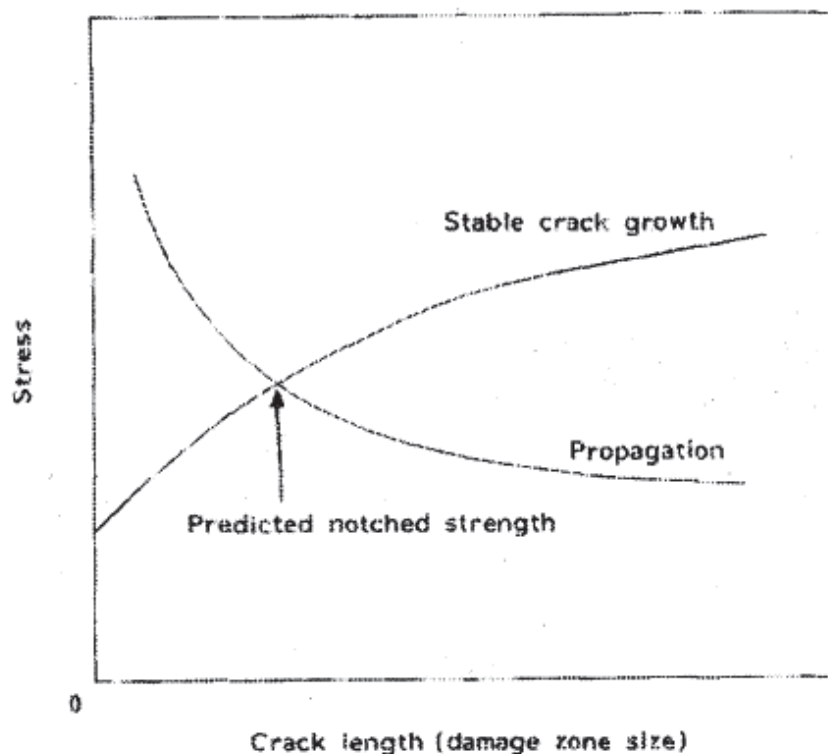


Figura 1.3: Diagramma schematico che mostra la tecnica di previsione della resistenza

nominale-dimensione caratteristica) e un tratto inclinato con pendenza pari a -0.5 . La misura dell'effetto scala sulla resistenza nominale può essere utilizzata per determinare alcune caratteristiche a frattura del composito (come la *fracture energy* e la lunghezza effettiva della zona del processo di frattura). Il metodo proposto in [15] è più semplice di altri perché per la sua applicazione è sufficiente misurare solo il carico di picco. Infine le formulazioni precedentemente ricavate in letteratura relative all'effetto scala, per materiali isotropi, possono essere generalizzate per materiali ortotropi se si sostituiscono le proprietà isotrope con quelle ortotrope del composito.

1.1.4 ALTRI STUDI

In [17], vengono studiati dei laminati compositi di Boro/alluminio con layup di $[\pm 45]$ e $[\pm 45/0_2]$ contenenti discontinuità come fori e fessure. Entrambi i layup hanno mostrato una diminuzione della tensione di rottura all'aumentare della dimensione della discontinuità

presente. Tuttavia le modalità di frattura nei due casi sono state diverse. Nel primo caso ($[\pm 45]$) la rottura è avvenuta principalmente per tensioni di taglio interlaminari, nel secondo caso, invece la rottura è stata di tipo catastrofico, il che suggerisce una somiglianza con ciò che avviene nei materiali metallici omogenei. Viene infatti proposta una correlazione che si ispira alla MFLE nei metalli

$$\sigma_f = H_c(2a_c)^{-m} \quad (1.9)$$

dove H_c è la tenacità del composito, $2a_c$ è la lunghezza della discontinuità e m è l'esponente relativo alla singolarità all'apice della cricca. Le prove sperimentali confermano poi che il parametro controllante è la lunghezza della discontinuità e non la forma, e che l'apice del foro o della fessura hanno l'effetto di una cricca nel procurare la rottura di schianto del componente.

Per quanto riguarda la resistenza di laminati compositi che presentano un'apertura ellittica, S. C. Tan in [18], basandosi sull'estensione del criterio *Point Stress* e *Average stress*, presenta un modello che esprime la dimensione della zona danneggiata in funzione della lunghezza di apertura e del *opening aspect ratio*. I dati sperimentali confermano la bontà del modello proposto.

1.1.5 MODELLI PROPOSTI SUL PPS

Il PPS è un polimero ampiamente utilizzato in applicazioni ingegneristiche, offrendo una buona stabilità dimensionale, resistenza chimica e alla temperatura. Il PPS può essere rinforzato con un'alta percentuale di riempitivi e rinforzi che lo rendono meno fragile. In letteratura si segnala il lavoro di Karger-Kocsis et al. che hanno studiato le relazioni tra la microstruttura e la tenacità a frattura di PPS rinforzato con fibre di vetro corte. Dallo studio emerge una forte influenza dalle condizioni di processo nella microstruttura. Zhang et al. invece hanno analizzato i meccanismi di danneggiamento del materiale. Ne è emerso che i principali meccanismi di dissipazione energetica sono la deformazione plastica della matrice, *debonding* e *pull out* delle fibre.

Nello studio pubblicato da Ricotta, Zappalorto e Sorgato [6] viene investigata la resistenza statica a trazione e compressione di provini lisci ed intagliati in PPS rinforzati con il 40% di fibre di vetro corte (GF-PPS SFRCs). In questo studio i provini sono stati ottenuti per fresatura di piastre realizzate per stampaggio ad iniezione. In questo modo l'orientazione delle fibre in corrispondenza dell'intaglio segue la direzione del flusso del materiale iniettato nella

piastra. L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello (come spiegato nell'introduzione) di confrontare i risultati sperimentali con quelli ottenuti da Ricotta et al. nel loro lavoro, sopra citato. La discussione dei risultati perciò verrà approfondita nel capitolo ?. Di seguito viene invece esposta la trattazione teorica riportata in [6].

Quando il raggio all'apice dell'intaglio è finito, il campo di tensione non mostra singolarità e solitamente la tensione massima locale viene correlata a quella nominale tramite il fattore di concentrazione delle tensioni K_t . Con riferimento al caso di cricche con raggio di raccordo, Irwin fornì una relazione fondamentale tra il fattore di intensificazione delle tensioni (modo I) e la tensione di picco:

$$K_{I\rho} = \sigma_{max} \sqrt{\pi\rho}/2 \quad (1.10)$$

in cui ρ tende a 0. Qualche anno dopo Glinka introdusse una formulazione che permise di rimuovere il limite su ρ . Successivamente Lazzarin e Filippi estesero il caso di Irwin-Glinka proponendo delle relazioni che legano il GSIF (Generalised Stress Intensity Factor) del caso di intagli a V raccordati al corrispondente caso di intagli acuti (in corpi isotropi sollecitati a modo I e modo II).

Zappalorto in [19] e [20] propone uno studio sul GSIF applicato al caso di lamine intagliate ortotrope sollecitate a modo I. Vengono proposte due espressioni analitiche per calcolare il GSIF nel caso di intagli raccordati nel caso di materiale ortotropo, basandosi sulla corrispondente soluzione analitica del campo di tensione in corrispondenza e in prossimità dell'apice intaglio. La prima permette di determinare il GSIF come funzione della tensione normale all'apice dell'intaglio, la seconda invece permette di determinare il GSIF come parametro del campo di tensione anziché del valore puntuale.

Considerando una lamina ortotropica con un intaglio a V rccordato, nelle ipotesi di tensione piana o deformazione piana, la tensione normale alla bisettrice dell'intaglio può essere approssimata dalla seguente espressione:

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{yy} = \frac{\sigma_{tip}}{\tilde{A}} \left\{ \left(\frac{x'}{r_0} + \beta_1^t \right)^{\lambda-1} + \chi \left(\frac{x'}{r_0} + \beta_2^t \right)^{\lambda-1} \right\} \quad (1.11)$$

dove:

$$r_0 = \frac{q-1}{q} \rho \quad (1.12)$$

$$q = \frac{2\pi - 2\alpha}{\pi} \quad (\text{I.13})$$

$$t = \frac{2 - \frac{\ln(-\chi)}{\ln(\beta_1\beta_2)}}{1 - \lambda} \quad (\text{I.14})$$

e ρ è il raggio dell'intaglio. Invece λ è l'autovalore lineare elastico che si determina risolvendo la seguente equazione:

$$\begin{aligned} & \cos(1 - \lambda)\theta_2(\gamma)\{\cos(1 - \lambda)\theta_1(\gamma)[m_{11}(\gamma)n_{21}(\gamma) - m_{21}(\gamma)n_{11}(\gamma)] - \\ & \quad - \sin(1 - \lambda)\theta_1(\gamma)[m_{21}(\gamma)n_{12}(\gamma) - m_{12}(\gamma)n_{21}(\gamma)]\} - \\ & - \sin(1 - \lambda)\theta_2(\gamma)\{\cos(1 - \lambda)\theta_1(\gamma)[m_{22}(\gamma)n_{11}(\gamma) - m_{11}(\gamma)n_{22}(\gamma)] - \\ & \quad - \sin(1 - \lambda)\theta_1(\gamma)[m_{12}(\gamma)n_{22}(\gamma) - m_{22}(\gamma)n_{12}(\gamma)]\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

con:

$$m_{j1} = \cos^2 \theta - (\beta_j \sin \theta)^2 \quad (\text{I.16})$$

$$m_{j2} = 2\beta_j \sin \theta \cos \theta \quad (\text{I.17})$$

$$n_{j1} = \frac{1}{2} \sin 2\theta(1 + \beta_j^2) \quad (\text{I.18})$$

$$n_{j2} = -\beta_j \cos 2\theta \quad (\text{I.19})$$

In aggiunta:

$$\chi = -\frac{\rho_1^{\lambda-1}(\gamma)[m_{11}(\gamma) \cos(1 - \lambda)\theta_1(\gamma) + m_{12}(\gamma) \sin(1 - \lambda)\theta_1(\gamma)]}{\rho_2^{\lambda-1}(\gamma)[m_{21}(\gamma) \cos(1 - \lambda)\theta_2(\gamma) + m_{22}(\gamma) \sin(1 - \lambda)\theta_2(\gamma)]} \quad (\text{I.20})$$

$$\tilde{A} = \beta_1^{t(\lambda-1)} + \chi\beta_2^{t(\lambda-1)} = \frac{\beta_2^{t(1-\lambda)} + \chi\beta_1^{t(1-\lambda)}}{\beta_1^{t(1-\lambda)}\beta_2^{t(1-\lambda)}} \quad (\text{I.21})$$

x' è la distanza dall'apice intaglio e, soddisfatta la condizione $(2T_{12} + T_{66})^2 \geq 4T_{11}T_{22}$,

$\mu_{2,4} = \pm i\beta_2$ e $\mu_{1,3} = \pm i\beta_1$ sono le radici coniugate della seguente equazione:

$$T_{11}\mu^4 + (2T_{12} + T_{66})\mu^2 + T_{22} = 0 \quad (1.22)$$

dove:

$$\beta_{1,2} = \sqrt{\frac{2T_{12} + T_{66} \pm \sqrt{(2T_{12} + T_{66})^2 - 4T_{11}T_{22}}}{2T_{11}}} \quad (1.23)$$

Nelle eq. 1.22 e 1.23, T_{ij} uguaglia i termini della matrice di cedevolezza, S_{ij} , nelle ipotesi di tensione piana. In tal caso, si ottiene:

$$\begin{aligned} T_{11} = S_{11} &= \frac{1}{E_x} & T_{22} = S_{22} &= \frac{1}{E_y} \\ T_{12} = S_{12} &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & T_{66} = S_{66} &= \frac{1}{G_{xy}} \end{aligned} \quad (1.24)$$

dove, considerando il sistema di coordinate di figura 1.4, E_x e E_y sono i moduli elastici lungo le direzioni x ed y rispettivamente, G_{xy} è il modulo elastico tangenziale e ν_{xy} è il modulo di Poisson. In accordo, nelle ipotesi di tensione piana, l'equazione 1.23 può essere riscritta come:

$$\beta_{1,2} = \sqrt{-\nu_{xy} + \frac{E_x}{2G_{xy}} \pm \sqrt{\left(-\nu_{xy} + \frac{E_x}{2G_{xy}}\right)^2 - \left(\frac{E_x}{E_y}\right)}} \quad (1.25)$$

Nel caso di deformazione piana invece, T_{ij} uguaglia B_{ij} , e abbiamo:

$$\begin{aligned} T_{11} = B_{11} &= \frac{S_{11}S_{33} - S_{13}^2}{S_{33}} & T_{12} = B_{12} &= \frac{S_{12}S_{33} - S_{13}S_{23}}{S_{33}} \\ T_{22} = B_{22} &= -\frac{S_{22}S_{33} - S_{13}^2}{S_{33}} & T_{66} = B_{66} &= S_{66} \end{aligned} \quad (1.26)$$

dove $S_{33} = \frac{1}{E_z}$

A questo punto è possibile ricavare il GSIF nel caso di intagli raccordati in materiale ortotropo. Sufficientemente distante dall'apice intaglio, l'equazione 1.11 può essere semplificata:

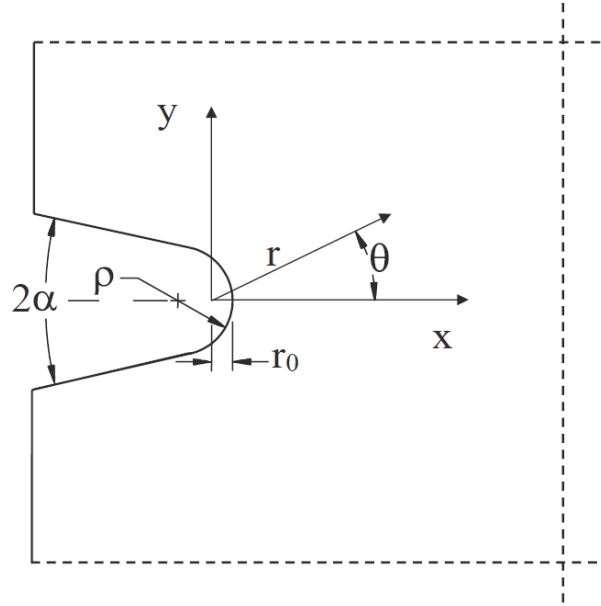


Figura 1.4: Geometria di un intaglio a V raccordato con relativo sistema di riferimento

$$\sigma_{yy} \approx \sigma_{tip} \frac{(\beta_1 \beta_2)^{t(1-\lambda)} (1 + \chi)}{\beta_2^{t(1-\lambda)} + \chi \beta_1^{t(1-\lambda)}} \left(\frac{r_0}{x'} \right)^{(1-\lambda)} \quad (1.27)$$

e il campo di tensione dell'intaglio raccordato è approssimabile a quello del corrispondente intaglio a V raccordato. In questo modo l'equazione 1.27 può essere riscritta come:

$$\sigma_{yy} \approx \frac{K_{1\rho}}{\sqrt{2\pi x'}} \quad (1.28)$$

dove $K_{1\rho}$ è il GSIF dell'intaglio a V raccordato. Uguagliando l'equazione 1.27 con la 1.28 si ottiene:

$$K_{1\rho} = \sqrt{2\pi} \sigma_{tip} \frac{(\beta_1 \beta_2)^{t(1-\lambda)} (1 + \chi)}{\beta_2^{t(1-\lambda)} + \chi \beta_1^{t(1-\lambda)}} r_0^{1-\lambda} = M \sigma_{tip} r_0^{1-\lambda} \quad (1.29)$$

dove:

$$M = \sqrt{2\pi} \frac{(\beta_1 \beta_2)^{t(1+\lambda)} (1 + \chi)}{\beta_2^{t(1-\lambda)} + \chi \beta_1^{t(1-\lambda)}} \quad (1.30)$$

L'equazione 1.29 definisce il GSIF di un intaglio a V (ortotropo) come funzione della tensione di picco. Si può tuttavia ricavare una definizione più generale che è valida anche ad una certa distanza dall'apice intaglio (lungo la bisettrice dello stesso).

Sostituendo l'Eq. 1.11 nella 1.29 si ottiene:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_{1\rho}}{\sqrt{2\pi}(1+\chi)} r_1^{\lambda-1} \left\{ 1 + \chi \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{1-\lambda} \right\} \quad (1.31)$$

dove $r_1 = x' + r_0\beta_1^t$ e $r_2 = x' + r_0\beta_2^t$. In accordo con l'Eq.1.31, il GSIF definito lungo la bisettrice dell'intaglio valido anche ad una certa distanza dall'apice risulta:

$$K_{1\rho} = \sqrt{2\pi}\sigma_{\theta\theta|_{\theta=0}} r_1^{1-\lambda} \frac{1+\chi}{1+\chi \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{1-\lambda}} \quad (1.32)$$

dove il termine $\frac{1+\chi}{1+\chi \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{1-\lambda}}$ è stato aggiunto per tenere conto della redistribuzione delle tensioni dovuta alla presenza di un valore finito del raggio dell'intaglio. Quando il raggio è pari a zero, $r_0 = 0$, $r_1 = r_2 = x'$ e l'equazione 1.32 diventa:

$$K_{1\rho} = \lim_{x' \rightarrow 0} \sqrt{2\pi}\sigma_{\theta\theta|_{\theta=0}} (x')^{1-\lambda} \quad (1.33)$$

In accordo con la definizione del GSIF nel caso di intagli a V acuti.

Zappalorto, sempre in [19], ha analizzato l'effetto combinato delle proprietà elastiche del materiale e del raggio dell'intaglio, concludendo che:

- Per angoli di apertura piccoli ($2\alpha < 90$) $K_{1\rho}$ cresce monotonamente aumentando sia il raggio dell'intaglio sia Ψ . Ψ dipende dalle proprietà elastiche del materiale ed è definito come:

$$\Psi = \left(\frac{\beta_1\beta_2}{\beta_2 + \beta_1} \right)^2 \quad (1.34)$$

Diversamente, per angoli di apertura ampi, $K_{1\rho}$ aumenta leggermente con ρ , mentre l'andamento di Ψ non è monotono; aumenta inizialmente, fino ad un massimo, per poi decrescere.

- nel caso di intagli con raggio "piccolo" l'effetto delle proprietà elastiche del materiale nel GSIF è meno consistente rispetto al caso di raggi di intaglio ampi.
- più piccolo è Ψ , più debole è l'effetto del raggio di intaglio nel GSIF.

1.1.6 CRITERIO DI RESISTENZA BASATO SUL FATTORE DI INTENSIFICAZIONE DELLE TENSIONI GENERALIZZATO

In letteratura il GSIF è stato utilizzato ampiamente da diversi autori per riassumere e prevedere il comportamento statico di componenti criccati realizzati in materiali fragili e isotropi. Per citarne uno, Gomez et al. derivano un'unica curva per valutare il carico di rottura di componenti con intaglio profondo e raccordato basandosi sul GSIF in combinazione con il *cohesive zone model*, dimostrando una buona affidabilità del modello teorico con i dati sperimentali (su materiali ceramici e polimerici fragili) che possono essere riassunti in una singola banda di dispersione (valore medio $\pm 20\%$, vedi figura 1.5).

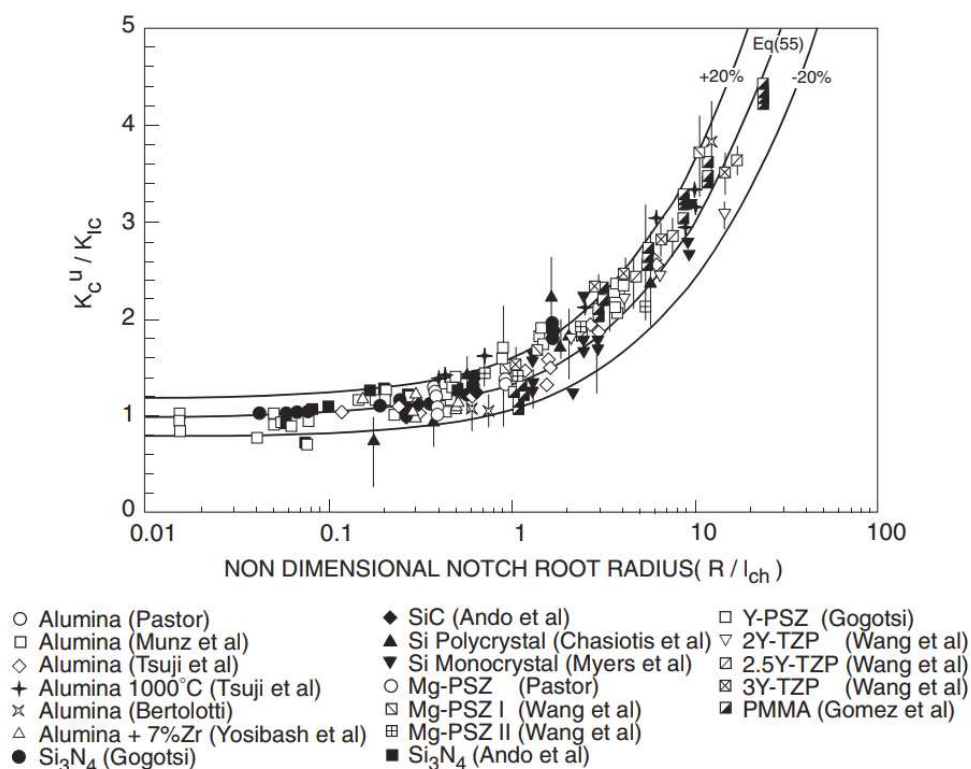


Figura 1.5: Dati sperimentali su ceramici e polimeri riassunti in termini di GSIF adimensionale

Zappalorto propone un approccio simile anche per i materiali ortotropi basandosi su queste 3 idee universalmente accettate:

- in un materiale fragile con un intaglio a V acuto soggetto a modo I statico, la rottura avviene quando il fattore di concentrazione delle tensioni raggiunge un valore critico, K_{Ic}

- in un componente caratterizzato da un intaglio con un raggio di raccordo sufficientemente grande, la rottura avviene quando la tensione massima all'apice raggiunge la tensione di rottura del materiale, σ_0 .
- si può proporre un criterio generalizzato che riesce a spiegare la transizione tra le due condizioni citate nei punti precedenti.

Consideriamo ora un intaglio con un raggio sufficientemente grande tale da avere piena sensibilità all'intaglio, in questo modo la rottura avviene quando $\sigma_{tip} = \sigma_0$. la tenacità a frattura apparente può essere dedotta dall' eq.1.35 sostituendo la condizione $\sigma_{tip} = \sigma_0$ nell'equazione 1.35

$$K_{I\rho c} = M\sigma_0 r_0^{1-\lambda} \quad (1.35)$$

Riducendo progressivamente il raggio all'apice (assumendo ancora una piena sensibilità all'intaglio) la tenacità apparente si riduce anch'essa fino a zero (condizione che si ottiene per un raggio dell'intaglio pari a zero). Questa conclusione è chiaramente sbagliata perché per intagli acuti la tenacità a frattura deve sempre tendere al corrispondente valore di K_{Ic} . Ciò significa che esiste un bene definito raggio che definisce la transizione tra le due condizioni di rottura (quella controllata dalla tensione di picco e quella controllata dal $K_{I\rho c} = K_{Ic}$). Tale raggio si ottiene eguagliando l'eq.1.35 con la condizione limite inferiore $K_{I\rho c} = K_{Ic}$:

$$r_{0N} = \left(\frac{K_{Ic}}{M\sigma_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \quad (1.36)$$

Riassumendo:

- quando $r_0 \geq r_{0N}$, siamo in condizioni di piena sensibilità all'intaglio e la rottura avviene quando la tensione massima all'apice dell'intaglio raggiunge il valore della resistenza del materiale σ_0 . La tenacità apparente associata è data dall'eq. (1.35). In aggiunta, dividendo (1.35) per K_{Ic} si ottiene la tenacità apparente normalizzata:

$$\frac{K_{I\rho c}}{K_{Ic}} = \left(\frac{r_0}{r_{0N}} \right)^{1-\lambda} \quad (1.37)$$

- quando $r_0 < r_{0N}$, l'intaglio raccordato si comporta come uno acuto e la tenacità apparente eguaglia K_{Ic} ,

- la transizione tra le due condizioni sopra citate si può ottenere usando la *Asymptotic Matching Technique* (figura 1.6):

$$\frac{K_{I\rho c}}{K_{Ic}} = \left\{ 1 + \left(\frac{r_0}{r_{0N}} \right)^{m(1-\lambda)} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (1.38)$$

dove volri di m compresi tra 1.25 e 3 approssimano bene i risultati sperimentali

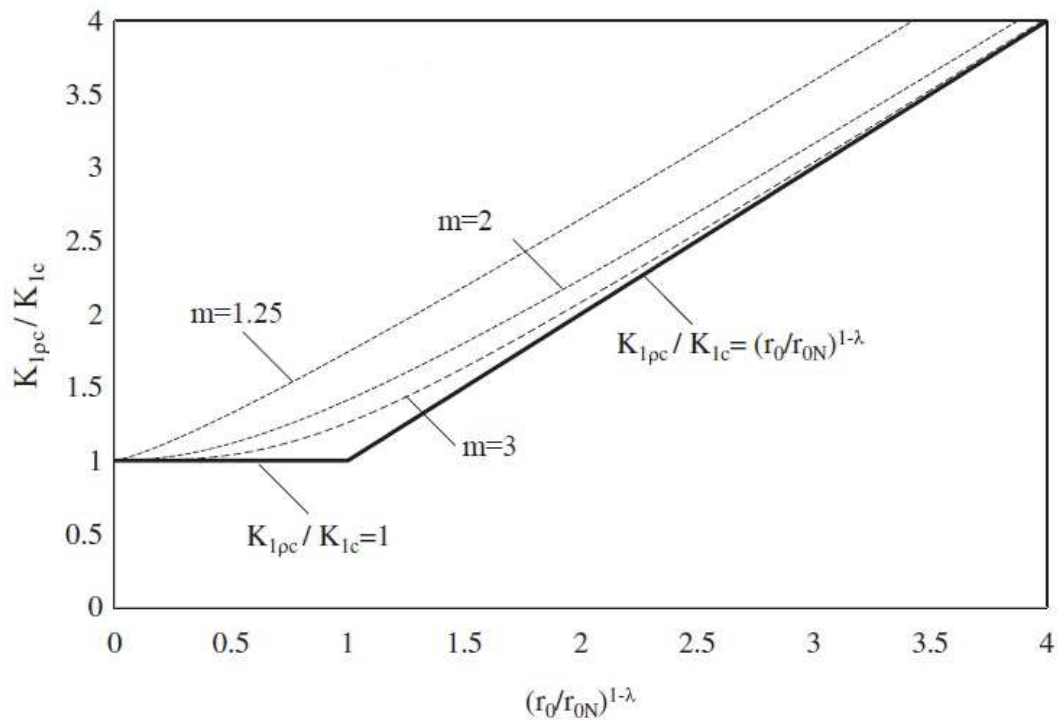


Figura 1.6: Grafico schematico della tenacità a frattura apparente e dell'effetto del parametro m nell'eq. (1.38)

1.2 FATICA

Ipotizzando che venga applicato un range di carico sufficientemente elevato affinché la cricca si possa propagare possiamo osservare che ΔK_I aumenti nel tempo nonostante il range di carico si mantenga costante. Tale incremento dipende dal fatto che le cricche si propagano ad ogni ciclo e per come è stato approssimato ΔK_I notiamo che questo è dovuto sia dalla lunghezza istantanea a che dal fattore di forma α della cricca che tiene conto della forma del componente. Questo parametro viene di consueto approssimato impiegando delle funzioni specifiche che, nel caso della piastra finita presa come esempio, dipendono dal rapporto tra la lunghezza della cricca istantanea e la larghezza della piastra. Al fine di far propagare la cricca è opportuno che il componente sia sottoposto a sollecitazione in modo che il valore di ΔK_I sia maggiore del valore di soglia ΔK_{th} ; questo valore, una volta fissato il rapporto ciclo $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ è una caratteristica del materiale. Da questo parametro è possibile ottenere il range di sollecitazione di soglia, prendendo in considerazione una piastra infinita con cricca centrale, come segue:

$$\Delta\sigma_{g,th} = \frac{\Delta K_{th}}{\sqrt{\pi a}} \quad (1.39)$$

Per mezzo di questa espressione è possibile analizzare il comportamento del componente al variare della lunghezza della cricca iniziale a . Tuttavia, questa espressione ha un limite, infatti per cricche con lunghezza tendente allo 0 si riscontra che il valore di sollecitazione di soglia $\Delta\sigma_{g,th}$ tenderebbe all'infinito, condizione ovviamente non realizzabile. Per poter disporre di una situazione realistica bisogna considerare il limite a fatica del materiale senza difetti:

$$\Delta\sigma_0 = 2 \cdot \sigma_{a,\infty} \quad (1.40)$$

Per mettere in rapporto il comportamento del materiale esente da difetti e del materiale criccato, si fa riferimento ad una lunghezza di cricca caratteristica a_0 , che diventa anche questa una caratteristica del materiale una volta definito R , e che fu definita da El-Haddad [21] come segue:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_0} \right)^2 \quad (1.41)$$

L'adozione di tale parametro ci consente di dividere il campo di validità della MFLE dal campo di validità della meccanica della frattura. Quanto descritto può essere riassunto attraverso il diagramma di Kitagawa-Takahashi visibile in figura 1.7. L'espressione che ci permette di porre in relazione i due campi fu sempre ricavata da El Haddad-Smith-Topper [21] e presenta con la seguente equazione:

$$\Delta K_{th} = \Delta\sigma_{g,th} \sqrt{\pi(a + a_0)} \quad (1.42)$$

dove:

- a individua la lunghezza effettiva della cricca
- a_0 individua la lunghezza di cricca caratteristica, propria del materiale.

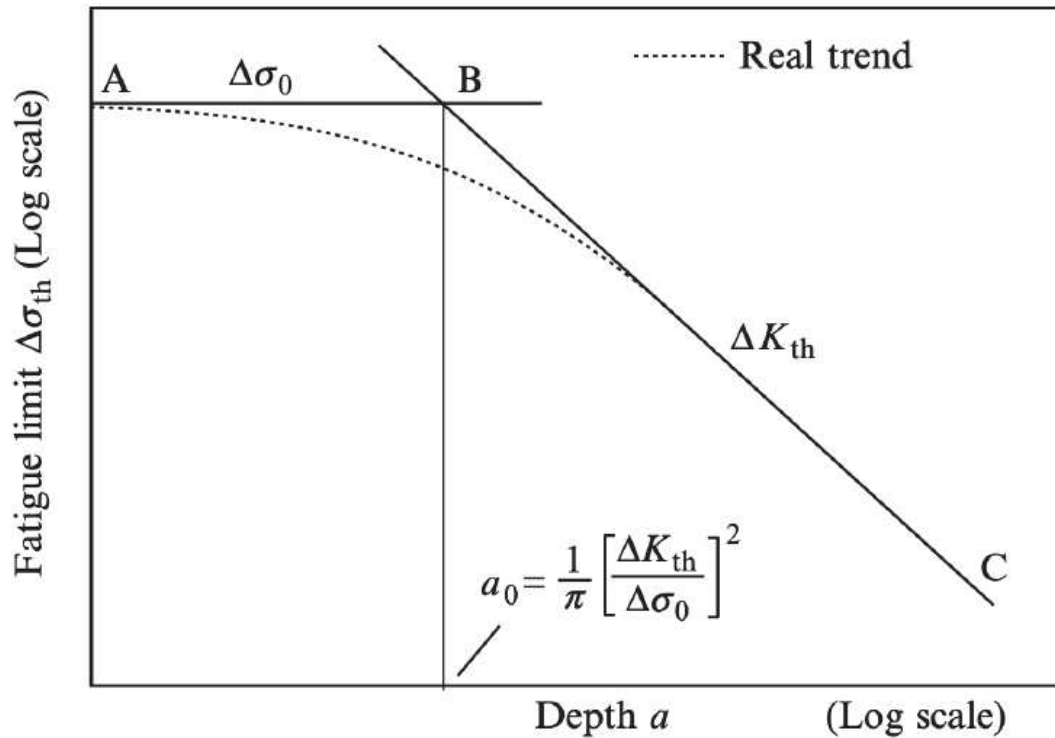


Figura 1.7: Diagramma Kitagawa-Takahashi [1]

1.2.1 LA CURVA ATZORI-LAZZARIN-MENEGHETTI

Il diagramma presente in figura 1.6 può essere arricchito con l'inserimento al suo interno anche degli intagli che presentano un raggio di raccordo. In generale un intaglio che è dotato di raccordo mostra una resistenza a fatica maggiore rispetto a quella di un V-notch. Nel caso poi che l'intaglio abbia un raggio sufficientemente ampio per garantire la piena sensibilità all'intaglio allora il limite a fatica può essere stimato basandosi su quanto stabilito dalla meccanica classica:

$$\Delta\sigma_{g,th} = \frac{\Delta\sigma_0}{K_{tg}} \quad (1.43)$$

Questa equazione può essere inclusa tenendo presente però che la sua validità si manifesta esclusivamente quando produce un valore del limite a fatica maggiore rispetto a quello di un intaglio acuto avente la medesima profondità. Estendendo l'uso del diagramma di Kitagawa in modo generalizzato ci consente di avere un supporto che permette di sintetizzare tutta la

progettazione meccanica in presenza di intagli in un unico diagramma universale che prende il nome di diagramma Atzori-Lazzarin-Meneghetti [1]

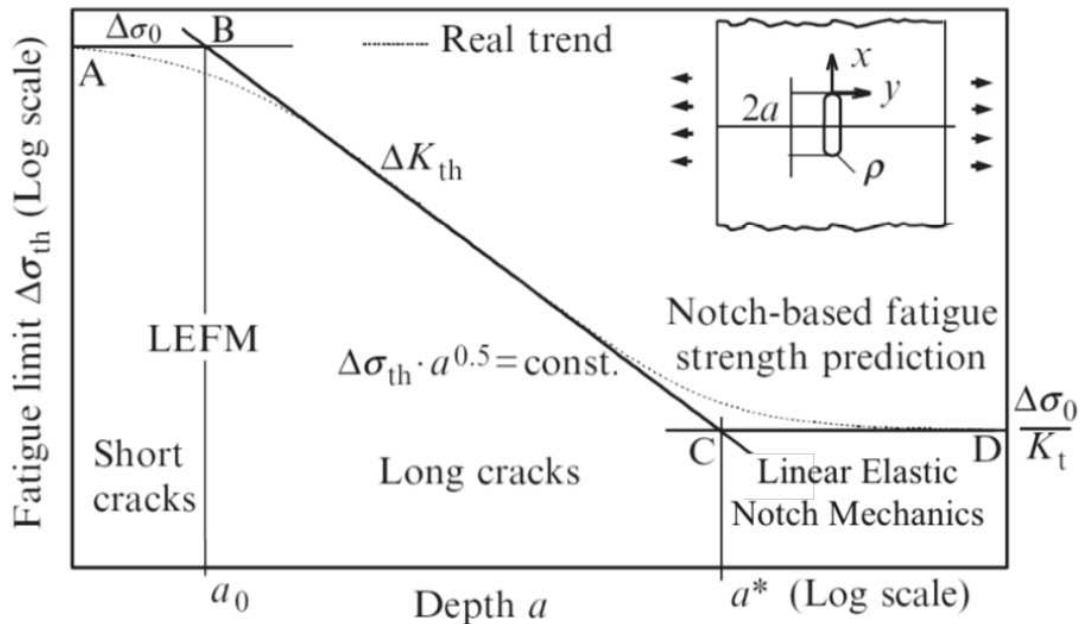


Figura 1.8: Diagramma Atzori-Lazzarin-Meneghetti [1]

Nel diagramma sono individuabili tre zone distinte, definite dai due parametri caratteristici a_0 e a^* . Andando nello specifico questo diagramma è stato ricavato andando a sollecitare al limite a fatica delle piastre "infinite" che presentavano una cricca come un intaglio. Le dimensioni dell'intaglio sono state variate mantenendo il rapporto $a/\rho = \text{cost}$ affinché nella zona della meccanica classica il valore di K_{tg} fosse mantenuto costante. Per fare in modo che questo diagramma diventi universale a tutti gli intagli è sufficiente includere nella formula di ΔK_{th} il fattore di forma α :

$$\Delta K_{th} = \Delta\sigma_{g,th} \sqrt{\pi\alpha^2(a + a_0)} \quad (1.44)$$

In questo modo è possibile individuare una lunghezza equivalente al caso della piastra infinita pari a $\alpha^2(a + a_0)$ che ci consente di stimare il limite a fatica di un qualsiasi componente intagliato semplicemente individuando la zona in cui si posiziona all'interno del diagramma. Per effetto di questi sperimentali possiamo affermare che:

- l'effetto dello stato tensionale locale in relazione ai piani di minima resistenza cristal-

lina legati all'orientamento dei grani , può creare delle microcricche nel materiale sottoposto a carichi di fatica;

- l'accrescimento di tali microcricche si ferma, una volta che è stata raggiunta la dimensione massima, a condizione che la sollecitazione che determina l'accrescimento sia inferiore al limite di fatica del materiale base, mentre continua a crescere (assumendo le caratteristiche di propagazione macroscopica) se la sollecitazione è superiore a tale limite di fatica;
- la lunghezza di tali microcricche è vincolata alle dimensioni del grano cristallino;
- la dimensione caratteristica a_0 è messa in relazione con le dimensioni del grano cristallino;
- la dimensione caratteristica a_0 si può considerare come la dimensione di una cricca passante equivalente avente lunghezza statisticamente in relazione con la lunghezza delle cricche che si formano a livello microscopico, considerando la dimensione e l'orientamento dei grani cristallini;
- l'ampiezza della dimensione caratteristica a_0 dipende solo dal materiale e non dalla forma geometrica del componente considerato.

Pertanto si può affermare che il limite di fatica è sempre e solo una caratteristica del materiale e gli elementi geometrici vanno solo ad alterare la situazione modificando la relazione tra i carichi esterni applicati e lo stato di tensione locale a cui il materiale è sottoposto.

1.2.2 ESTENSIONI MFLE AGLI INTAGLI A V A SPIGOLO VIVO

Considerando il caso degli intagli a V a spigolo vivo, è possibile anche per questi definire i modi piani di sollecitazione I e II analoghi ai modi di sollecitazione individuati per la cricca in figura 1.3. Prendendo in considerazione la Fatica, anche gli intagli con raggio di raccordo non nullo ma con dimensioni ridotte mostrano lo stesso modo di agire degli intagli a spigolo vivo come fu evidenziato da Miller. Questo comportamento è vero solo se il raggio di raccordo all'apice dell'intaglio è :

$$\rho \leq 4 \cdot a_0 \quad (1.45)$$

Pertanto è possibile prendere in considerazione come intagli a spigolo vivo tutti quegli intagli aventi un raggio di raccordo $0 \leq \rho \leq 4 \cdot a_0$, che assumono il nome di intagli acuti. Come conseguenza di queste osservazioni è possibile estendere la MFLE a componenti che presentano un V-notch andando a sostituire il SIF con il Notch Stress Intensity Factor, NSIF, definito come segue

$$K_I^V = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{\theta\theta}(r, 0) \cdot r^{1-\lambda_1}) \quad (1.46)$$

Dove $\sigma_{\theta\theta}$ è la componente di tensione riferita alla apertura valutata lungo la bisettrice dell'intaglio, si veda figura 1.8, e λ_1 è l'esponente per definire il grado di singolarità delle tensioni che fu individuato da Williams [22]. Anche in questo caso k_I^V esiste ed assume un valore finito e come per il SIF è possibile avvalersi delle approssimazioni per calcolarlo. Si può esprimere l'NSIF come segue:

$$K_I^V = \alpha_\gamma \sqrt{\pi} a^\gamma \sigma_g = \sqrt{\pi} (\alpha_\gamma^{1/\gamma} a)^\gamma \sigma_g \quad (1.47)$$

$$\gamma = 1 - \lambda_1 \quad (1.48)$$

dove:

- $\gamma = 1 - \lambda_1$ è il grado di singolarità del campo tensionale;
- α_γ è un coefficiente adimensionale che deriva dalla geometria del componente, da come avviene la sollecitazione e dall'angolo di apertura dell'intaglio.

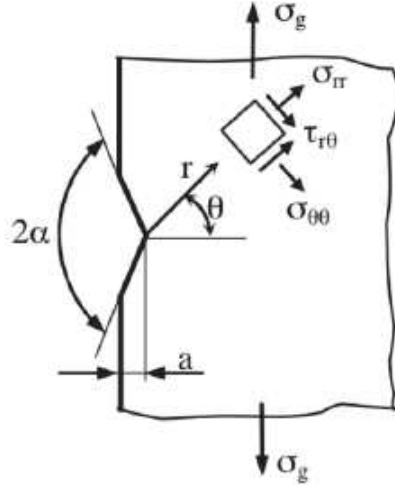


Figura 1.9: Sistema di riferimento in coordinate cilindriche per un V-notch [2]

Nell'equazione 1.47 l'entità racchiusa tra parentesi tonde può intendersi come la profondità dell'intaglio effettiva, a_{eff} . Quando si applica l'equazione 1.47 alla condizione si ottiene che:

$$\Delta\sigma_{g.th} = \frac{\Delta K_{I,th}^V}{\sqrt{\pi}(a_{eff})^\gamma} \quad (1.49)$$

Al fine di poter incorporare all'interno di un'unica equazione anche intagli a V "piccoli" e "profondi", si può proporre di rendere generale da un punto di vista ingegneristico l'equazione 1.49 estendendo la formulazione proposta da El-Haddad-Smith-Topper ??

$$\Delta\sigma_{g.th} = \frac{\Delta K_{I,th}^V}{\sqrt{\pi}(a_{eff} + a_0^V)^\gamma} \quad (1.50)$$

Dove a_0^V può essere inteso come una naturale ampliamento dalla caratteristica del materiale a_0 individuato dall'equazione

$$a_0^V = \left(\frac{\Delta K_{I,th}^V}{\sqrt{\pi}\Delta\sigma_0} \right)^{1/\gamma} \quad (1.51)$$

Sviluppando in un diagramma l'equazione 1.50 per differenti angoli di apertura si ottiene il diagramma di Kitagawa generalizzato per i V-notch come si può osservare in figura 1.9

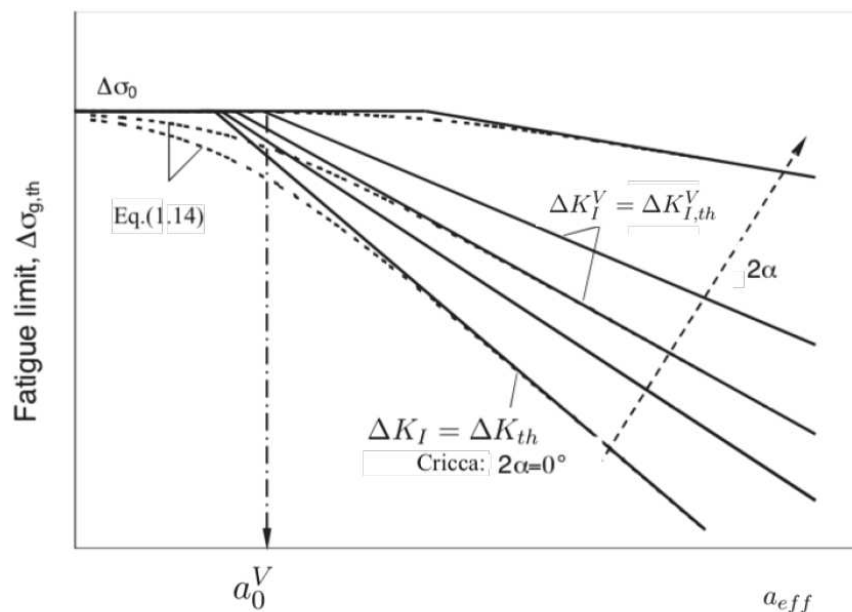


Figura 1.10: Diagramma di Kitagawa generalizzato [2]

1.2.3 CRITERIO BASATO SULLA DENSITÀ DI ENERGIA DI DEFORMAZIONE

Fu Neuber [23] che molti anni fa introdusse il concetto di volume strutturale. Tale concetto definisce che non è la massima tensione teorica dell'intaglio a causare il cedimento statico o per fatica, ma la media tra le tensioni all'interno di un volume di controllo, chiamato anche volume strutturale, che come per a_0 e per K_{IC} è una caratteristica intrinseca del materiale. Basandosi su questa tesi è stato formulato il criterio che si basa sulla densità di energia di deformazione, SED, proposto da Lazzarin e Zombardi [24]. La densità di energia di deformazione era stata già utilizzata in passato per elaborare criteri di resistenza riferite ai materiali duttili e fragili. L'utilizzo dell'approccio SED ci consente di stimare la resistenza statica e a fatica sia dei componenti lisci che intagliati. Con questo criterio è possibile quindi considerare come parametro critico per la resistenza strutturale del materiale la densità d'energia lineare elastica media all'interno del volume strutturale di forma circolare, avente raggio R_C , considerato una proprietà del materiale. La densità di energia di deformazione per un materiale lineare elastico vale:

$$W = \sum \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \quad (1.52)$$

che elaborata secondo il sistema di riferimento polare di figura 1.8 diventa:

$$W = \frac{1}{2} \sigma_{rr} \epsilon_{rr} + \frac{1}{2} \sigma_{\theta\theta} \epsilon_{\theta\theta} + \frac{1}{2} \sigma_{zz} \epsilon_{zz} + \frac{1}{2} \frac{\tau_{r\theta}^2}{G} \quad (1.53)$$

Pertanto la tensione mediata all'interno del volume strutturale risulterà essere:

$$W = \frac{1}{V_C} \int_{V_C} W dV = \frac{e_1}{E} \left(\frac{K_1}{R_C^{(1-\lambda_1)}} \right)^2 + \frac{e_2}{E} \left(\frac{K_2}{R_C^{(1-\lambda_2)}} \right)^2 \quad (1.54)$$

dove:

- $k_1; k_2$ sono gli NSIF;
- $e_1; e_2$ sono coefficienti tabulati in relazione all'angolo di apertura dell'intaglio 2α ;
- $\lambda_1; \lambda_2$ sono i coefficienti di Williams;
- E il modulo elastico del materiale.

Un aiuto su come elaborare le dimensioni del volume di controllo in funzione dell'angolo di apertura dell'intaglio è spiegato in [3]:

$$r_0 = \rho \frac{\pi - 2\alpha}{2\pi - 2\alpha} \quad (1.55)$$

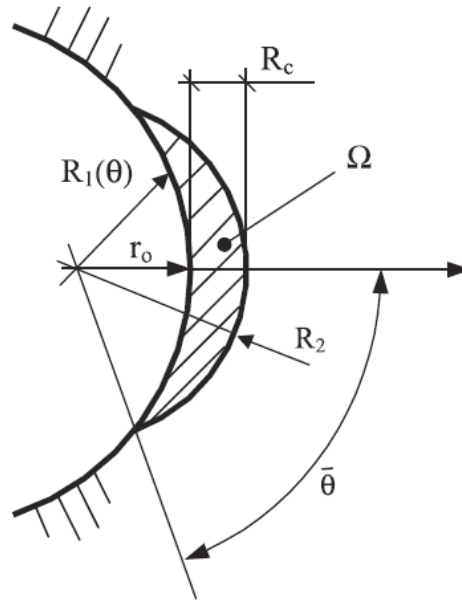


Figura 1.11: Volume strutturale per V-notch raccordato [3]

L'applicazione del criterio SED presenta diversi vantaggi. Contrariamente alla diretta valutazione degli NSIF, che richiede simulazioni FEM caratterizzate da mesh decisamente fitte in prossimità dell'intaglio, il SED mediato all'interno del volume di controllo può essere ottenuto per mezzo di mesh grossolane. Come dimostrato in [3], appare che il SED mediato sia pressoché insensibile alla mesh, quindi richiede pochi elementi all'interno del volume di controllo per individuare la densità di energia di deformazione mediata in quanto questa viene derivata in modo diretto dagli spostamenti nodali del modello. Il SED, come ulteriore vantaggio, consente di tenere conto dei diversi modi di sollecitazione, dell'effetto scala e nel caso della fatica anche del rapporto ciclo.

1.2.4 ESEMPI DI APPLICAZIONE DEL SED

Sonsino e Moosbrugger [25] utilizzano provini rettangolari di *PA66 - GF35* aventi orientazione $\theta = 0$. I provini erano lunghi 250mm , larghi 40mm e spessi 3mm . Durante il processo di stampaggio sui provini è stato realizzato un intaglio centrale di varie dimensioni per ottenere la caratterizzazione del comportamento del materiale al variare della severità

dell'intaglio. Per analizzare il comportamento del materiale soggetto ad un intaglio di media severità è stato ricavato al centro del provino un foro avente un diametro di 10mm a cui corrisponde un $k_t = 2.5$. Per analizzare il comportamento del materiale soggetto ad intagli severi sono stati ricavati intagli centrali simili a cricche, *slit notch*, aventi tutti larghezza 10mm e altezza 1mm ma con differenti raggi di raccordo, pari a 0.2 , 0.5 e 1mm a cui corrispondono rispettivamente dei K_t pari a 9.8 , 6.5 e 4.7 . Sono stati condotti test a fatica assiale in controllo di forza imponendo un rapporto ciclo $R = -1$ ed utilizzando una frequenza di carico $f = 0.5 \div 20\text{Hz}$. È stato possibile osservare un calo della resistenza a fatica all'aumentare della severità dell'intaglio, come si vede in figura 1.12

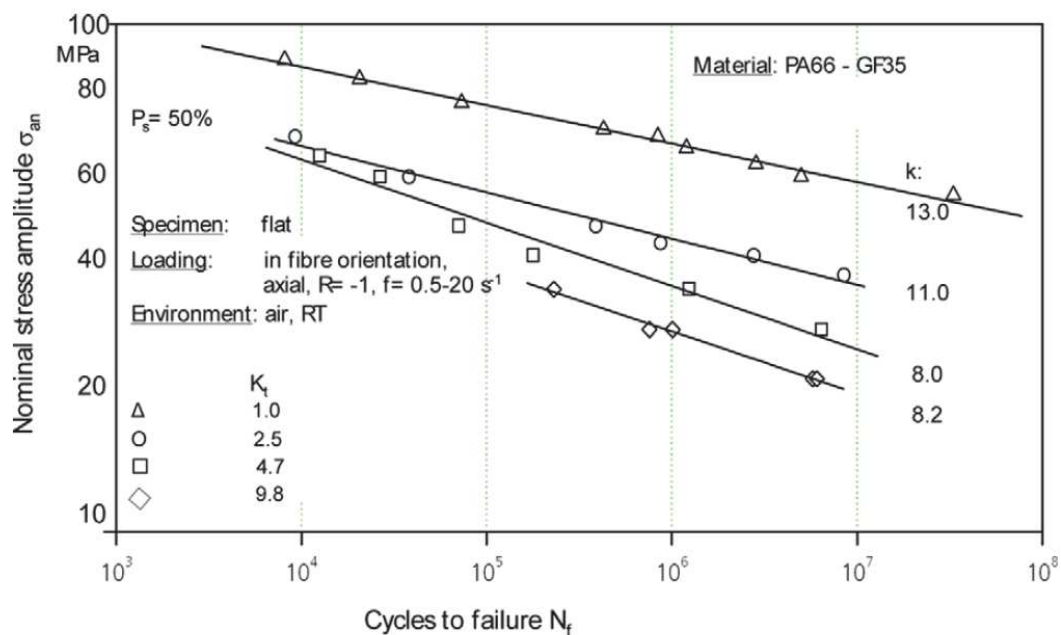


Figura 1.12: Effetto della concentrazione delle tensioni sulla resistenza a fatica per $R = -1$

De Monte, Quaresimin e Lazzarin [4] hanno utilizzato i dati delle prove a fatica di Sonsino e Moosbrugger [25] per andare ad estendere la formulazione del criterio SED agli SFR-PCs proposto inizialmente per materiali isotropi. È stato osservato che per i materiali ortotropi R_C non dipende esclusivamente dalla resistenza a fatica del materiale e dal valore di soglia δK_{th} ma anche dalla configurazione di carico rispetto all'orientazione delle fibre. L'applicazione del criterio energetico proposto richiede esclusivamente di tarare due curve a fatica e può essere successivamente utilizzato per ogni altro raggio di raccordo all'apice dell'intaglio. È necessario conoscere la curva a fatica di un provino liscio per poter deter-

minare il range critico di $SED\delta W_C$ e le curve a fatica di provini con intagli severi o criccati per poter dedurre R_C . Nel caso dei provini PA66 – GF35 aventi orientazione $\theta = 0$ è stato possibile determinare $\delta W_C = 0.3MJ/m^3$ e $R_C = 3mm$, figura 1.13

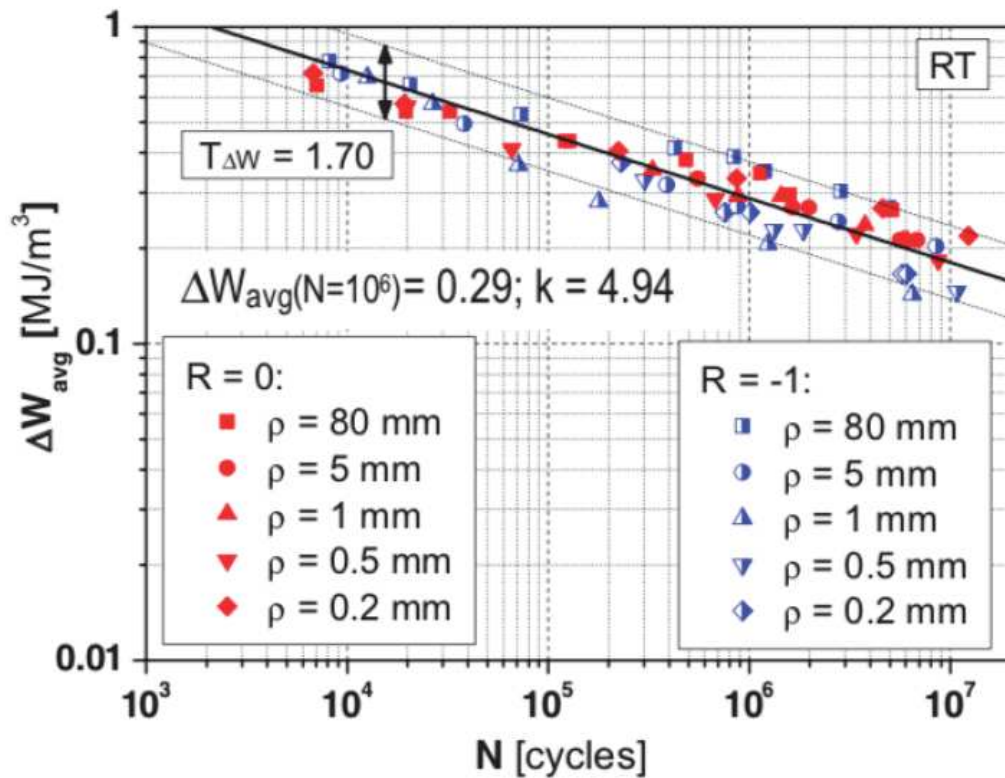


Figura 1.13: Dati sperimentali riordinati in termini di SED mediato all'interno del volume di controllo [4]

1.2.5 ALTRI STUDI

Gli autori W. Lang et al. [26] vanno ad esaminare i meccanismi di propagazione della cricca a fatica nei materiali a matrice polimerica rinforzati con fibre corte di vetro. Si nota in particolar modo che: la superficie di frattura che si osserva nel caso di propagazione stabile della cricca è diversa per molti aspetti da quella che si riscontra nel caso di propagazione instabile, nel primo caso si osserva un numero più alto di fratture singole e multiple della fibra. Tra i due casi ci sono poi delle differenze all'interfaccia nel caso di buona adesione fibra-matrice.

Nel caso di buona adesione all'interfaccia, l'avanzamento della cricca lungo le fibre (nel caso di propagazione stabile della frattura) avviene dalla formazione e coalescenza di *microvoids* e microcricche direttamente all'interfaccia a causa del *adverse effect* del carico di fatica

nella resistenza del legame interfacciale. Al contrario, nella regione della rottura di schianto, le fibre sono ricoperte di un sottile strato di matrice, il che indica che la rottura è avvenuta nella parte adiacente della matrice. Nel caso di scarsa adesione matrice-fibra la cricca avanza direttamente all'interfaccia. Infine non sono state trovate delle caratteristiche fotografiche che permettano di identificare una correlazione affidabile tra i dettagli della superficie di frattura e le condizioni prevalenti di carico o di velocità di avanzamento della cricca. In figura 1.14 vengono riassunti gli eventi che procedono lungo il corso della propagazione stabile della cricca. La rottura per taglio o tensione normale associata all'avanzamento della cricca attraverso la matrice polimerica o lungo l'interfaccia, si suppone che avvenga in maniera predominante nella prima parte della vita a fatica.

Gli autori M. G. Wygoski [27] studiano la velocità di propagazione della cricca in campioni di nylon rinforzato. Quello che si evince dallo studio è che la cinetica della cricca è indipendente dalla frequenza di carico, a differenza dello stesso materiale non caricato. La presenza di fibre invece, influenza fortemente la velocità di propagazione della cricca. Viene mostrato poi come il problema dell'anisotropia può essere gestito, esprimendo la velocità di propagazione in funzione del SERR (Strain Energy Release Rate) anziché in funzione del K (come viene fatto usualmente). In questo modo i risultati relativi a provini che hanno un'orientazione delle fibre parallela alla direzione di carico contro un'orientazione perpendicolare delle fibre, possono essere condensati in un'unica curva, come mostrato in figura 1.15.

Gli autori J.F. Mandell et al. [28] hanno studiato il comportamento di polimeri termoplastici rinforzati con fibre corte di vetro o grafite. Viene proposto un modello (*fiber avoidance mode*) in cui la propagazione della cricca avviene secondo un pattern a zigzag che passa nelle vicinanze della maggior parte delle fibre, evitandole. La cricca macroscopica sembra propagarsi dalla coalescenza di cricche, crazes e zone di snervamento (figura 1.16). Questo processo si verifica in una zona di dimensioni fissate dalla microstruttura del materiale e in particolare dalla lunghezza di piccole regioni di agglomerati di fibre. Basandosi su queste considerazioni, la tenacità a frattura del materiale può essere derivata da σ_{UTS} . La propagazione della cricca a fatica segue una legge di potenza con esponente che va da 7 ad 8, che è circa il doppio di quello relativo allo stesso materiale della matrice. Il rapporto K_{th}/K_Q per questi materiali risulta essere molto più alto rispetto a quello valido per i metalli o per termoplastici amorfi. Infine si è constatato che le curve Stress-Life, relative a provini non intagliati, possono essere ricavate dai dati relativi alla propagazione della cricca fintanto che il cedimento di tali provini avviene per propagazione della cricca.

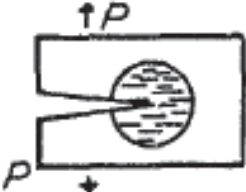
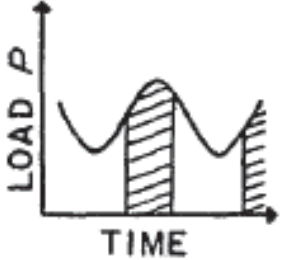
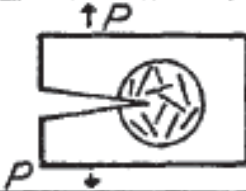
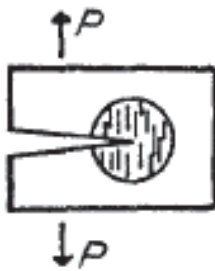
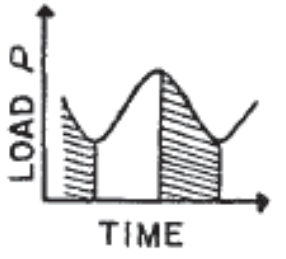
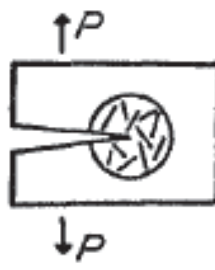
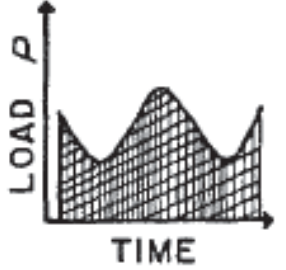
LOCAL' FIBRE ORIENTATION	MAIN FAILURE MODES	LOADING CYCLE
	TENSILE OR SHEAR FAILURE IN THE MATRIX AND AT THE INTERFACE	
	SHEAR FAILURE AT THE INTERFACE	
	SINGLE AND MULTIPLE FIBRE FRACTURE IN COMPRESSION, BY BUCKLING OR DURING CRACK CLOSURE	
	FIBRE FRACTURE IN A BENDING MODE OR DURING CRACK CLOSURE	

Figura 1.14: Riassunto dei più importanti micromodelli di frattura durante la propagazione stabile della cricca nei polimeri rinforzati con fibre di vetro corte

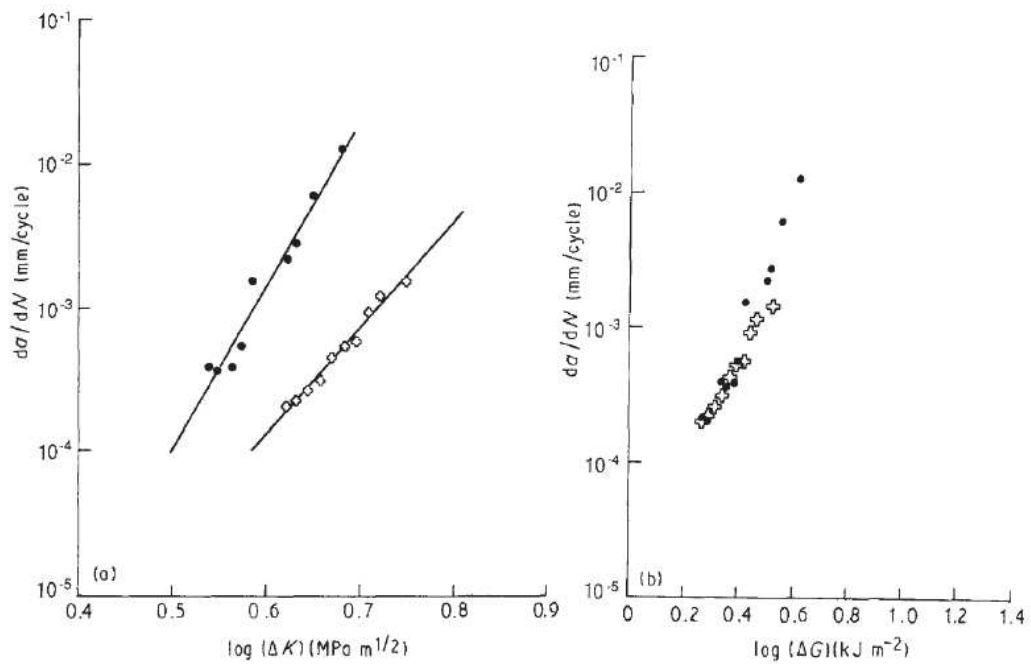


Figura 1.15: Velocità di propagazione della cricca nel nylon66 rinforzato, basse velocità di iniezione, in funzione di (grafico sinistra) fattore di intensificazione delle tensioni(δK) e (grafico destra) in funzione del SERR (δG) (punto) parallelo, (croce) perpendicolare

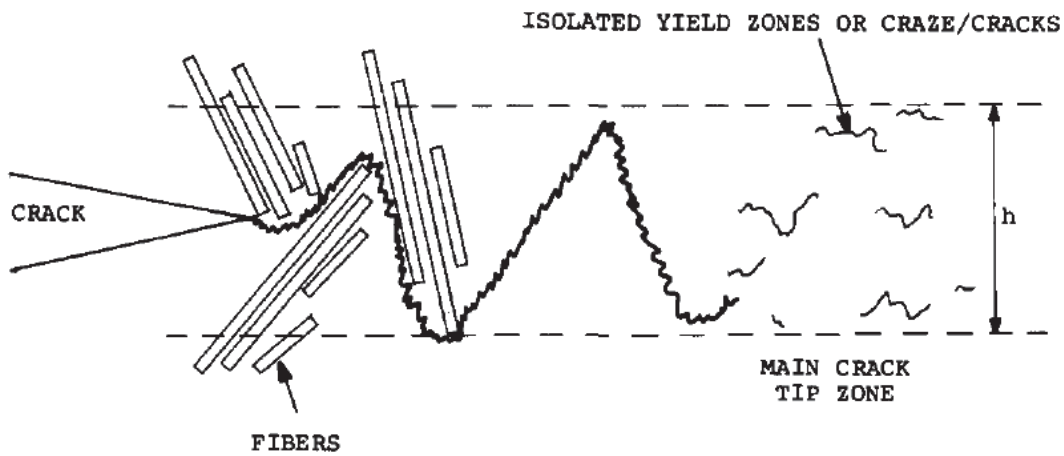


Figura 1.16: Schematizzazione del meccanismo *fiber avoidance mode*

2

Realizzazione provini e analisi morfologiche

2.1 STAMPAGGIO

Il provino è stato realizzato tramite una pressa a stampaggio ad iniezione presso il laboratorio Te.Si. dell'università degli studi di Padova. La macchina, una Battenfeld®HM 180/525H/210S è dotata di una tramoggia, nella quale viene depositato il pellet opportunamente deumidificato prima dello stampaggio, una vite di plastificazione, che si occupa di fondere e miscelare il materiale prima dell'iniezione, uno stampo di alluminio di dimensione nominale 200x200x4 e un sistema di raffreddamento a canali caldi (figura 2.1).

Per la realizzazione delle diverse geometrie dei provini sono stati utilizzati degli inserti (ciascuno per replicare i differenti raggi di raccordo degli intagli, figura 2.2). Una volta effettuato lo stampaggio, è stato rimosso il testimone di iniezione tramite l'utilizzo di un raschiatore elettrico.



Figura 2.1: Immagini dell'interno della pressa: a sinistra lo stampo, a destra il gruppo di iniezione

E' bene fare una considerazione importante sulla morfologia del provino stampato. Le fibre infatti a causa del processo produttivo, non si dispongono in maniera allineata rispetto alla direzione del flusso del materiale iniettato nello stampo, ma si viene a creare un effetto così nominato *skin-core-skin*, ossia in prossimità delle pareti dello stampo le fibre sono allineate rispetto alla direzione del flusso del materiale (*skin*). Viceversa nella parte interna della piastra le fibre mostrano una tendenza a disporsi ortogonalmente alla direzione del flusso del materiale (*core*). Questo fenomeno influenza le proprietà meccaniche del materiale. Infatti a 0° (vedi figura 2.3) le proprietà elastiche del materiale risulteranno sottostimate a causa della presenza dello strato core sopra descritto. Va inoltre evidenziato che la dimensione dello strato core è maggiore per spessori del provino via via superiori. Nel nostro caso lo spessore è di circa $1.8mm$ per cui si può ritenere che lo strato core sia limitato.

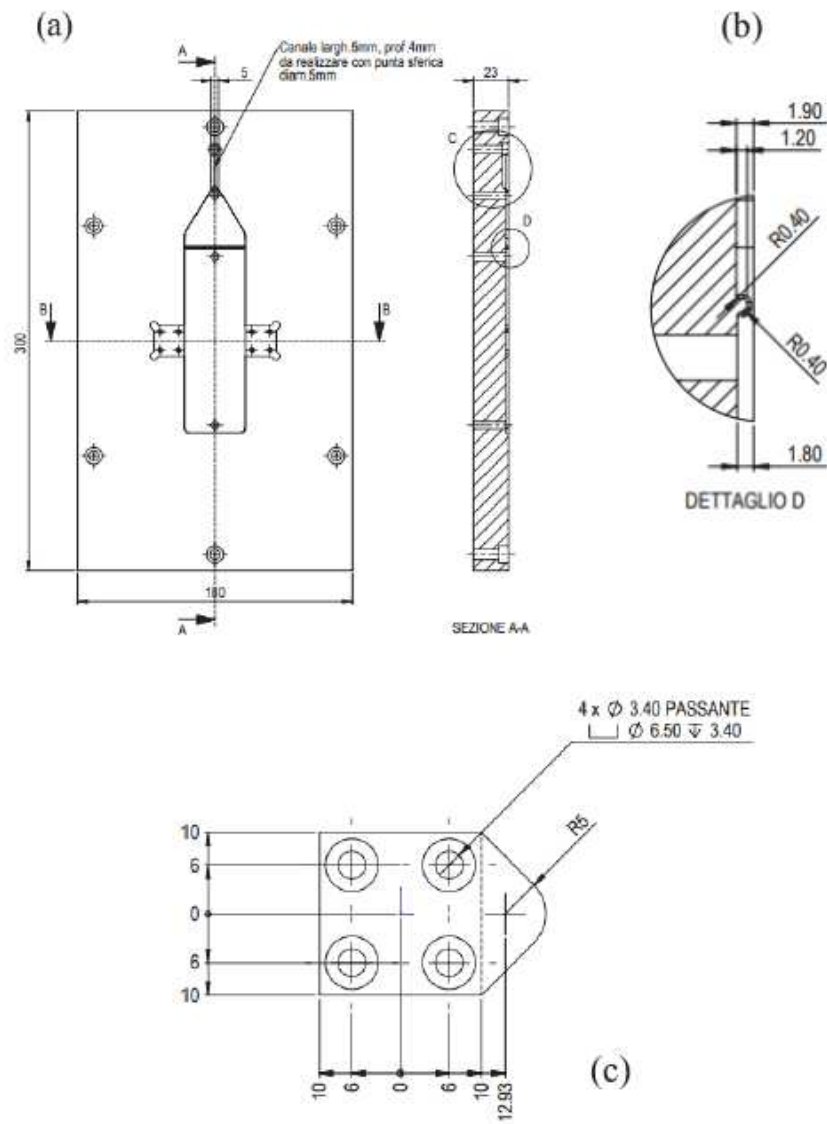


Figura 2.2: a) Geometria della cavità dello stampo, b) dettaglio della strizione e c) geometria inserto per provini con raggio intaglio di 5mm

2.2 SIMULAZIONI DI PROCESSO

La principale differenza tra i provini ricavati dalla fresatura di lastre realizzate per stampaggio ad iniezione, e quelli realizzati direttamente dallo stampaggio del materiale composito, sta nella distribuzione ed orientazione delle fibre in corrispondenza dei raccordi.

Dato che il presente lavoro di tesi si propone di confrontare le proprietà meccaniche di

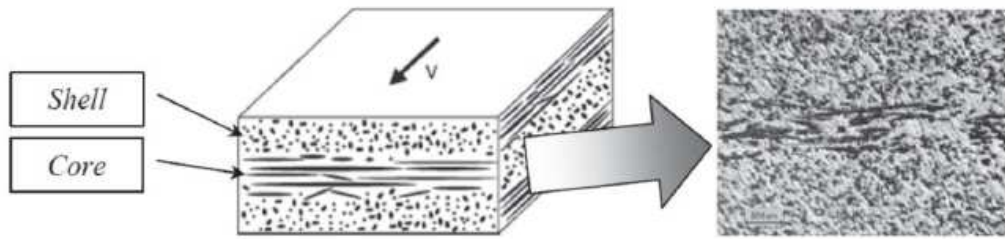


Figura 2.3: Schema dell'effetto *skin-core-skin* in componenti realizzati per stampaggio ad iniezione

provini ottenuti da due diversi processi produttivi, è importante conoscere qualitativamente e quantitativamente le caratteristiche morfologiche del materiale che si va a testare. Per questo motivo sono state eseguite delle simulazioni di processo tramite il software *Autodesk Moldflow Insight*. L'obiettivo è quello di ricavare i risultati relativi alla variazione locale delle proprietà meccaniche (dovute alla variazione di concentrazione ed orientazione delle fibre) che verranno utilizzati per effettuare delle analisi strutturali che ne tengano conto.

Le simulazioni di processo tramite *Moldflow* sono state eseguite da Leonardo Baldi nel suo lavoro di tesi, per maggiori dettagli sulla procedura usata nelle simulazioni si rimanda al suo lavoro [5]. In figura 2.4 viene mostrata la mesh utilizzata e in figura 2.5 una mappa a colori del tensore di orientazione delle fibre T_{yy} [5]. Il programma poi genera come output un file con estensione *.sdy* (contenente tutte le informazioni riguardo l'orientazione e distribuzione delle fibre) che verrà utilizzato successivamente in questo lavoro per eseguire analisi strutturali.

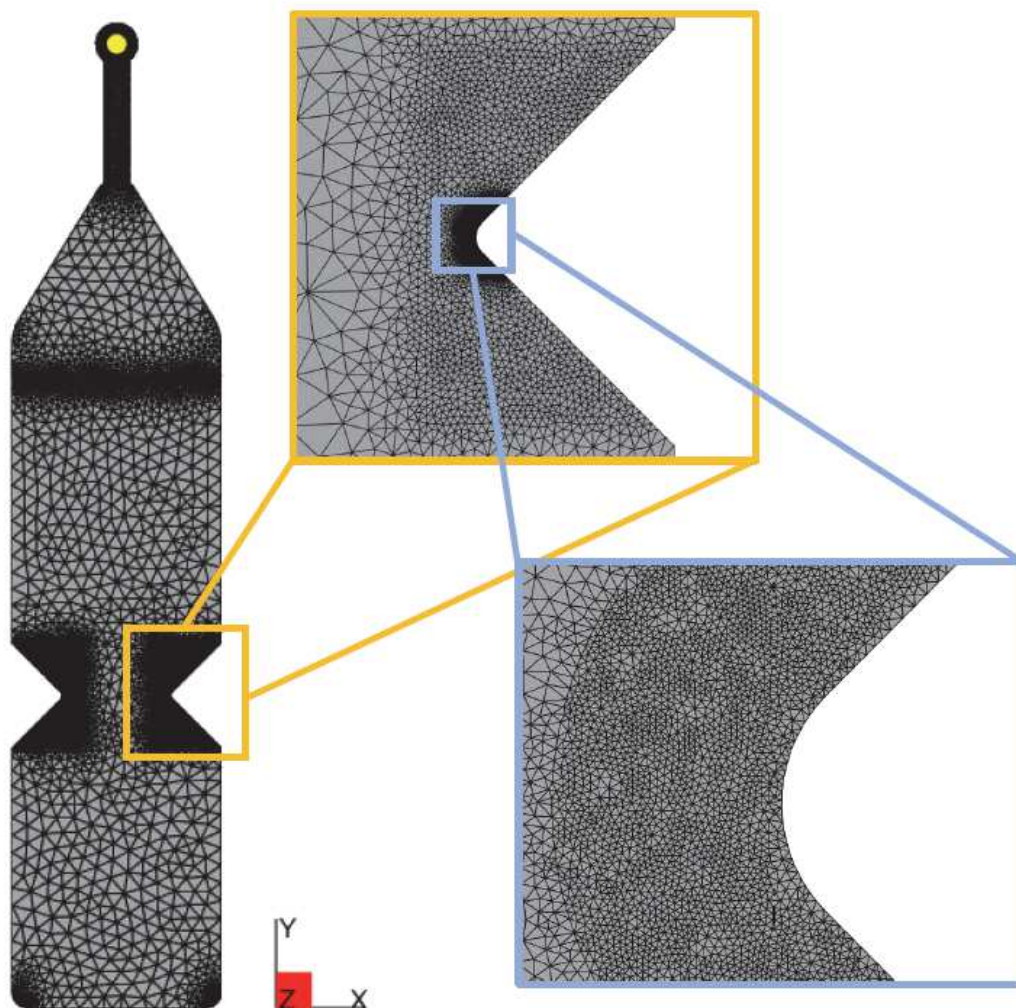


Figura 2.4: Mesh utilizzata nelle simulazioni di stampaggio ad iniezione con Moldflow. Le zone in prossimità degli intagli sono state infittite essendo le aree di maggiore interesse [5]

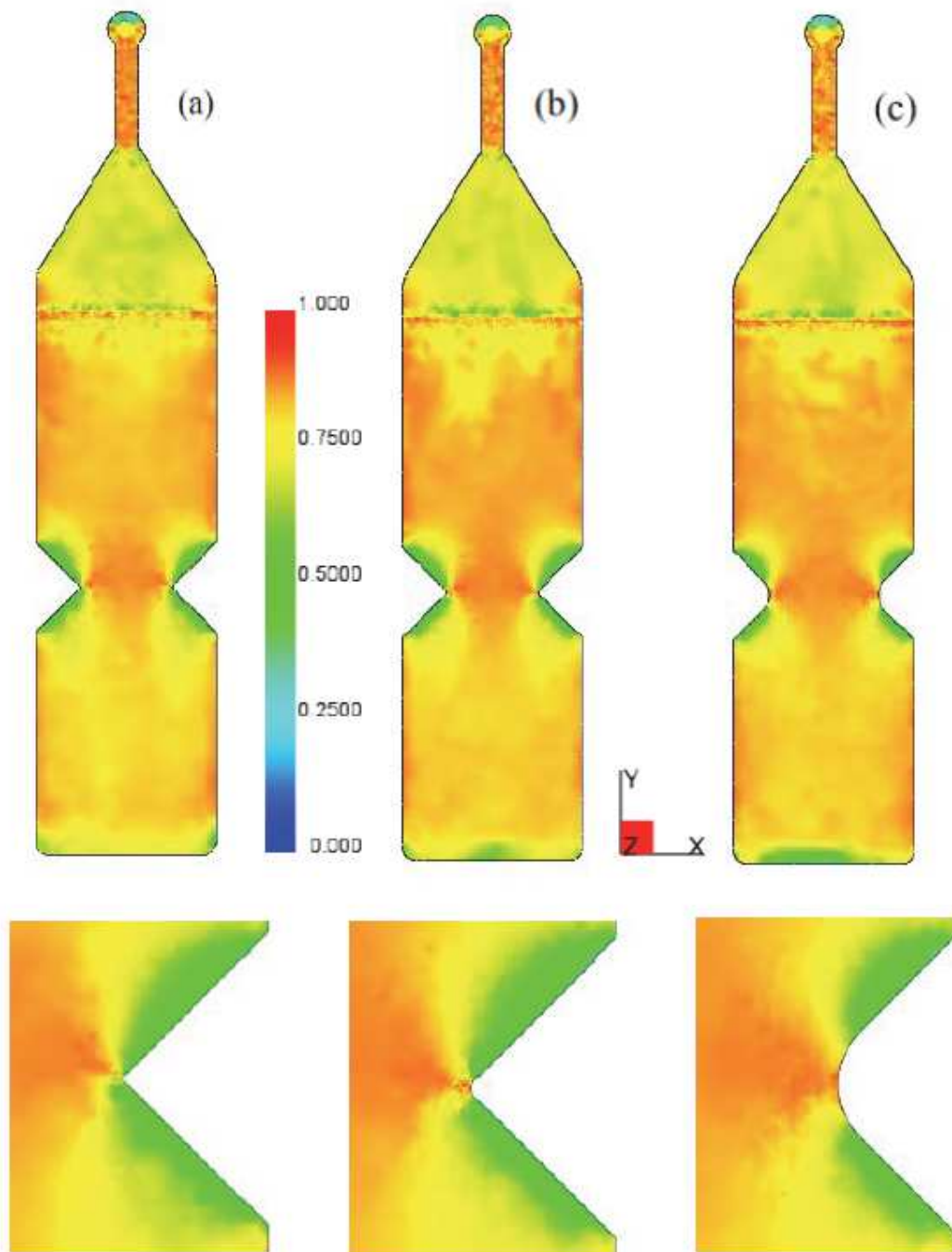


Figura 2.5: Mappa a colori rappresentativa del tensore di orientazione T_{yy} per i 3 tipi di raggio di raccordo degli in tagli: (a) $R = 0.2\text{mm}$, (b) $R = 1\text{mm}$ e (c) $R = 5\text{mm}$. È presente anche un'immagine di dettaglio per ogni geometria focalizzata nella zona intagliata

2.3 ANALISI TOMOGRAFICA DEI PROVINI

La tomografia computerizzata a raggi X è uno strumento molto utile per analizzare la morfologia di materiali compositi. Questa tecnica non essendo distruttiva, permette di analizzare la parte interna del campione senza doverlo rompere o sezionare. In figura 2.6 possiamo vedere uno schema di funzionamento della macchina. Lo strumento è costituito da una sorgente a raggi X che emette un fascio conico di elettroni che investe il campione da analizzare. Il detector, posto oltre il campione, rileva l'intensità residua del fascio che lo ha attraversato; tale intensità dipenderà dalla densità del materiale e dallo spessore del campione. In questo modo vengono rilevati eventuali vuoti interni o variazioni di densità, mentre la parte del fascio che non colpisce il provino passerà indisturbato. In questo modo si ottiene un'immagine bidimensionale del componente (ossia una proiezione bidimensionale del campione ad una determinata posizione nello spazio), in figura 2.7 possiamo vederne un esempio.

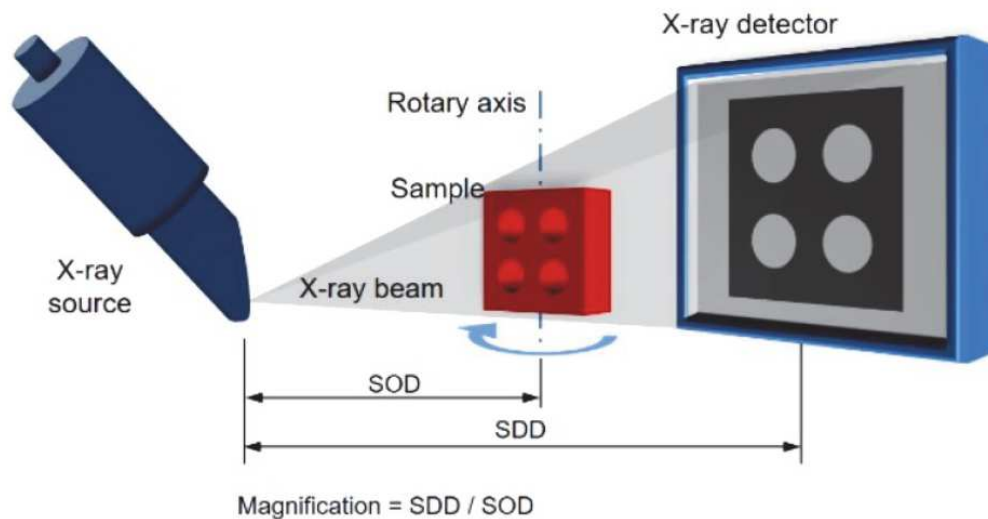


Figura 2.6: Schema di funzionamento della tomografia computerizzata a raggi X

Grazie alla tavola rotante su cui viene posto il campione, si riesce ad eseguire una scansione per ogni posizione angolare (fino a 3600 proiezioni su una rotazione completa del provino). Il campione può inoltre traslare attorno a 3 assi, l'asse di traslazione più importante è l'asse di *magnification*, che consente di modificare la risoluzione dell'immagine. Infatti in questo sistema l'ingrandimento non è ottico ma geometrico, dipende dalle distanze relative tra sorgente e oggetto (Source to Object Distance, SOD) e tra detector e sorgente (Source to Detec-

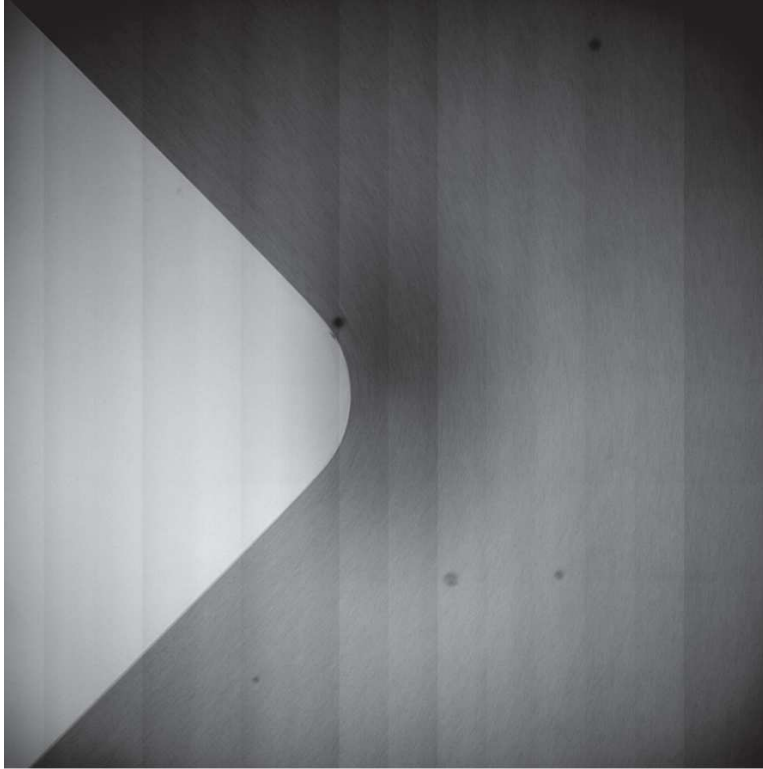


Figura 2.7: Radiografia della sezione frontale del provino con $R = 1mm$. Si riescono a notare le fibre che presentano una tonalità di grigio più chiara

tor Distance, SDD), la *magnification* è data da:

$$magnification = SOD/SDD \quad (2.1)$$

E' possibile avvicinarsi alla sorgente per avere un ingrandimento maggiore sul detector, con un'immagine più grande ed una risoluzione maggiore, prestando però attenzione a rimanere nel campo visivo del detector. Infine lo strumento come out-put genera un modello virtuale tridimensionale ottenuto dalla ricostruzione (operata dal software) di tutte le scansioni bidimensionali eseguite per ogni posizione angolare del campione. Il modello inizialmente si presenterà costituito da tanti *voxel* (ovvero dei pixel volumetrici) dove ciascuno di essi rappresenta il vuoto, la matrice o la fibra di vetro mostrati con diverse scale di grigi. Dopo un opportuno filtraggio emergerà la geometria 3D del componente (figura 2.8)

Nel presente lavoro, la tomografia è stata utilizzata per ottenere delle informazioni più realistiche sulla morfologia dei provini, più precisamente per andare ad indagare la distribuzione

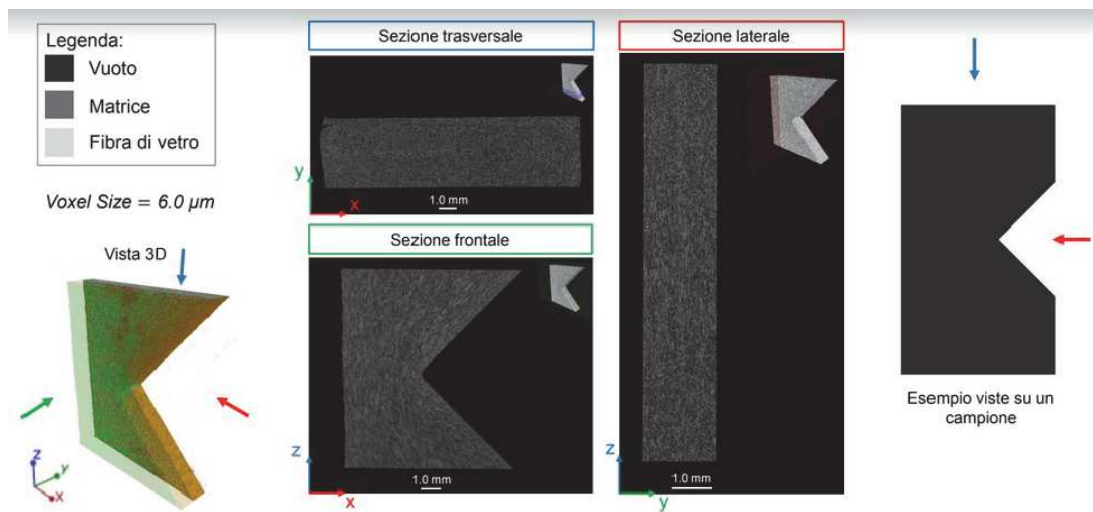


Figura 2.8: Esempio di modello 3D ottenuto dal tomografo, vengono anche riportate alcune viste in scala di grigi, a sinistra dell'immagine la legenda che indica a cosa si riferiscono le varie tonalità di grigio

e l'orientazione delle fibre in corrispondenza degli intagli (zona di maggiore interesse). Da un punto di vista operativo, il provino è stato prima ritagliato in modo da ottenere dei campioni che avessero delle dimensioni tale da poter essere messi nel tomografo, evitando collisioni con parti interne dello strumento (figura 2.9).

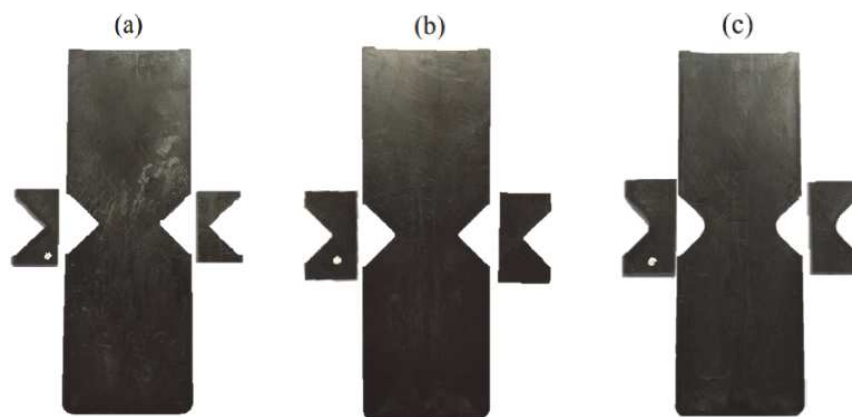


Figura 2.9: Provini stampati in PPSGF40 e campioni prelevati per le analisi tomografiche; (a) $R = 0.2\text{mm}$, (b) $R = 1\text{mm}$ e (c) $R = 5\text{mm}$. L'intaglio destro e sinistro sono distinguibili da un pallino bianco [5]

Poi sono state eseguite le scansioni a diverse posizioni angolari al fine di ottenere la geometria 3D voxel-based. In figura 2.10 viene mostrata una mappa a colori del tensore di ori-

entazione delle fibre di alcune sezioni del modello 3D generato dallo strumento, in rosso le porzioni con orientazione trasversale delle fibre rispetto alla direzione di iniezione e in verde le porzioni con orientazione delle fibre parallela rispetto alla direzione di iniezione.

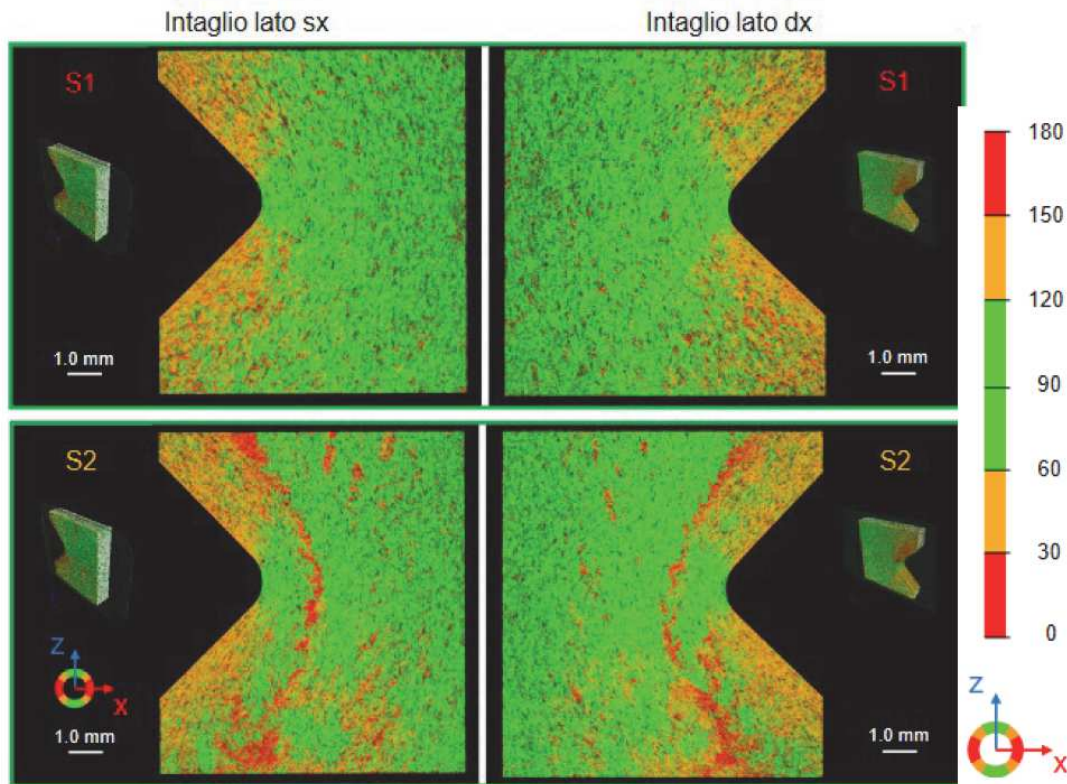


Figura 2.10: Verifica di simmetria nell'orientazione delle fibre tra intaglio sinistro e destro del provino $R = 1mm$

Nella stessa figura si può notare in maniera qualitativa che, anche a diverse posizioni lungo lo spessore, gli intagli sono simmetrici in termini di orientazione delle fibre. Questo ha permesso di analizzare al tomografo solo uno dei due intagli per ciascun provino, rendendo le scansioni meno onerose in termini di tempo. Sempre in figura 2.10 si può notare la differenza di orientazione tra il *core* (sezione S2) e la *skin* (sezione S1) del provino, quest'ultimo risulta più orientato secondo la direzione di flusso (anche se l'effetto non è così marcato). In figura 2.11 invece, vengono confrontate le 3 diverse geometrie. Nel provino $R = 5mm$ si nota un passaggio più graduale dell'orientazione delle fibre dal bordo superiore a quello inferiore dell'intaglio, per contro, nei provini $R = 0.2mm$ tale passaggio è più brusco (questo è dovuto al flusso del materiale durante la fase di iniezione).

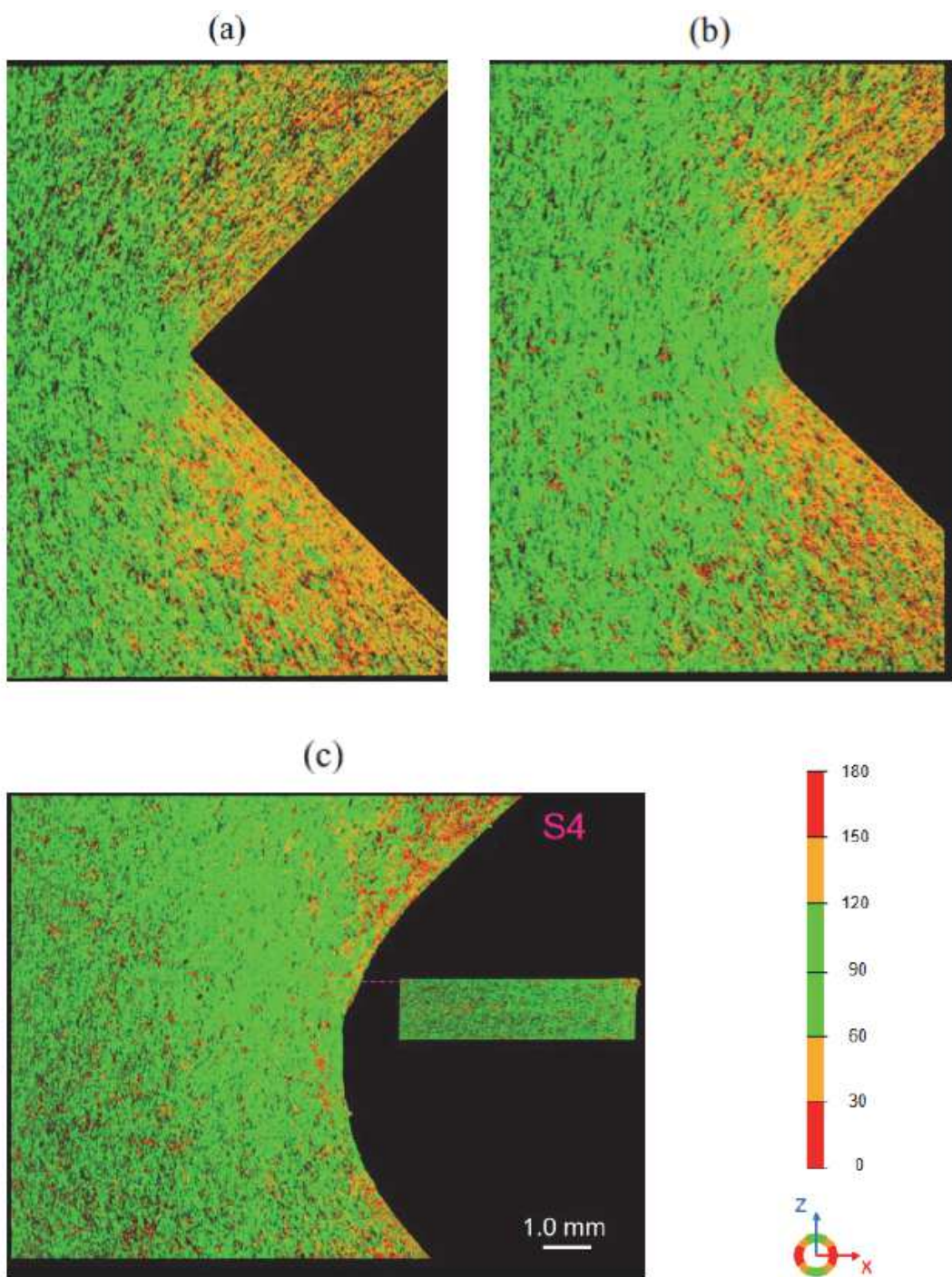


Figura 2.11: Risultati tomografia per le tre geometrie di intaglio. (a) $R = 0.2\text{mm}$, (b) $R = 1\text{mm}$ e (c) $R = 5\text{mm}$

2.4 CONFRONTO TRA ANALISI TOMOGRAFICA E SIMULAZIONE DI PROCESSO *MOLD-FLOW*

Vediamo ora un confronto qualitativo tra le analisi al tomografo e le simulazioni di processo.

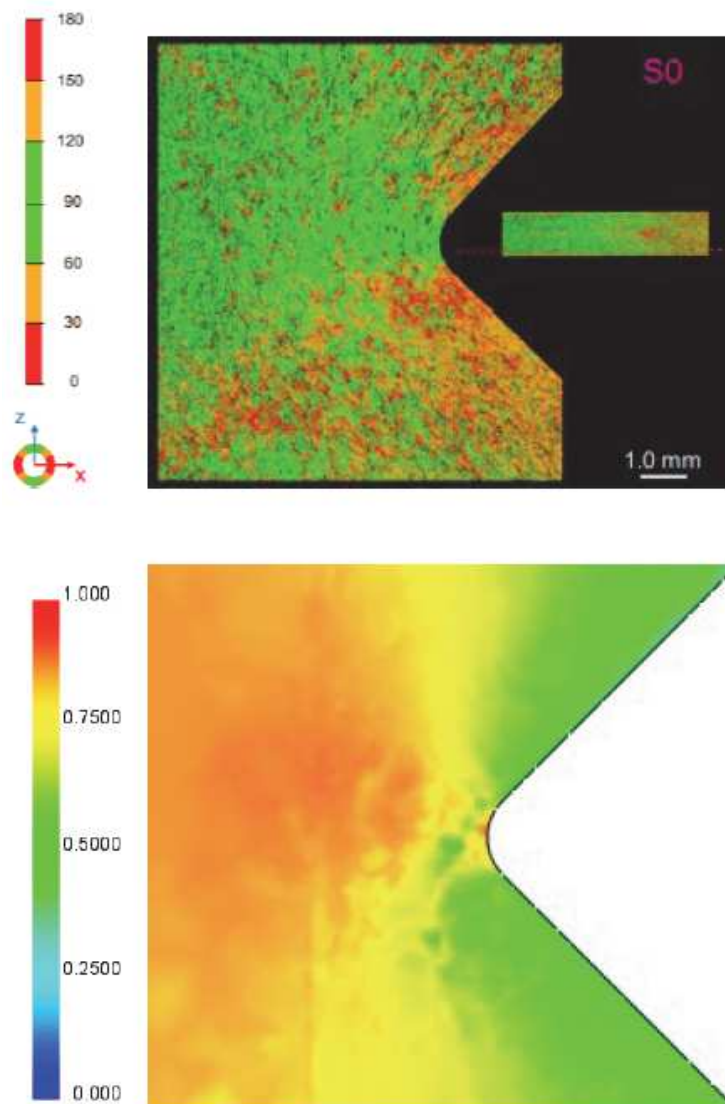


Figura 2.12: Confronto tra i risultati dell'analisi tomografica e della simulazione moldflow per il provino $R = 1\text{ mm}$

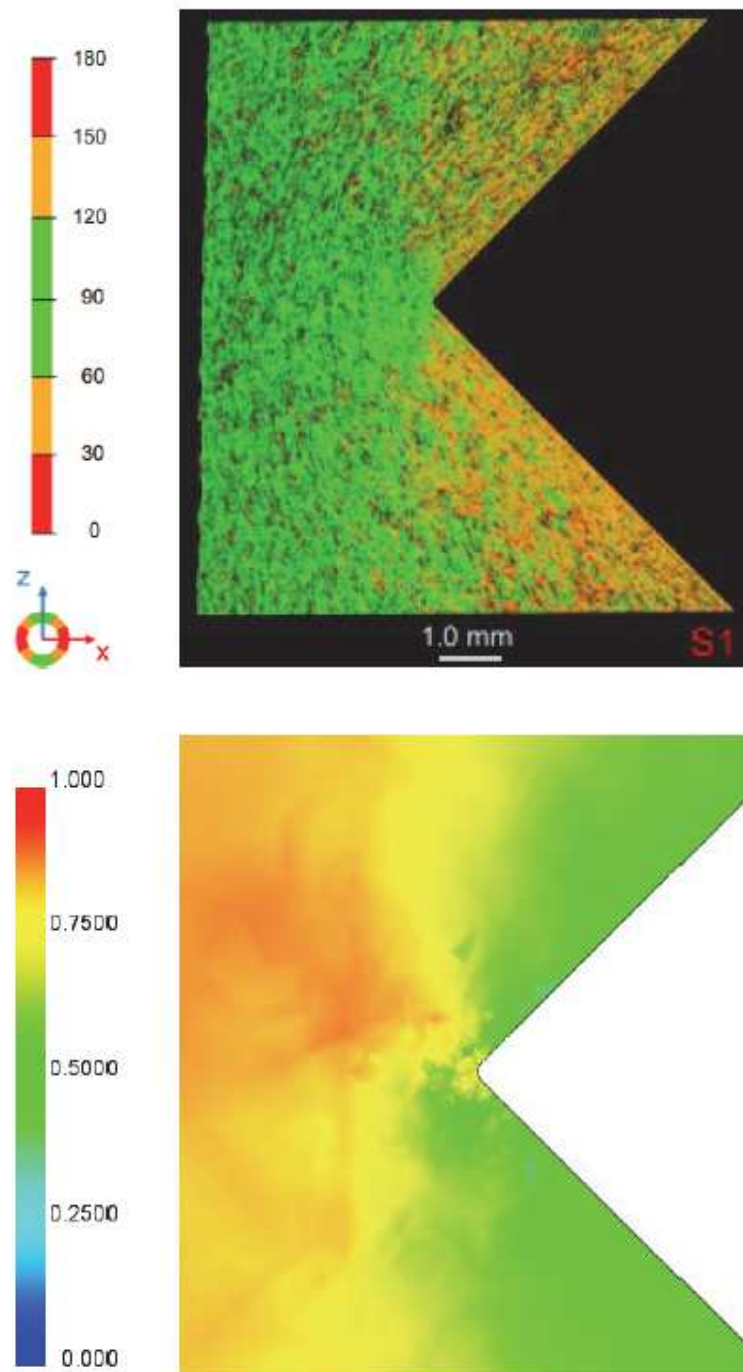


Figura 2.13: Confronto tra i risultati dell'analisi tomografica e della simulazione moldflow per il provino $R = 0.2mm$

Nelle figure 2.12 e 2.13 vediamo delle mappe a colori che mostrano l'angolo di orien-

tazione delle fibre da 0 a 180 per le analisi tomografiche e il tensore di orientazione (che va da 0 a 1 dove 0 significa che le fibre sono parallele rispetto alla direzione di flusso del materiale) per le simulazioni. Vengono quindi comparate le mappe una ad una, per ogni geometria. Si nota una buona corrispondenza, a livello qualitativo, tra l'orientazione reale e quella derivante dalla simulazione di processo. In particolare emerge da entrambe la presenza di fibre orientate a 45 lungo il profilo dell'intaglio, questa zona influenzerà, come si vedrà nel cap 5, la distribuzione dei campi di tensione e di conseguenza la resistenza dei provini.

2.5 STIMA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE

Una volta note le proprietà elastiche della matrice e fibra si possono stimare tramite dei modelli teorici le proprietà elastiche del composito. Nel caso di materiali compositi unidirezionali rinforzati con fibra corta, un punto critico è rappresentato dalla testa della fibra, perché vi è una concentrazione delle tensioni che porta allo scollamento fibra-matrice causando l'inizio del danneggiamento del materiale. Le fibre perciò sono utili quando il carico viene trasferito dalla matrice alle stesse. Questo avviene tramite le tensioni tangenziali all'interfaccia. Si propone di seguito un modello per la stima del modulo elastico in direzione 1. Le ipotesi di partenza sono le seguenti:

- perfetta adesione tra matrice e fibre;
- comportamento lineare elastico della matrice e delle fibre;
- le fibre sono tutte della stessa lunghezza, perfettamente parallele tra loro ed allineate in direzione 1
- la distanza media tra l'asse delle fibre è pari a $2R$.

è dunque possibile ottenere una stima di E_{11} attraverso la seguente formula:

$$E_{11} = E_f V_f \left(1 - \frac{\tanh na}{na}\right) + E_m (1 - V_f) \quad (2.2)$$

dove:

- E_f è il modulo elastico delle fibre;
- E_m è il modulo elastico della matrice
- V_f è la frazione volumetrica di fibre presente nel composito

- $a = l/d_f$ è l'aspect ratio, un parametro geometrico delle fibre dato dal rapporto tra la lunghezza
- delle fibre dopo lo stampaggio ed il diametro delle stesse;
- $n = \sqrt{\frac{2G_m}{E_f \ln \frac{2R}{d_f}}}$

Per quanto concerne il modulo elastico in direzione 2 e 3 questo può essere stimato tramite il modello empirico di Halpin-Tsai[?]:

$$\frac{E_{22}}{E_m} = \frac{E_{33}}{E_m} = \frac{1 + \varepsilon\eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (2.3)$$

Per fibre aventi sezione circolare $\varepsilon = 2$ e η è ricavato dalla seguente formula:

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \varepsilon} \quad (2.4)$$

3

Caratterizzazione statica del materiale

3.1 APPARATO STRUMENTALE

Per le prove sperimentali sono state utilizzate due macchine: una idraulica e una pneumatica. La prima è una MTS® 858 Mini Bionix II. L'attuatore idraulico MTS® Model 359, in grado di garantire una forza fino a 15 kN, rende la macchina adatta per l'esecuzione di test su materiali a bassa resistenza (plastiche, elastomeri, alluminio e alcuni compositi), figura 3.4. All'interno dell'attuatore il trasduttore di spostamento induttivo (LDVT o Linear Variable Displacement Transducer) misura lo spostamento percorso dal cilindro. I carichi vengono misurati dal trasduttore di forza MTS® 661.19 caratterizzato da bassa deflessione, alto grado di rigidità e alto grado di concentricità e parallelismo dei componenti per garantire elevata accuratezza durante i test.

La seconda è un'apparecchiatura realizzata in laboratorio. Tale apparecchiatura è costituita da una piastra di base in alluminio sulla quale sono state montate due colonne ottenute con l'uso di profili scanalati aventi sezione 100 x 100mm della ditta Bosch. Con la stessa tipologia di profilo sulla sommità delle colonne è stata fissata una trave al centro della quale è stato montato un cilindro pneumatico bidirezionale di alesaggio 80 mm e corsa 50 mm della ditta *enginLAB* in grado di sviluppare quando è alimentato da aria compressa a 6 bar una forza di trazione di 2960 N. Il cilindro riceve l'aria per la sua movimentazione da una servo-valvola modulante comandata da un controllore PID entrambi della *enginLAB*. L'aria compressa che alimenta la servo valvola e il pistone è fornita da un gruppo di trattamento aria costituito

da un filtro, un regolatore di pressione e un separatore di condensa in modo che alla valvola e al cilindro arrivi aria compressa pulita e priva di tracce d'acqua. Sulla base in alluminio in asse con il cilindro è stata fissata una cella di carico avente la funzione di rilevare il carico applicato al provino. Due morse a ganaschia, una applicata alla cella di carico e una allo stelo del cilindro consentono di fissare il provino alla apparecchiatura (figura 3.1).

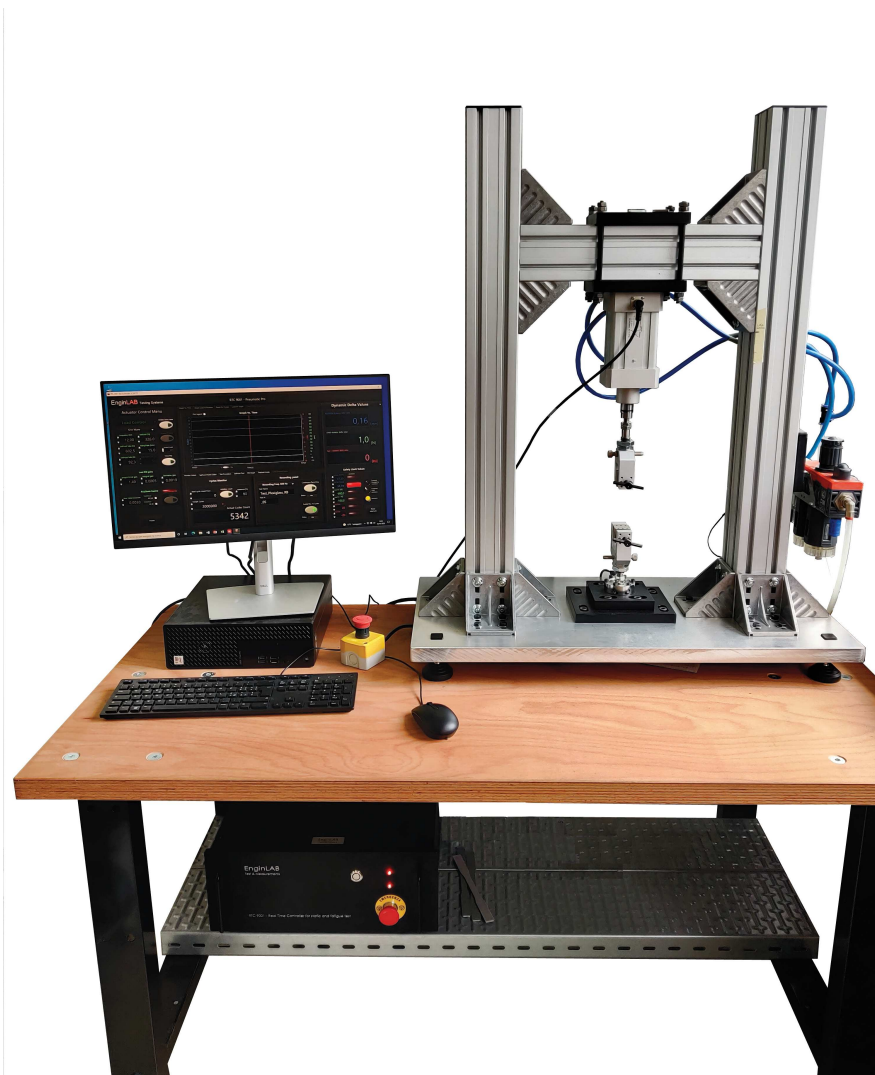


Figura 3.1: Macchina di prova servo-pneumatica utilizzata per le prove sperimentali

L'estensometro assiale MTS® 634.12F-24, misura la deformazione con un'accuratezza ISO 9513 di classe 0.5 (errore relativo 0.5%, errore assoluto $\pm 1.5\mu m$, figura 3.5). La distanza tra i coltelli è $25mm$, e la corsa dell'estensometro va da $-2.5mm$ a $+12.5mm$. Per mon-

itorare l'innesco e propagazione delle cricche è stato usato un microscopio digitale Dino Lite AM4000. In figura 3.2 e 3.3 viene mostrato il set-up utilizzato per l'osservazione dei provini tramite microscopio digitale. Il microscopio è fissato ad una base di supporto che può (tramite delle manopole) traslare nel piano rendendo più facile l'inquadratura della cricca.



Figura 3.2: Apparato sperimentale utilizzato per osservare la cricca costituito da base di supporto e microscopio

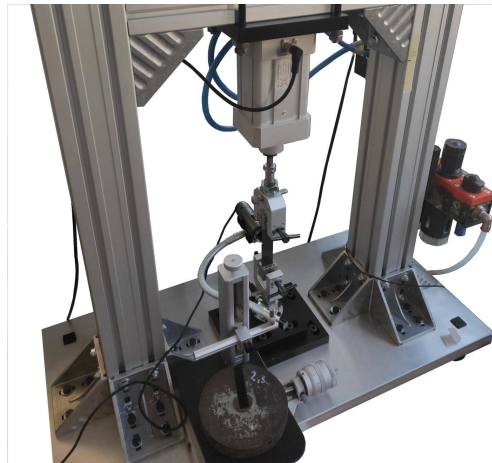


Figura 3.3: Apparato sperimentale utilizzato per osservare la cricca nel retro del provino costituito da base di supporto e microscopio



Figura 3.4: Immagine della macchina di prova Mini-Bionix utilizzata per le prove sperimentale



Figura 3.5: Estensometro posizionato nella zona di strizione del provino durante le prove di trazione statiche dei provini lisci

3.2 PROPRIETÀ ELASTICHE DEI PROVINI REALIZZATI PER FRESATURA

Vengono di seguito riportate le proprietà elastiche del materiale ricavate nel lavoro condotto da Zappalorto, Ricotta e Sorgato [6] sui provini ottenuti dalla fresatura di piastre iniettate. Lo scopo è quello di verificare che il materiale utilizzato nei due lavori sia lo stesso. I provini, essendo stati realizzati in due momenti diversi, potrebbero avere delle differenze nelle proprietà; si specifica che questa prima verifica viene eseguita su provini lisci che non dovrebbero teoricamente presentare delle differenze a livello morfologico. Nel paragrafo 3.6 invece, verranno confrontate le caratteristiche di resistenza statica tra i provini iniettati e quelli fresati [6] (obiettivo che si pone il presente lavoro di tesi).

I campioni testati in [6] come già detto sono stati ricavati da un processo di fresatura a partire da una piastra $200 \times 200 \text{ mm}$ ottenuta per stampaggio ad iniezione (figura 3.6). L'angolo θ indica l'angolo tra la direzione del flusso del materiale e l'asse longitudinale del provino (asse x in figura 3.6) lungo cui vengono applicati i carichi.

In figura 3.7 vengono mostrate le curve *stress-strain* ingegneristiche relative alle prove di compressione e trazione. Si nota come varia il carico di rottura al variare dell'angolo di orientazione θ . Le proprietà elastiche del materiale (E_1, E_2 e G_{12}) sono state stimate dal valore ricavato per E_x , applicando la teoria dell'elasticità lineare per i materiali ortotropi, in cui E_x può essere espresso in funzione dell'angolo di orientazione θ

$$E_x(\theta) = \left[\frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1} \quad (3.1)$$

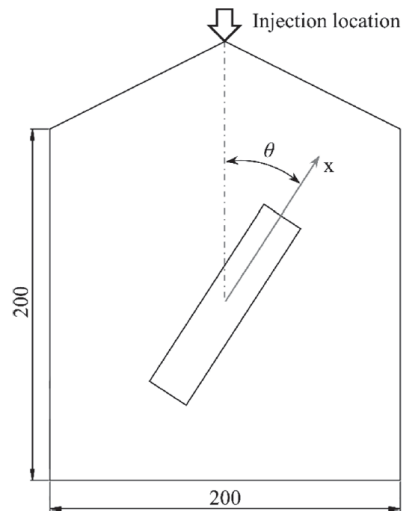


Figura 3.6: Schematizzazione della piastra stampata ad iniezione da cui sono ottenuti diversi provini a differenti orientazioni θ [6]

In tabella 3.1 e 3.2 le proprietà elastiche e le caratteristiche di resistenza statica del materiale [6]

Per le componenti fuori dal piano 12, è stato ipotizzato che $E_2 = E_3$, $G_{13} = G_{12}$ e $\nu_{13} = \nu_{12}$. Infine, i valori per G_{23} e ν_{23} sono stati considerati uguali a quelli della matrice in PPS, ipotizzando che il comportamento fuori dal piano sia dominato dalla matrice. In tabella 3.3 le proprietà del materiale così ricavate [6].

Orientazione fibre[°]	σ_{UTS} [MPa]	σ_{UCS} [MPa]	σ_{UTS} [%]	σ_{UCS} [%]
0	174.4	231.6	1.71	2.87
45	93.4	/	1.41	/
90	64.9	161.0	1.00	4.00

Tabella 3.1: Caratteristiche di resistenza dei lisci in PPS GF40 [6]

Orientazione fibre[°]	$E_x, t = 1.8mm$ [MPa]	$E_x, t = 4.0mm$ [MPa]
0	14780	13340
45	8760	8860
90	7490	8273

Tabella 3.2: Proprietà meccaniche dei provini [6]

Spessore [mm]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_3 [MPa]	G_{12} [MPa]	G_{13} [MPa]	G_{23} [MPa]
1.8	14780	7490	7490	3230	3230	1400
4.0	13340	8273	8273	3169	3169	1400

Spessore [mm]	ν_{12} [MPa]	ν_{13} [MPa]	ν_{23} [MPa]
1.8	0.4	0.4	0.37
4	0.4	0.4	0.37

Tabella 3.3: Proprietà elastiche derivanti dalla teoria dell'elasticità per PPS GF40 [6]

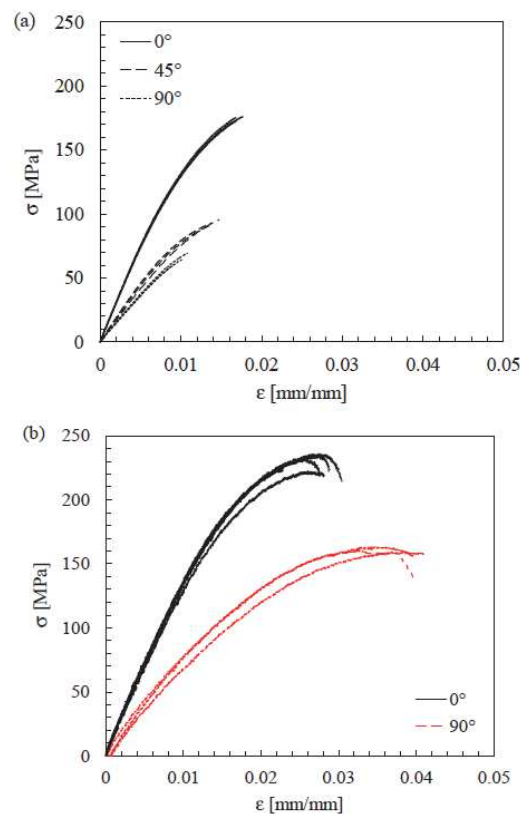


Figura 3.7: Curve *stress-strain* ingegneristiche per uno stato assiale di (a) trazione e (b) compressione [6]

3.3 PROVE DI TRAZIONE SUI PROVINI LISCI

Vengono ora riportati i dati relativi alle prove di trazione statiche sui provini lisci. In tabella 3.4 troviamo le principali caratteristiche geometriche dei provini misurate con un calibro. In figura 3.8 invece vediamo un'immagine del provino e un disegno con le quote nominali. Le prove sono state eseguite in controllo di deformazione imponendo una velocità di

2mm/min. Una volta raccolti i dati relativi alla forza misurata dal trasduttore e alla deformazione misurata dall'estensometro, è possibile costruire la curva *stress-strain* (figura 3.9) dividendo la forza per la sezione misurata in tab xxx.

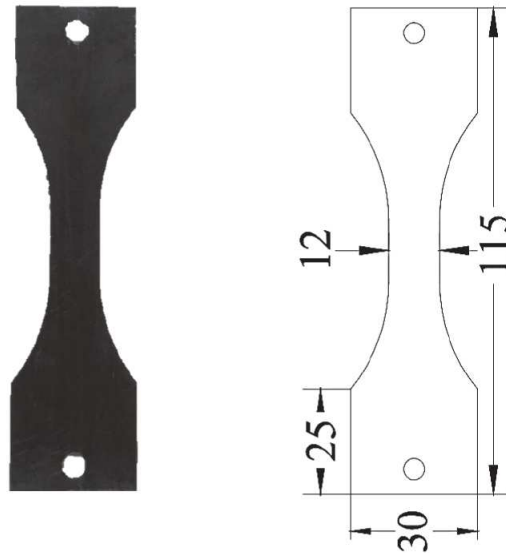


Figura 3.8: Geometria dei provini lisci

Nome	Spessore[mm]	Larghezza sezione netta[mm]
L_1	1.95	12.44
L_2	1.95	12.44
L_3	1.90	12.45

Tabella 3.4: Dimensioni principali dei provini lisci

Nome	σ_{UTS} [MPa]	Differenza con [6] [%]	E_x [MPa]	Differenza con [6] [%]
L_1	146.6	-15.9	14365	-0.3
L_2	147.2	-15.6	13509	-8.5
L_3	150.8	-13.5	14745	0.0

Tabella 3.5: Dimensioni principali dei provini lisci

Il valore del modulo elastico si ricava effettuando una regressione lineare dei dati raccolti considerando i valori di tensione fino a 30 MPa. Il coefficiente angolare di tale retta è il modulo elastico E_1 del materiale (ossia fibre orientate lungo la direzione di applicazione del carico,

figura 3.10). Nella tabella 3.5 vengono riassunti i risultati ottenuti. Come si può notare, rispetto al materiale utilizzato in [6], il modulo elastico corrisponde, invece, la tensione di rottura presenta un valore più basso di circa il 15%. Questo può essere dovuto ad un effetto intaglio che agisce nel provino, sporcando l'effettiva tensione di rottura del provino liscio. Nel suo lavoro di tesi Leonardo Baldi [5], ha effettuato una semplice analisi FEM per valutare quantitativamente il coefficiente di concentrazione delle tensioni K_{tn} . Dalle analisi è emerso un K_{tn} pari a 1.14, che potrebbe quindi aver influito sui risultati della prova.

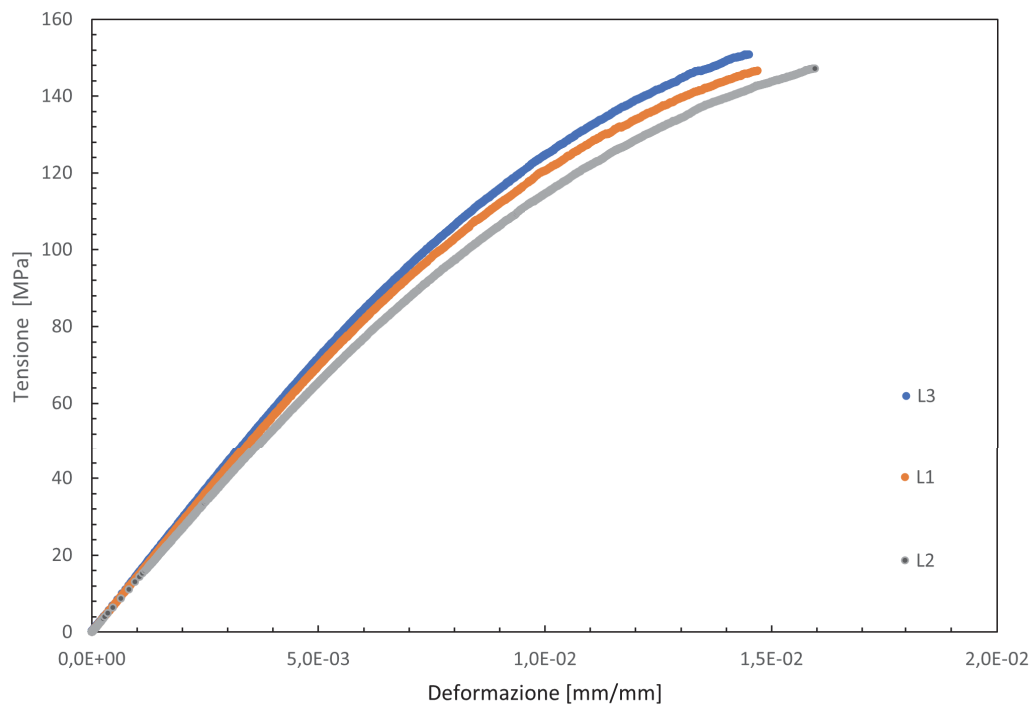


Figura 3.9: Curve stress-strain dei provini lisci testati

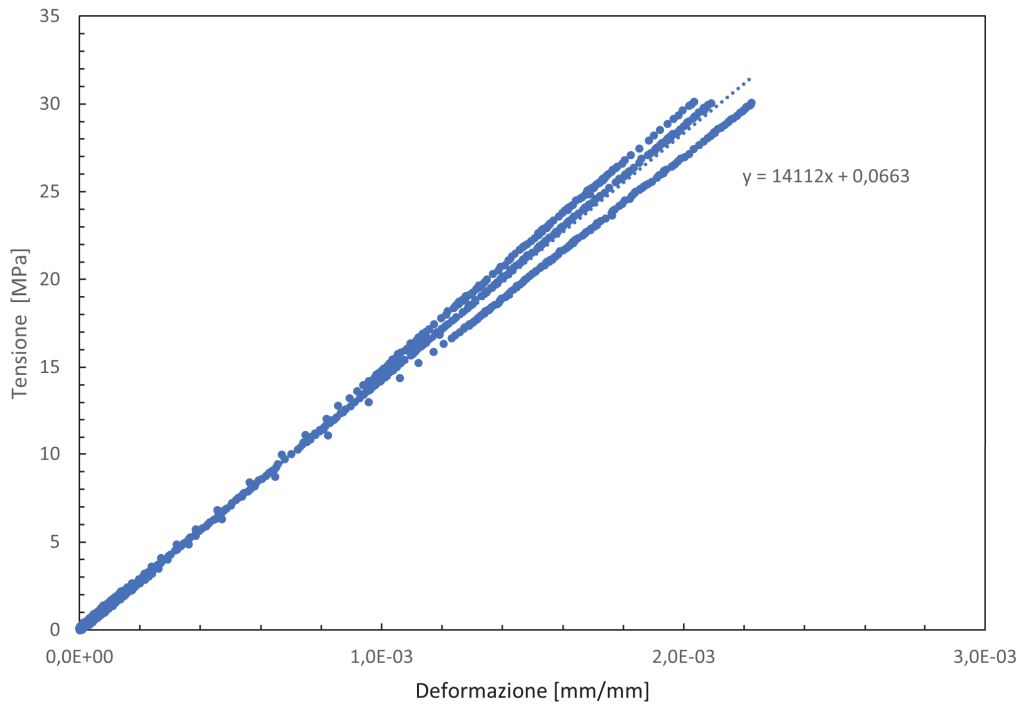


Figura 3.10: Valiutazione del modulo elastico tramite una regressione lineare sui valori sperimentali, vengono qui considerati i valori di tensione fino a 30 MPa

3.4 PROVE DI TRAZIONE SU PROVINI INTAGLIATI

Analogamente a quanto fatto per i provini iniettati [6], le geometrie testate sono le stesse. Avremo quindi 3 diversi raggi di raccordo, 5 mm, 1 mm e 0.2 mm. In figura 3.11 vediamo un disegno dei provini testati con le relative quote nominali. Le prove sono state eseguite in controllo di deformazione, con una velocità di 0.5 mm/min. Nelle figure 3.12 3.13 3.14 vediamo i grafici Forza-Spostamento dei provini testati, mentre nelle tabelle 3.6 3.7 3.8 vengono riassunti i dati delle prove.

Nome	Sezione netta [mm ²]	σ_{UTS} [MPa]
R0_1	38.60	102.0
R0_2	38.42	105.7
R0_3	38.68	102.6

Tabella 3.6: Tabella riassuntiva dei provini $r = 0.2$ mm testati

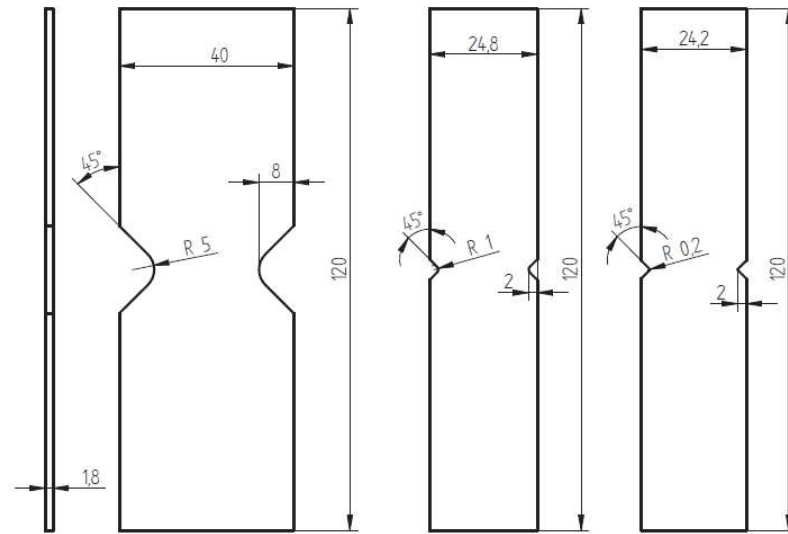


Figura 3.11: Geometrie utilizzate per la caratterizzazione statica di provini intagliati

Nome	Sezione netta [mm^2]	σ_{UTS} [MPa]
R1_1	40.17	116.0
R1_2	39.22	119.8
R1_3	39.99	107.6
R1_5	40.22	110.6

Tabella 3.7: Tabella riassuntiva dei provini $r = 1 \text{ mm}$ testati

Nome	Sezione netta [mm^2]	σ_{UTS} [MPa]
R5_1	47.59	106.0
R5_2	48.13	104.1
R5_3	47.32	112.1

Tabella 3.8: Tabella riassuntiva dei provini $r = 5 \text{ mm}$ testati

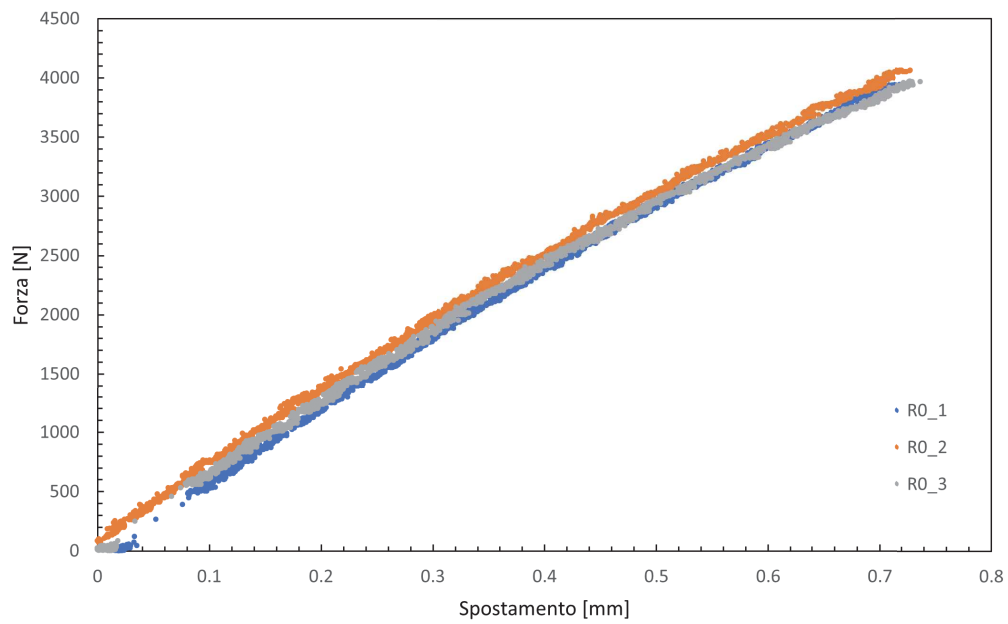


Figura 3.12: Grafico Forza-Spostamento dei provini $r = 0.2 \text{ mm}$ testati

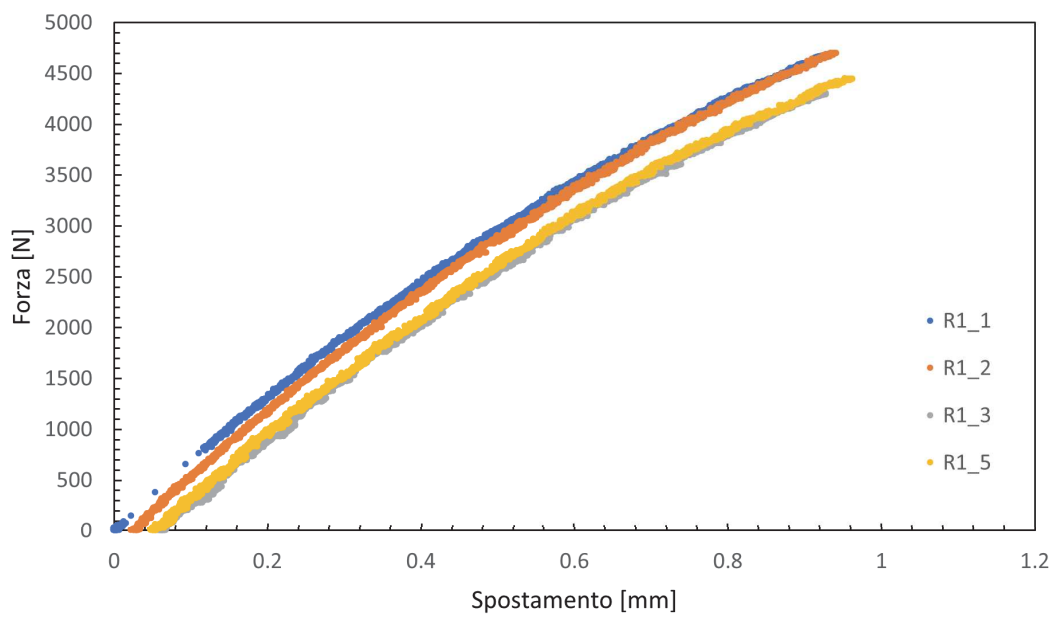


Figura 3.13: Grafico Forza-Spostamento dei provini $r = 1 \text{ mm}$ testati

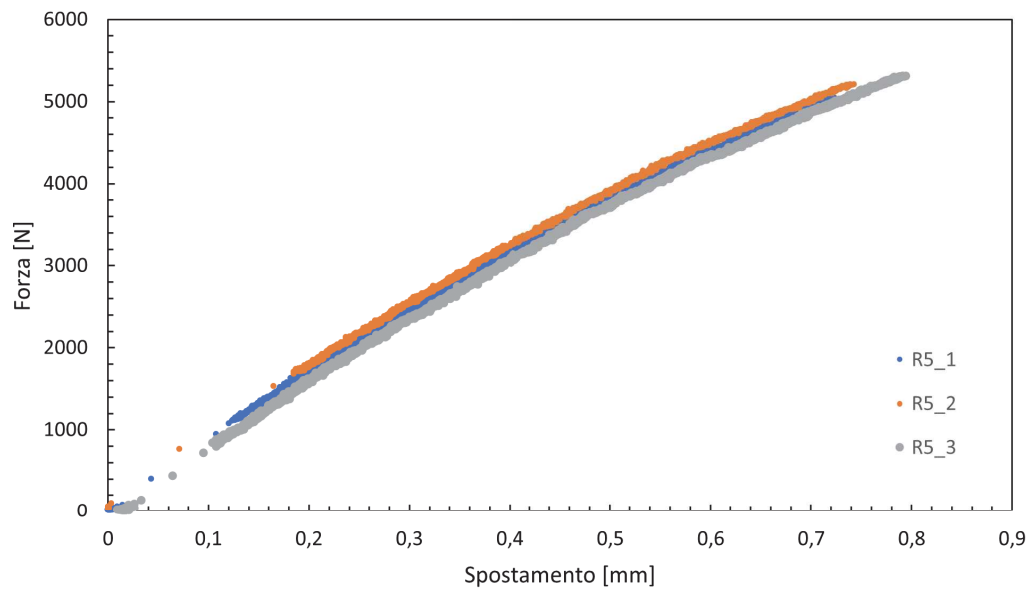


Figura 3.14: Grafico Forza-Spostamento dei provini $r = 5 \text{ mm}$ testati

3.5 ANALISI DELLE SUPERFICI DI FRATTURA

Le analisi delle superfici di frattura al SEM (Scanning Electron Microscope) sono state eseguite presso il laboratorio *Te.si* dell'università di Padova (figura ??).

Il principio di funzionamento del microscopio si basa sulla emissione di un fascio di elettroni da parte di un filamento in Tungsteno (il voltaggio utilizzato nelle analisi è di 20 KV), che attraverso una serie di lenti, viene focalizzato su una zona specifica. Gli elettroni riflessi dalla superficie vengono rilevati dal detector e convertiti in segnali elettrici che vengono poi elaborati per ottenere un'immagine in bianco e nero, con caratteristiche comparabili a quelle di una normale immagine fotografica.

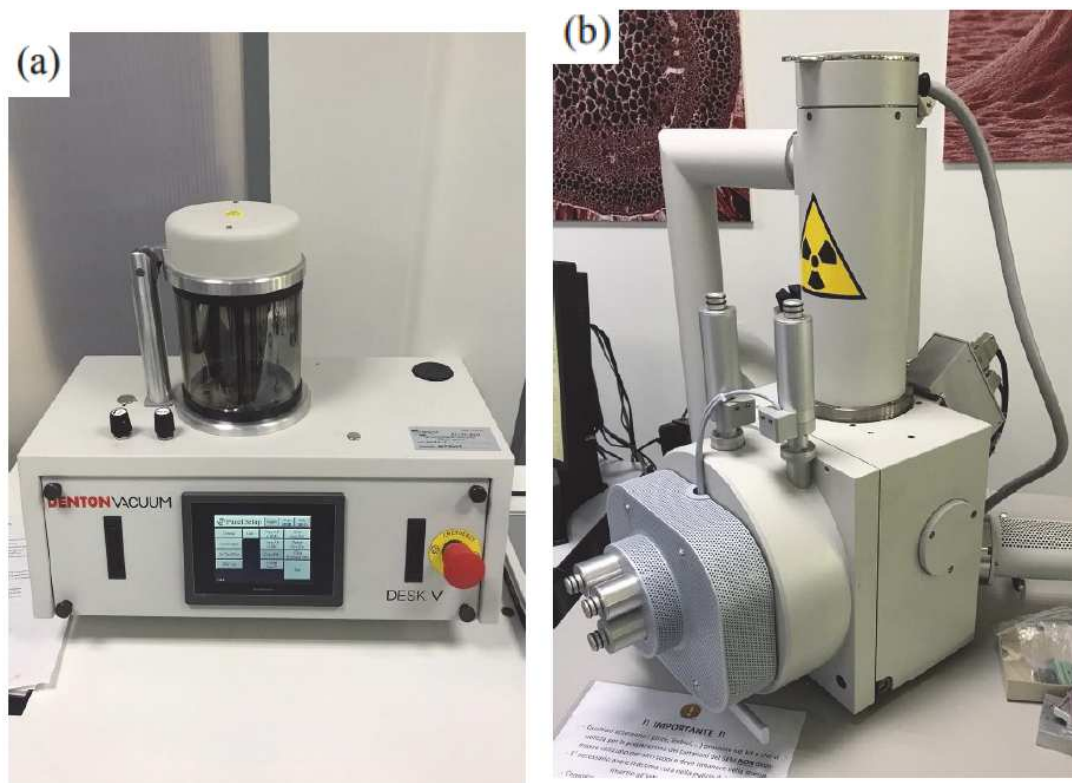


Figura 3.15: a) Macchinario Denton Vacuum Desk V HP per il rivestimento e b) un immagine del SEM

Il microscopio per poter acquisire le immagini deve operare in condizioni di vuoto (pressioni inferiori a 10^{-3} Pa) in modo tale da ridurre la dispersione degli elettroni del fascio. Il campione deve poi poter scaricare le cariche a terra, evitando in questo modo l'accumulo di cariche che renderebbe impossibile l'acquisizione. Quando si ha a che fare con campioni non conduttivi (come nel nostro caso), si possono preparare i provini tramite una procedura di

rivestimento degli stessi tramite un deposito di un sottile strato di oro-palladio, in modo tale da renderne possibile l'analisi al SEM. Questa operazione è stata eseguita da un macchinario presente nel laboratorio (*Denton Vacuum Desk VHP*).

L'obiettivo delle analisi è quello di analizzare i meccanismi di rottura ed eventualmente confrontarli con quelli riscontrati nel lavoro di Ricotta [et al.][6]. In figura 3.16 vediamo le immagini SEM riportate in [6]. Come riscontrato in [6] anche in questi provini si notano; *pull-out* delle fibre (le fibre vengono "tirate fuori" dalla matrice, *crazing* diffuso (sono incrinature che si generano sulla superficie del materiale sotto forma di piccole crepe) nella matrice nel piano perpendicolare a quello di carico, vicino alla fine della fibra, *debonding* (ossia distacco dell'interfaccia fibre-matrice), *fibrillation* (ossia forte deformazione della matrice) e rottura di più fibre (figure 3.17, 3.18).

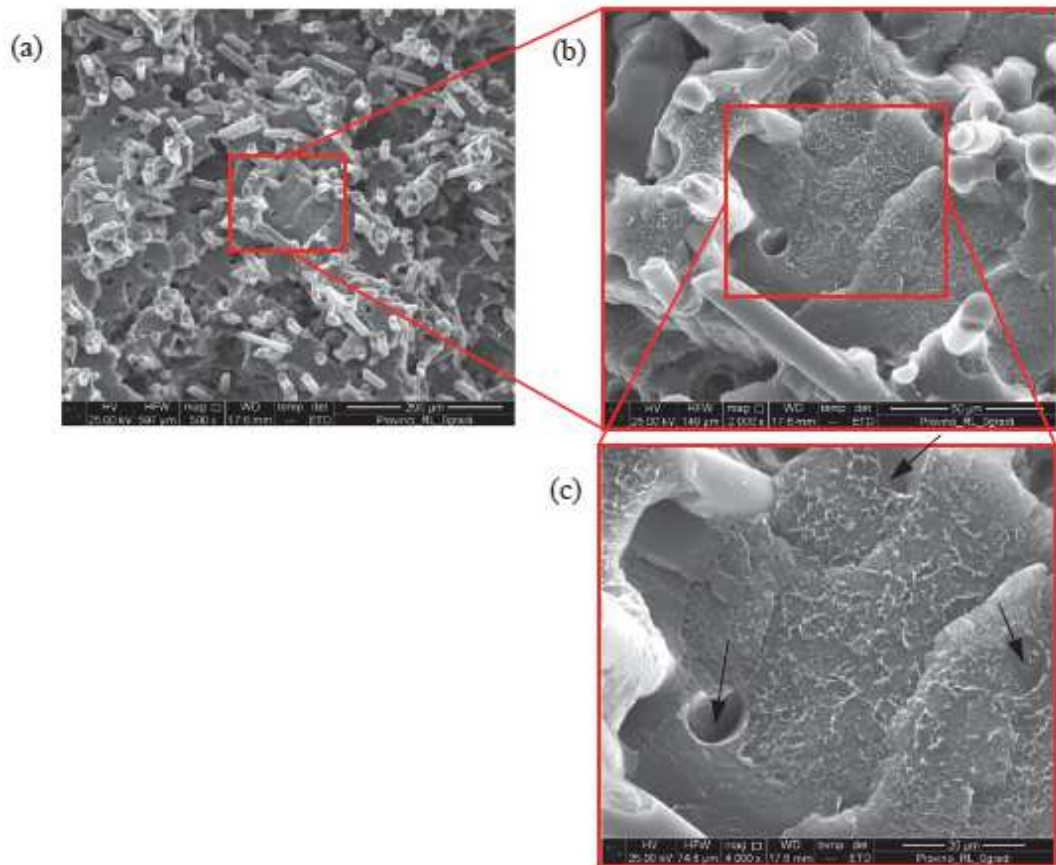


Figura 3.16: Superficie di frattura osservata nei provini testati staticamente in [6]

Come riportato in [6] i meccanismi di frattura dei provini lisci sono gli stessi che si notano nei provini intagliati, nonostante la diversa geometria e raggio di curvatura dell'intaglio.

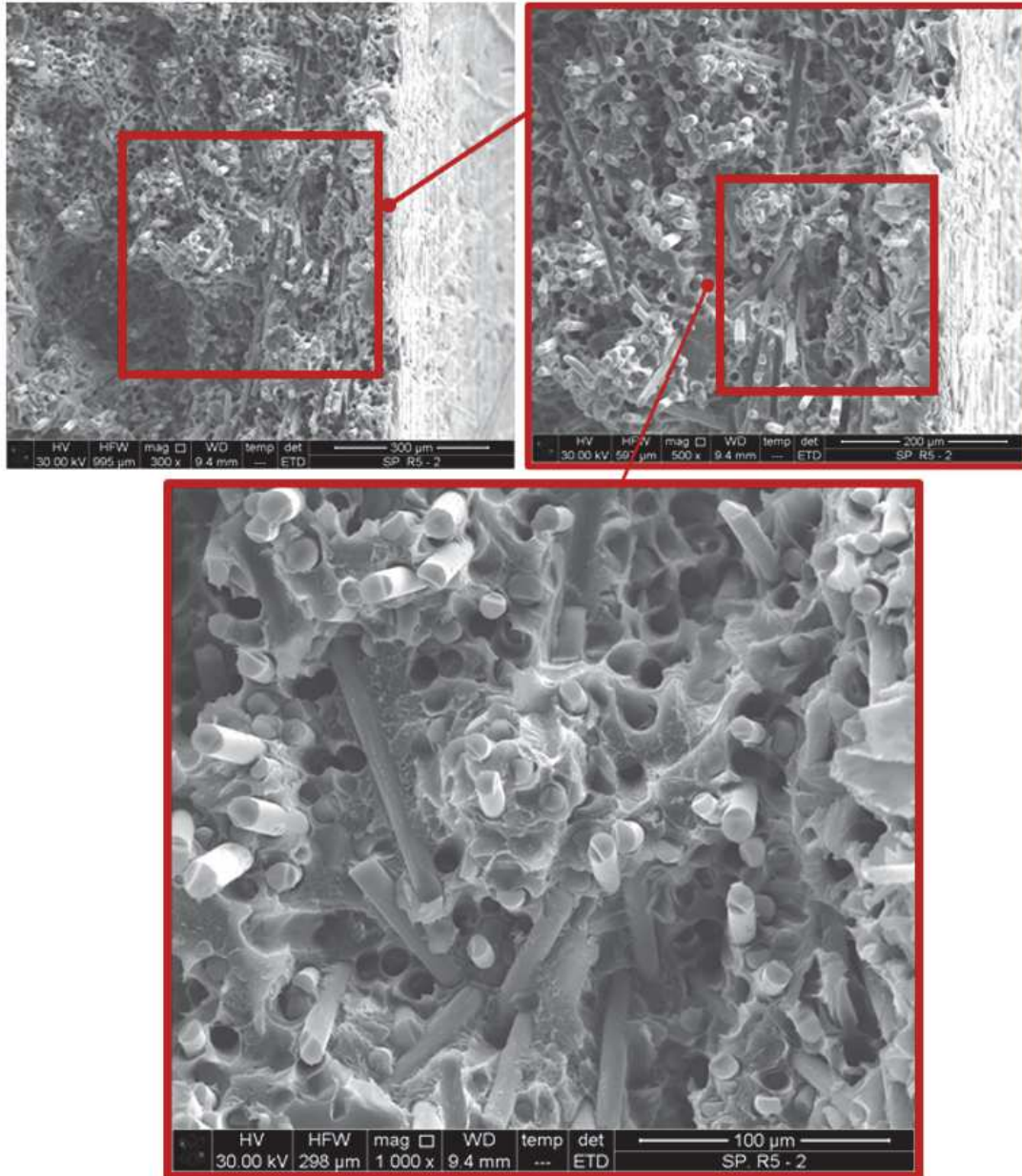


Figura 3.17: Superficie di frattura osservata nei provini testati staticamente nel presente lavoro

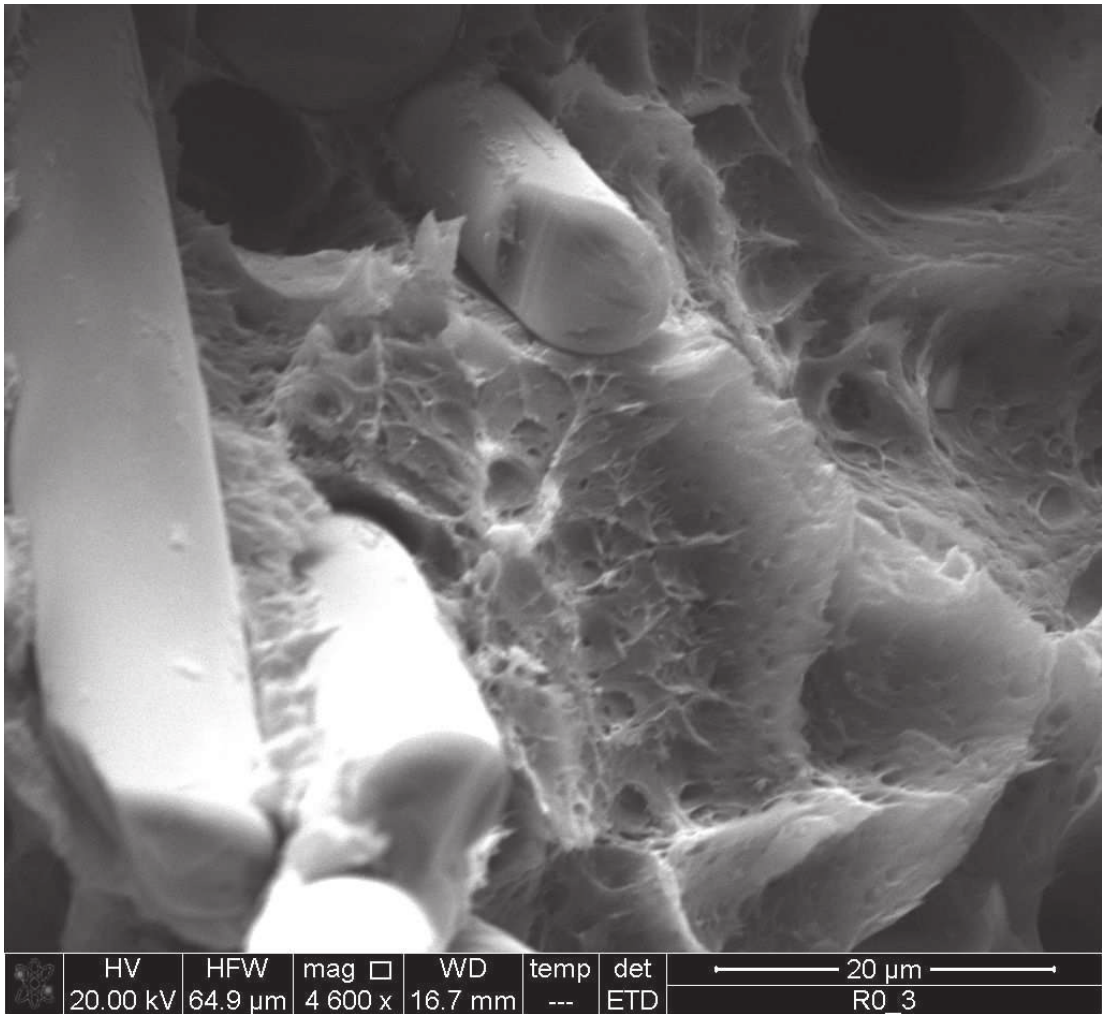


Figura 3.18: Superficie di frattura osservata nei provini testati staticamente: in questa immagine ingrandita si può notare la deformazione della matrice

3.6 ANALISI DEI RISULTATI E CONFRONTO CON I RISULTATI DEI PROVINI FRESATI

In figura 3.19 vediamo le curve Forza-spostamento dei provini intagliati testati in [6] mentre nella tabella 3.21 ne vediamo sintetizzati i dati delle prove in termini di tensione netta. Nella figura 3.20 invece vediamo un grafico che mostra l'andamento della $\sigma_{n,UTS}$ al variare di K_{tn} ricavati da un'analisi agli elementi finiti lineare elastica [6]. Dal grafico si possono notare le due condizioni limite:

- a sinistra la retta che indica la condizione di piena sensibilità all'intaglio in cui la resistenza statica si ricava dividendo la resistenza del materiale per il fattore di concentrazione delle tensioni, σ_{UTS}/K_{tn}
- a destra la retta orizzontale in cui la resistenza del composito corrisponde a quella del caso di intaglio a V acuto.

I due asintoti sopra evidenziati si incontrano ad un valore di K_{tn} specifico, K_{tn}^* che può essere stimato da:

$$K_{tn}^* = \frac{\sigma_{UTS}}{\sigma_{UTS}^V} \quad (3.2)$$

Dalla figura 3.20 possiamo trarre le seguenti conclusioni [6]:

- maggiore è il raggio di raccordo dell'intaglio maggiore è la tensione netta di rottura del provino
- la resistenza dei provini intagliati è sempre compresa tra la resistenza del materiale liscio, σ_{UTS} e il valore σ_{UTS}/K_{tn} (condizione di piena sensibilità all'intaglio)
- per valori di K_{tn} maggiori di K_{tn}^* i valori sperimentali tendono alla resistenza del provino con intaglio a V acuto

Infine, i dati sperimentali mostrati in figura 3.20 possono essere approssimati utilizzando la *Asymptotic Matching equation* basata sui due asintoti sopra descritti:

$$\sigma_{n,UTS} = \frac{\sigma_{UTS}}{\{[(K_t - 1)^{-m} + (K_{tn}^* - 1)^{-m}]^{-1/m} + 1\}} \quad (3.3)$$

Valori di m compresi tra 1.25 (comportamento fragile) e 3 (comportamento duttile) approssimano bene i risultati sperimentali. In [6] il valore utilizzato è $m = 2$.

In figura 3.22 vengono mostrati i dati sperimentali relativi a [6] rianalizzati in termini del fattore di intensificazione delle tensioni generalizzato (GSIF). In figura non presenti anche i dati relativi a provini con un angolo di orientazione delle fibre di 90. Come si può notare, i dati sperimentali si accordano bene con la previsione analitica.

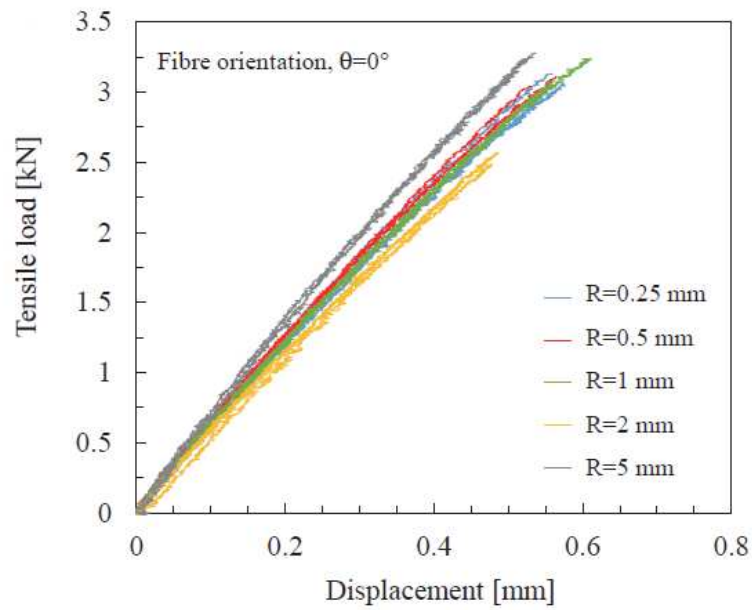


Figura 3.19: Grafico Forza-spostamento dei provini intagliati testati a trazione in [6]

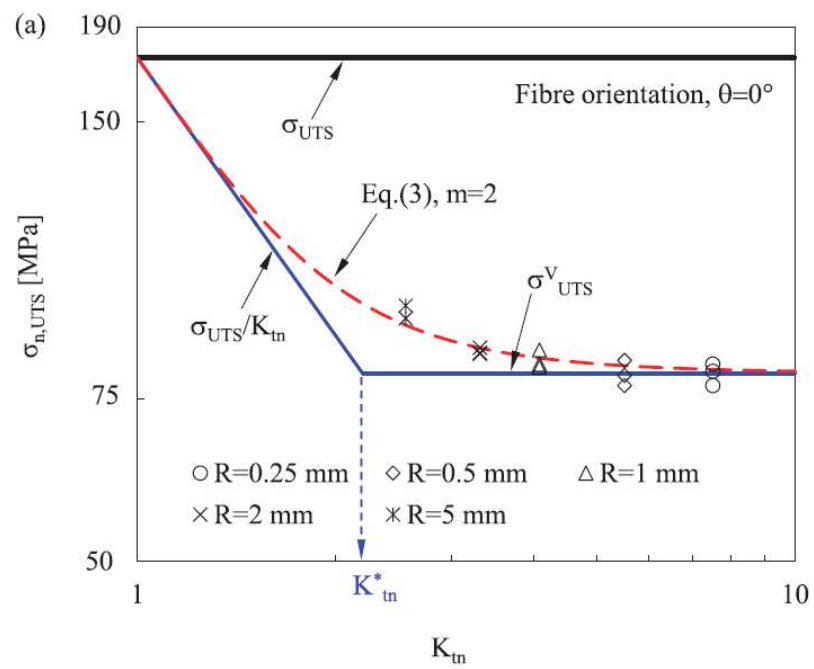


Figura 3.20: Grafico che mostra la tensione netta a rottura al variare di K_{tn} dei provini testati in [6]

Notch geometry	$\sigma_{n,UTS}$ [MPa]	Average value [MPa]	Standard deviation [MPa]
Orientation angle, $\theta = 0^\circ$			
R = 0.25 mm, a = 2 mm	77.56	79.93	2.18
	81.84		
	80.39		
R = 0.5 mm, a = 2 mm	82.58	79.89	2.54
	79.55		
	77.53		
R = 1 mm, a = 2 mm	84.78	82.57	1.94
	81.13		
	81.81		
R = 2 mm, a = 4 mm	84.13	84.42	0.69
	85.22		
	83.93		
R = 5 mm, a = 10 mm	94.71	93.20	2.13
	91.70		
	Orientation angle, $\theta = 90^\circ$		
R = 0.25 mm, a = 2 mm	36.52	35.87	1.65
	33.99		
	37.08		
R = 0.5 mm, a = 2 mm	38.60	40.29	3.28
	44.07		
	38.19		
R = 1 mm, a = 2 mm	42.60	41.50	4.56
	45.41		
	36.49		
R = 2 mm, a = 4 mm	46.17	45.01	1.65
	43.12		
	45.72		
R = 5 mm, a = 10 mm	49.41	48.42	1.40
	47.43		
	54.49		
R = 10 mm, a = 10 mm	54.49	58.00	4.96
	61.50		

Figura 3.21: Tabella riassuntiva dei dati delle prove di trazione [6], a è la profondità dell'intaglio

In tabella 3.9 vediamo confrontati i valori medi della σ_{UTS} dei provini realizzati per fresatura testati in [6] e di quelli iniettati. Come ci si aspettava, le prove sperimentali mostrano la minor resistenza dei provini fresati su quelli iniettati.

Raggio intaglio[mm]	σ_{UTS} Fresati[MPa]	σ_{UTS} Iniettati [MPa]	Differenza[%]
0.2	/	103.43	/
0.25	79.93	/	29.4*
1	82.57	113.5	37.5
5	93.2	107.4	15.2

Tabella 3.9: Tabella comparativa dei dati di σ_{UTS} dei provini fresati [6] e di quelli iniettati

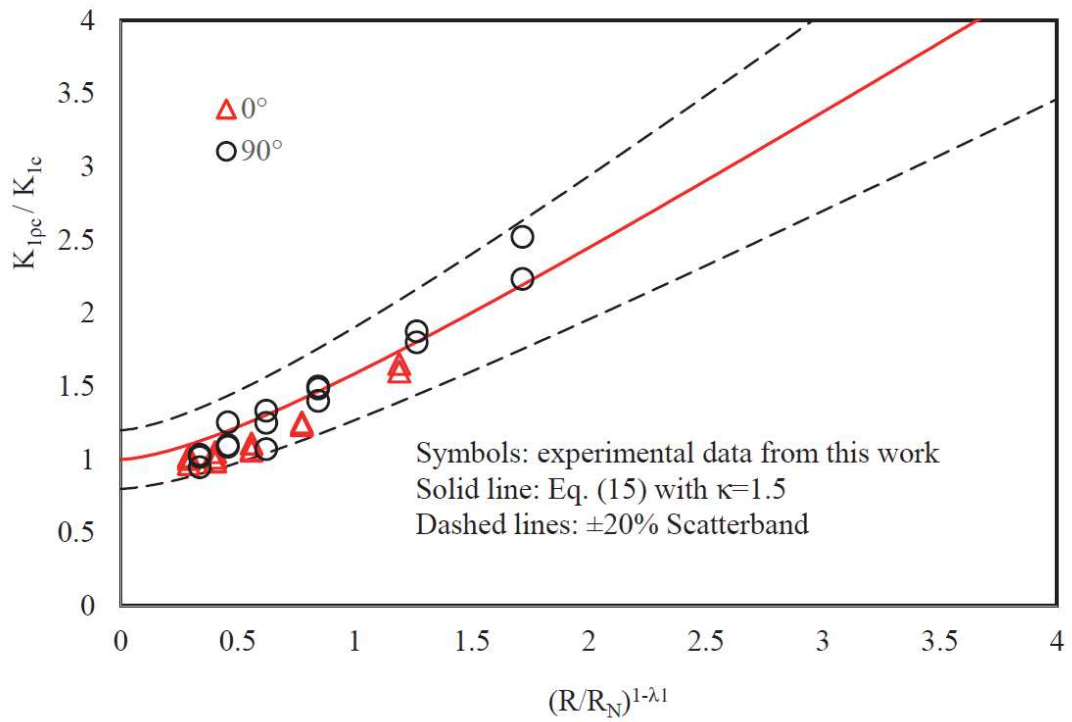


Figura 3.22: dati sperimentali dei provini [6] analizzati in termini di GSIF, in rosso la funzione di equazione ???

4

Caratterizzazione a fatica del materiale

4.1 INTRODUZIONE

Buona parte dei problemi di resistenza dei materiali non comprende né semplici casi statici o alternati ma riguarda fluttuazioni di tensioni che sono una combinazione di entrambi.

Una variazione ciclica di tensione, avente una componente di massima tensione σ_{max} e una componente minima di tensione σ_{min} , è caratterizzata da una componente di ampiezza di tensione definita come:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (4.1)$$

e una componente media di tensione definita come:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (4.2)$$

Con R rapporto di ciclo

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4.3)$$

Generalmente la caratterizzazione a fatica di un materiale convenzionale da costruzione, come l'acciaio, avviene applicando una fluttuazione ciclica di tensione avente un rapporto ciclico $R = -1$, a cui corrisponde una tensione media $\sigma = 0$ MPa. Questo viene fatto perché il materiale è isotropo e simmetrico. Invece un materiale ortotropo, come il PPS-GF40, non ha un comportamento simmetrico (a trazione e a compressione), dunque lavorare con un

rapporto ciclo $R = -1$ implica introdurre all'interno del materiale due tipi di danneggiamento. Dato che la fatica è un fenomeno statistico sarebbe difficoltoso capire quale dei due meccanismi sia stato dominante nel cedimento del provino, perciò è stato deciso di eseguire le prove a fatica mantenendo un rapporto ciclo $R = 0.05$ in modo tale che il materiale sia soggetto ad una sollecitazione ciclica di trazione.

4.2 APPARATO SPERIMENTALE

l'apparato sperimentale è lo stesso descritto nelle prove statiche (vedi paragrafo 3.1). A differenza di quanto fatto nei test statici dei provini lisci, per le prove a fatica non è stato utilizzato l'estensometro, perchè non è stato necessario monitorare le deformazioni durante la prova.

4.3 PROVE A FATICA SUI PROVINI LISCI

Per prima cosa è stato necessario verificare che il materiale testato sia lo stesso utilizzato nella tesi di Rocchi[7]. Perciò, sono state eseguite delle prove di fatica su provini lisci, che però non sono stati sagomati a forma di osso di cane.

Nella tabella 4.1 possiamo visualizzare i dati sperimentali relativi ai provini lisci e nella figura 4.1 possiamo confrontarli con i quelli utilizzati da Rocchi[7]. Il valore di tensione al 50% di probabilità di sopravvivenza a 1 milione di cicli è rispettivamente di $33MPa$ per i provini Rocchi [7] e $44MPa$ per i provini testati. La resistenza degli ultimi è superiore del 14% circa. Questo probabilmente perchè i provini lisci di Rocchi [7] erano stati sagomati ad osso di cane, e il campo di tensione era leggermente alterato dalla variazione geometrica introdotta, il che comporta una resistenza a fatica inferiore. La pendenza inversa invece risulta essere $K = 15$ per i provini Rocchi [7] e $K = 19.3$ per gli ultimi testati. Questa differenza nel valore della pendenza può essere causato da una carenza di dati sperimentali (solo 3 nell'ultimo caso) che non ha permesso neanche il calcolo delle curve al 90% e 10% di probabilità di sopravvivenza.

Provino	Larghezza[mm]	Spessore[mm]	R	f [Hz]	$\sigma_{max,net}$	σ_a	N_R [Cicli]
LP_1	20.44	1.85	0.05	8	80	39.1	1045051
LP_2	20.51	1.87	0.05	5	110	54.0	1827
LP_3	20.57	1.86	0.05	7	90	44.0	60719

Tabella 4.1: Risultati sperimentali delle prove a fatica sui provini lisci

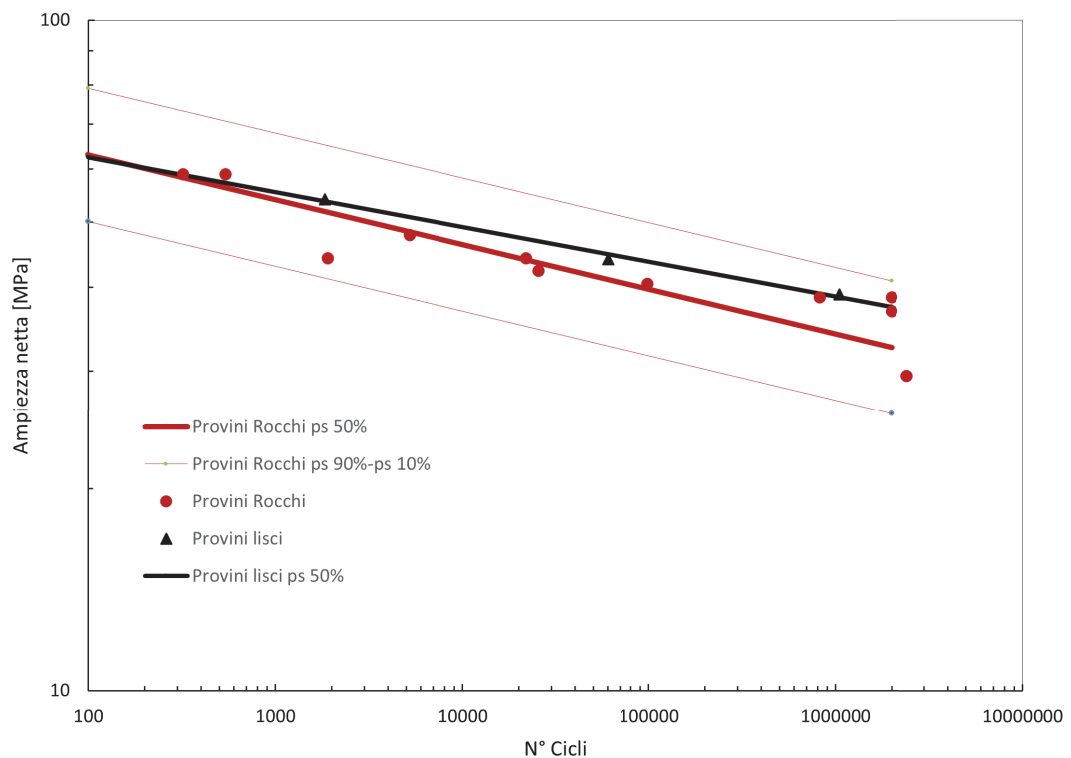


Figura 4.1: Grafico *stress-life* dei provini lisci testati, confrontati con quelli Rocchi [7]

4.4 PROVE A FATICA SU PROVINI INTAGLIATI

In figura 4.2 vengono mostrate le tre geometrie testate con le relative quote nominali. Prima di poter montare i provini in macchina è stato necessario eseguire le misure delle caratteristiche geometriche di tutti i provini che sono stati utilizzati nelle prove. Lo spessore è stato misurato per mezzo di un calibro analogico mentre la profondità dell'intaglio a e il raggio di raccordo R sono stati misurati per mezzo di un microscopio digitale. La larghezza della sezione netta è stata ricavata a posteriori sottraendo alla larghezza lorda la profondità degli intagli. È stata ricavata la larghezza netta del provino poiché è stato deciso di eseguire la caratterizzazione a fatica in presenza di intagli ragionando sulla base dell'ampiezza di tensione netta che viene applicata durante le prove a fatica.

I livelli di carico sono stati scelti in modo tale da avere dei punti sperimentali più o meno equamente distribuiti nell'intervallo da 0 a 2 milioni di cicli di vita. Tuttavia non conoscendo

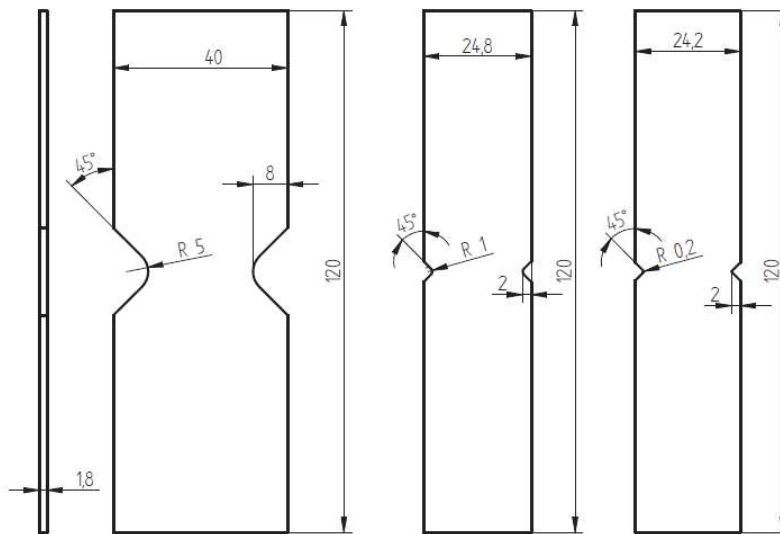


Figura 4.2: Geometrie utilizzate per la caratterizzazione a fatica di provini intagliati

a priori la resistenza a fatica, si è partiti da livelli di carico simili a quelli utilizzati nella Tesi Rocchi [7] aspettandosi però una maggiore resistenza rispetto a tali provini (come spiegato nel paragrafo [?]) Una volta eseguiti tutti i test sui provini di una stessa geometria (in questo caso sono stati testati per primi provini aventi raggio 1mm), si è ipotizzato di scegliere un livello di carico per le geometrie successive (i provini raggio 5mm ad esempio) pari al rapporto tra le tensioni di rottura dei provini di geometrie diverse realizzati per fresatura (ad esempio, il rapporto tra la tensione di rottura raggio 5mm e raggio 1mm) moltiplicato per il valore di tensione sperimentale dei provini raggio 1mm (ottenuti per stampaggio ad iniezione) appena ricavati. In questo modo, si è cercato, in maniera approssimativa, di avere dei dati sperimentali i cui cicli a rottura siano simili ai valori ottenuti nei provini Rocchi [7] (sia per avere, come già detto, una equa distribuzione nell'intervallo $0 - 2$ milioni di cicli, sia per rendere più facile un confronto tra le diverse tipologie di provini)

La scelta della frequenza di prova è importante, perché tanto è maggiore, quanto minori sono i tempi di esecuzione delle prove. Tuttavia quando si testano materiali compositi a matrice polimerica, la frequenza di prova può influire negativamente sui risultati sperimentali. Infatti il materiale ad ogni ciclo di carico e scarico compie un ciclo d'isteresi. L'area racchiusa da tale ciclo, rappresenta l'energia assorbita per unità di volume da parte del materiale. Una quota parte di questa energia viene utilizzata per danneggiare il materiale mentre un'altra parte viene trasformata in calore. Questo viene chiamato *self-heating* poiché il materiale au-

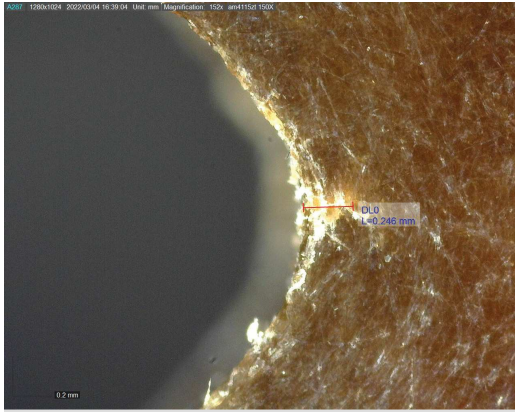


Figura 4.3: Cricca osservata al microscopio digitale sul provino *R1_11_fat* nel lato frontale a 671981 cicli

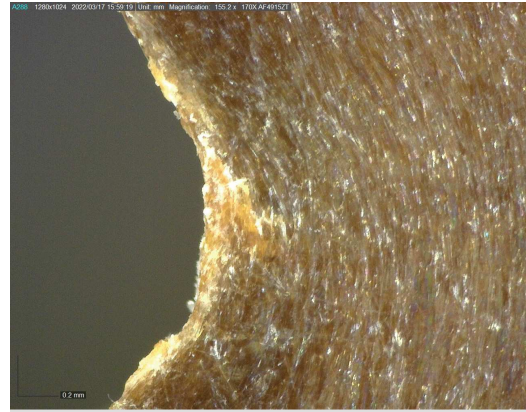


Figura 4.4: Cricca osservata al microscopio digitale sul provino *R1_11_fat* nel retro a 680000 cicli

menta la propria temperatura senza che vi siano sorgenti di calore esterne. Il riscaldamento infatti comporta una riduzione del modulo elastico del materiale, con un conseguente aumento della deformazione raggiunta nel ciclo. L'area racchiusa dal ciclo d'isteresi quindi aumenta e di conseguenza aumenta anche l'energia assorbita per unito di volume. Quanto più alta è la frequenza di carico tanto maggiore sarà la quantità di energia che verrà degradata in calore portando quindi il provino al cedimento per cause termiche e non meccaniche. Il cedimento termico dovrà quindi essere evitato, impostando una frequenza di prova tale che permetta alla convezione naturale operata dall'ambiente esterno di smaltire il calore prodotto, avendo come risultato una temperatura del provino non eccessivamente alta. Per trovare la frequenza più opportuna si è proceduto per tentativi; si è partiti da frequenze basse ($1-2\text{ Hz}$) per poi aumentarla gradualmente avendo cura di controllare la temperatura del provino toccandolo con le dita (temperatura che indicativamente non deve essere più alta della temperatura corporea).

L'osservazione della cricca è stata eseguita da solo uno dei due lati. Solo l'ultimo provino testato (*R1_11_fat*) è stato osservato da entrambi i lati ed è stata riscontrata la cricca in un lato a 671981 cicli (figura 4.3), nell'altro lato a 680000 (figura 4.4) la rottura è avvenuta a 690002 cicli. Si ipotizza per cui che la cricca sia ragionevolmente visibile da entrambi i lati o che ad ogni modo se inizia a criccare da un lato, poi, dopo un numero di cicli basso rispetto ai cicli a rottura, la cricca compaia anche dall'altro lato. Tuttavia dato che è stato osservato un solo provino in questo modo, la questione rimane aperta e da approfondire.

4.5 RISULTATI PROVE SPERIMENTALI

In tabella 4.2 vediamo mostrate le misure caratteristiche dei provini testati. In particolare è stato utilizzato il calibro digitale per misurare lo spessore e la larghezza lorda e il microscopio digitale per misurare la profondità intaglio e il raggio di raccordo.

In tabella 4.3 vediamo riassunti i dati sperimentali. Nelle figure 4.5, 4.6 e 4.7, vengono rappresentati graficamente i dati sperimentali per ciascuna geometria, mostrando le curve di approssimazione al 50%, 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza sia ad innesco che a rottura.

Provino	<i>Lato destro</i>		<i>Lato sinistro</i>		$W_g[mm]$	$t[mm]$	$A_n[mm^2]$
	$a[mm]$	$\rho[mm]$	$a[mm]$	$\rho[mm]$			
<i>R0_1_fat</i>	1.98	0.17	1.96	0.18	23.75	1.8	35.67
<i>R0_2_fat</i>	2.04	0.16	1.93	0.23	23.8	1.8	35.7
<i>R0_3_fat</i>	2.04	0.19	2	0.19	23.87	1.8	35.69
<i>R0_4_fat</i>	2	0.18	2.05	0.2	23.98	1.83	36.49
<i>R0_5_fat</i>	1.99	0.14	1.99	0.18	23.9	1.8	35.84
<i>R0_7_fat</i>	1.96	0.22	1.88	0.2	23.71	1.83	36.36
<i>R1_1_fat</i>	2.10	0.97	2.02	1.02	24.8	1.85	38.27
<i>R1_2_fat</i>	1.93	0.99	1.94	0.92	24.6	1.85	38.35
<i>R1_3_fat</i>	1.94	1.04	1.93	1.01	24.55	1.85	38.26
<i>R1_4_fat</i>	2.08	1	2.01	0.97	24.8	1.85	38.31
<i>R1_5_fat</i>	2.05	1.03	1.96	0.94	24.75	1.85	38.39
<i>R1_6_fat</i>	1.93	0.98	1.94	0.9	24.6	1.85	38.35
<i>R1_7_fat</i>	2.05	0.93	1.99	0.98	24.9	1.84	38.34
<i>R1_8_fat</i>	1.99	1.02	1.98	1	24.72	1.84	38.17
<i>R1_10_fat</i>	2.03	0.9	2.05	0.91	24.75	1.85	38.25
<i>R1_11_fat</i>	1.92	0.88	2.05	0.99	24.7	1.84	38.16
<i>R5_1_fat</i>	8.84	8.84	8.39	8.39	40.15	1.85	42.42
<i>R5_2_fat</i>	8.67	8.67	8.46	8.46	39.7	1.85	41.76
<i>R5_3_fat</i>	8.54	8.54	8.31	8.31	39.6	1.85	42.08
<i>R5_4_fat</i>	7.95	7.95	7.76	7.76	39.54	1.8	42.88
<i>R5_5_fat</i>	8.05	8.05	7.92	7.92	39.6	1.83	43.24
<i>R5_6_fat</i>	7.99	7.99	7.9	7.9	39.63	1.83	43.44
<i>R5_8_fat</i>	8.03	8.03	7.94	7.94	39.55	1.84	43.39
<i>R5_9_fat</i>	7.99	7.99	8.08	8.08	39.97	1.84	43.98
<i>R5_11_fat</i>	7.94	7.94	7.99	7.99	39.93	1.84	44.15
<i>R5_12_fat</i>	8.01	8.01	7.96	7.96	39.93	1.84	44.08

Tabella 4.2: Misure geometriche dei provini testati a fatica

Provino	R	f [Hz]	$\sigma_{a,n}$ [MPa]	a_i [mm]	N_i	N_R	$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	Run out
<i>R0_1_fat</i>	0.05	6	28	0.26	2000	23624	8.5	/
<i>R0_2_fat</i>	0.05	8	25	0.11	20000	96414	20.7	/
<i>R0_3_fat</i>	0.05	8	25	0.27	20000	79479	25.2	/
<i>R0_4_fat</i>	0.05	8	23.5	0.39	130000	211016	61.6	/
<i>R0_5_fat</i>	0.05	12	22	0.19	100000	565976	17.7	/
<i>R0_7_fat</i>	0.05	12	22	0.3	250000	1383040	18.1	/
<i>R1_1_fat</i>	0.05	6	22	/	/	/	/	2400000
<i>R1_2_fat</i>	0.05	10	19	/	/	/	/	4299144
<i>R1_3_fat</i>	0.05	2	44	/	758*	758	100	/
<i>R1_4_fat</i>	0.05	2	33	0.39	4000	6108	65.5	/
<i>R1_5_fat</i>	0.05	5	28	0.23	30000	37272	80.5	/
<i>R1_6_fat</i>	0.05	10	25	0.77	1650000	1678792	98.3	/
<i>R1_7_fat</i>	0.05	8	25	/	76805*	76805	100	/
<i>R1_8_fat</i>	0.05	8	25	0.2	375000	401224	93.5	/
<i>R1_10_fat</i>	0.05	8	25	/	37720*	37720	100	/
<i>R1_11_fat</i>	0.05	8	25	0.25	671981	690002	97.4	/
<i>R5_1_fat</i>	0.05	10	29.6	/	670924*	670924	100	/
<i>R5_2_fat</i>	0.05	3	36.9	0.39	2000	5823	34.3	/
<i>R5_3_fat</i>	0.05	7	31.3	/	73639*	73639	100	/
<i>R5_4_fat</i>	0.05	10	25.5	/	/	/	/	2995656
<i>R5_5_fat</i>	0.05	5	29	/	35027*	35027	100	/
<i>R5_6_fat</i>	0.05	3	29	/	88587*	88587	100	/
<i>R5_8_fat</i>	0.05	3	29.6	0.3	40000	91582	43.7	/
<i>R5_9_fat</i>	0.05	10	29.6	0.27	40000	113446	35.3	/
<i>R5_11_fat</i>	0.05	8	20	/	/	/	/	2521621
<i>R5_12_fat</i>	0.05	5	26	/	934726*	934726	100	/

Tabella 4.3: Risultati sperimentali prove a fatica

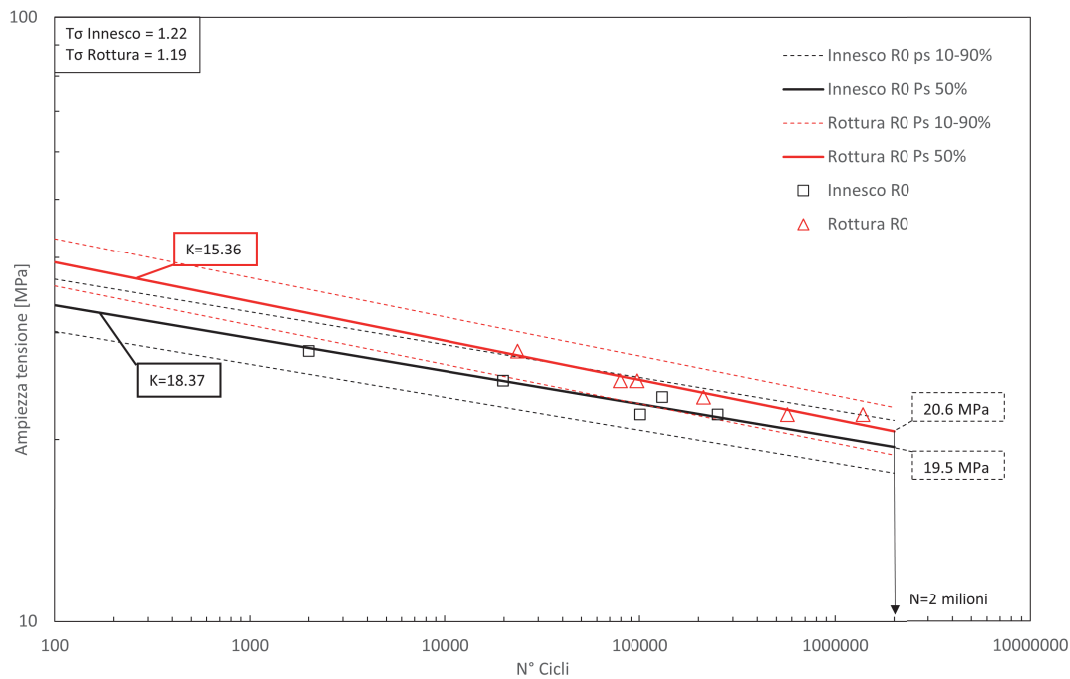


Figura 4.5: Curve Stress-life dei provini $r = 0.2 \text{ mm}$ testati

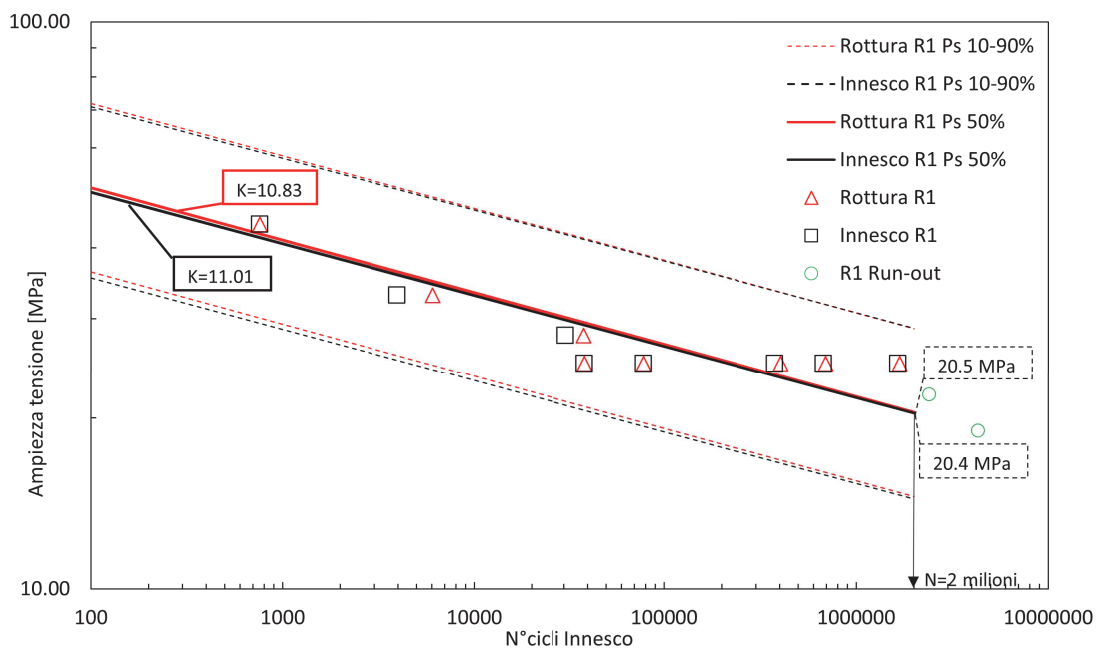


Figura 4.6: Curve Stress-life dei provini $r = 1 \text{ mm}$ testati

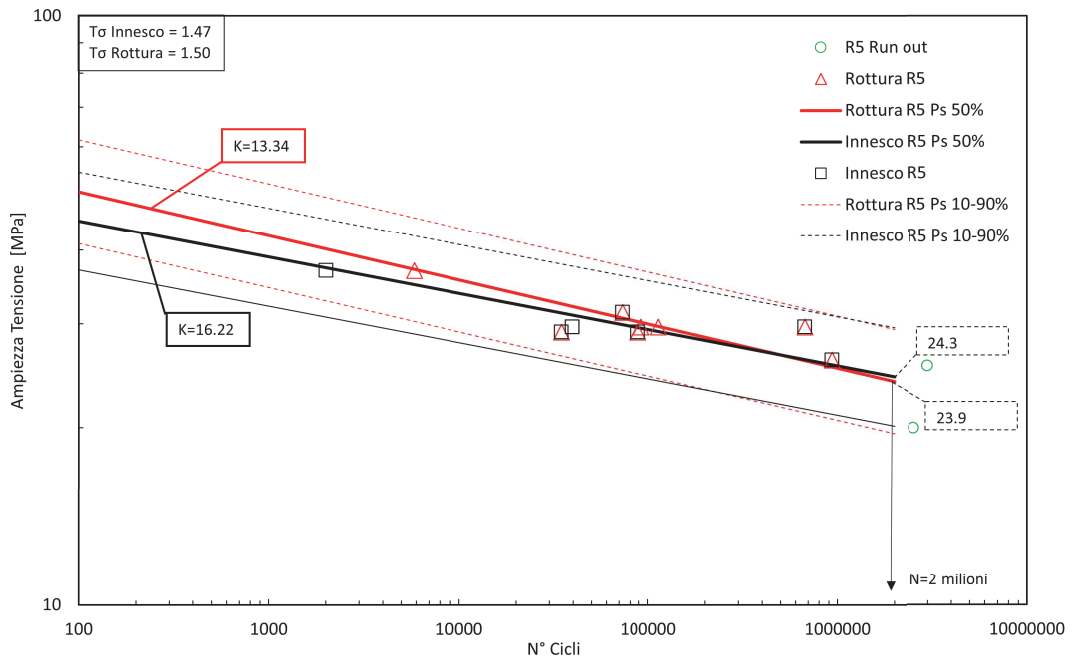


Figura 4.7: Curve Stress-life dei provini $r = 5 \text{ mm}$ testati

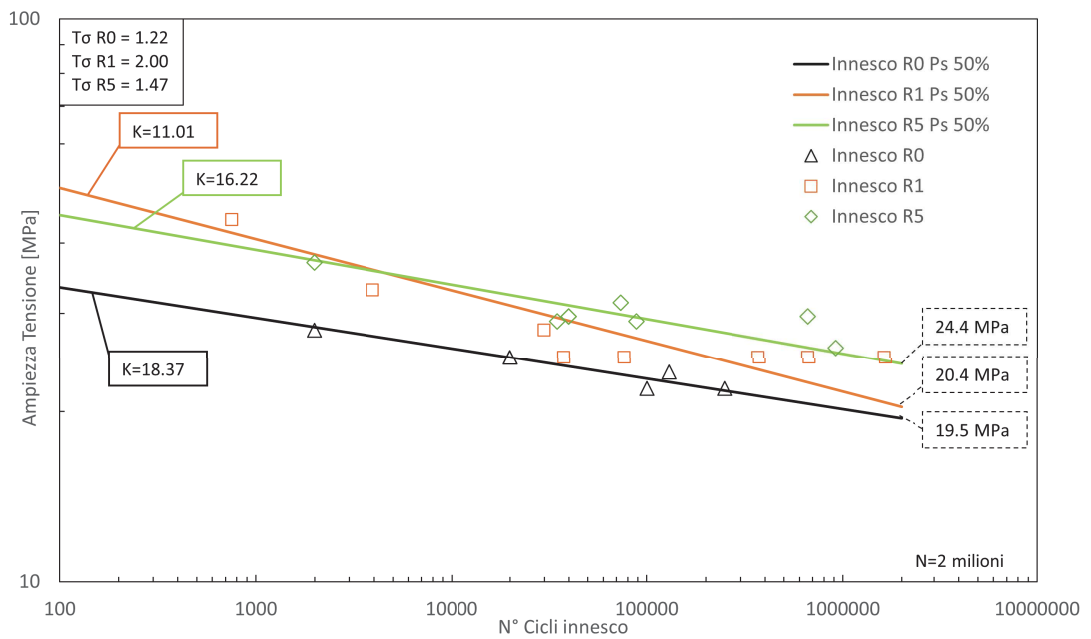


Figura 4.8: Curve inneschi per le tre geometrie testate

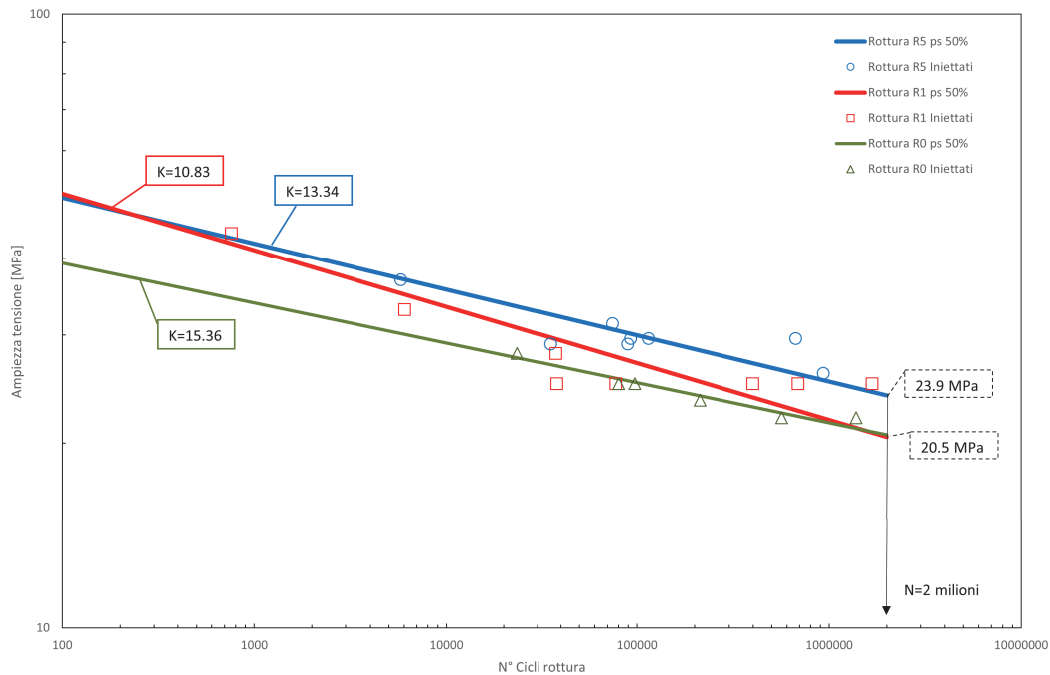


Figura 4.9: Curve di rottura per le tre geometrie testate

I provini $R = 0.2 \text{ mm}$ (figura 4.5) hanno sempre mostrato un chiaro innesco, ossia tutti i provini testati hanno evidenziato un innesco ad una percentuale inferiore del 26% (a parte il provino $R0_4_fat$ con un $N_i/N_R = 61.6\%$). La pendenza delle rette innesco e rottura è abbastanza simile. Ciò vuol dire che N_i/N_R è pressoché costante al variare di N . Anche la dispersione dei risultati è buona. Per questa geometria non sono state eseguite delle prove con $N > 2 \text{ milioni}$ (*run-out*).

I provini $R = 1 \text{ mm}$ (figura 4.6), invece hanno mostrato una banda di dispersione piuttosto alta. A tal proposito si segnala che per i provini $R1_7_fat$, $R1_10_fat$ e $R_1_3_fat$ non è stato catturato l'innesco, perchè ci si aspettava una rottura a più alti N , per cui, al fine di costruire la curva, l'innesco è stato posto in coincidenza alla rottura, ma, in questo caso, la curva inneschi risulta falsata perchè è probabile che l'innesco ci sia effettivamente stato, ma non è stato catturato. Si nota poi come innesco e rottura siano quasi coincidenti.

I provini $R = 5 \text{ mm}$ (figura 4.7, hanno una pendenza delle rette innesco e rottura visibilmente diversa. Questo perchè solo alcuni provini a bassi N hanno innescato, e quando la hanno fatto, l'innesco è avvenuto a circa il 30 – 40% della vita a fatica (provini $R5_2_fat$, $R5_8_fat$ e $R5_9_fat$). Per gli altri invece, l'innesco non è stato catturato (anche osservando i provini relativamente pochi cicli prima della rottura), per cui, ai fini della costruzione

della curva fatica, è stato ipotizzato, per questi provini, che l'innesco sia avvenuto in concomitanza della rottura (valori con l'asterisco * in tabella 4.3). Si nota infatti che per alti N le due curve tendono a coincidere, per il motivo spiegato sopra. Rimane dunque aperto il problema di capire meglio come si comporta il materiale (in particolare l'innesco) per questi raggi di raccordo.

In figura 4.8 viene mostrato un grafico riassuntivo delle curve innesco per le tre geometrie testate. Si nota che la curva relativa ai provini con $R = 5 \text{ mm}$ per bassi N è più bassa rispetto alla curva $R = 1 \text{ mm}$. Il modo in cui sono state costruite le curve, e l'incertezza che si ha sulla curva innesco dei provini $R = 5 \text{ mm}$ possono aver causato questo problema.

4.6 CONFRONTO CON PROVINI FRESATI

In tabella 4.4 vediamo riassunti i dati sperimentali dei provini fresati testati in [7]. In figura 4.10 la rappresentazione grafica delle curve innesco degli stessi [7]. Nelle figure 4.11, 4.14, 4.12, 4.15, 4.16 e 4.13 vengono confrontati una ad una per ogni geometria le curve innesco e rottura dei provini fresati [7] e quelle dei provini iniettati.

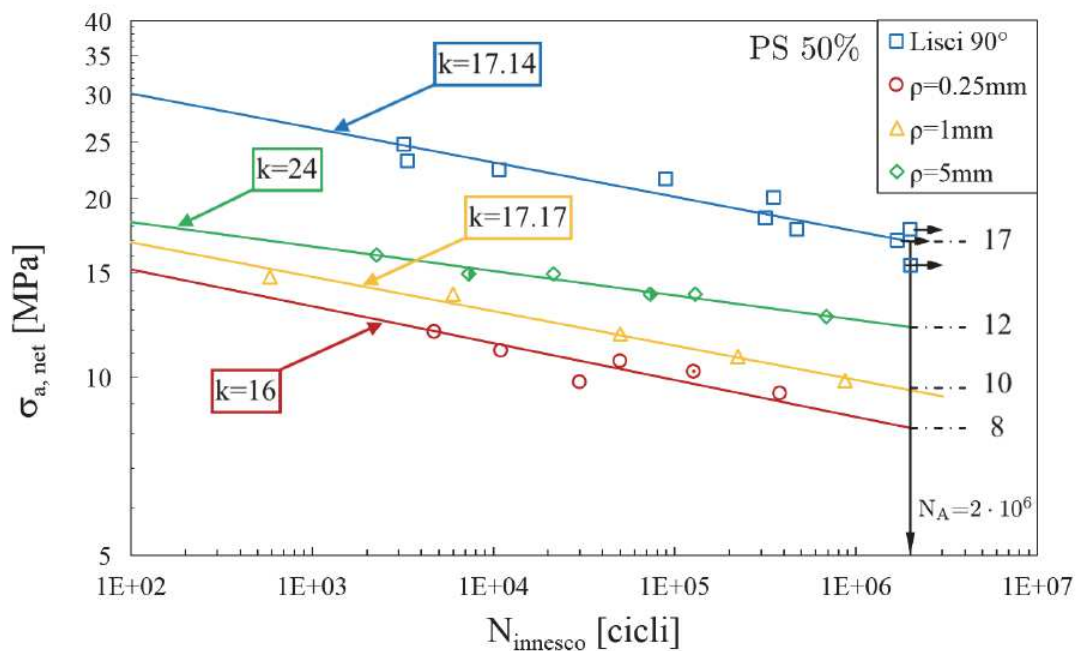


Figura 4.10: Curve Stress-life dei provini fresati Rocchi [7]

Provino	R	f [Hz]	$\sigma_{a,n}$ [MPa]	a_i [mm]	N_i	N_R	$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	Run out
0_R025_3	0.05	10	20.9	0.66	8110	16333	49.7	/
0_R025_4	0.05	15	19.0	0.12	20000	541369	3.7	/
0_R025_5	0.05	15	19.0	0.10	520000	840042	61.9	/
0_R025_6	0.05	15	17.1	/	/	/	/	3400046
0_R025_9	0.05	5	21.8	0.38	2488	14101	17.6	/
0_R025_10	0.05	15	19.9	0.35	24670	70442	35.0	/
0_R1_1	0.05	5	21.6	0.35	37566	52556	71.5	/
0_R1_2	0.05	15	19.6	0.50	800000	881970	90.7	/
0_R1_3	0.05	15	17.6	0.00	/	/	/	2003367
0_R1_4	0.05	15	18.6	0.30	/	/	/	3096925
0_R1_5	0.05	5	23.5	0.36	8510	14078	60.4	/
0_R5_1	0.05	10	22.1	0.95	170000	180639	94.1	/
0_R5_3	0.05	15	19.9	1.00	85000	95000	89.5	/
0_R5_4	0.05	15	17.7	/	/	/	/	2249699
0_R5_5	0.05	15	22.1	0.92	193768	207902	93.2	/
0_R5_6	0.05	15	19.9	0.62	1012311	1061530	95.4	/
0_R5_7	0.05	5	26.6	0.54	13735	20807	66.0	/

Tabella 4.4: Risultati sperimentali delle prove a fatica sui provini intagliati di Rocchi[7]

In figura 4.17 vediamo due istogrammi che mettono a confronto la percentuale di vita a fatica dei provini iniettati e fresati.

Nella tabella 4.5 vediamo sintetizzati i valori di ampiezza di tensione a 2 milioni di cicli dei provini fresati ed iniettati sia ad innesco che a rottura.

	$R0$	$R1$	$R5$
Iniettati σ_a Rottura 2 mln cilcli [MPa]	20.6	20.6	23.4
Fresati σ_a Rottura 2 mln cilcli [MPa]	18.2	18.8	18.5
Differenza %	13.2	9.6	26.5
Iniettati σ_a Innesco 2 mln cilcli [MPa]	19.5	20.4	24.4
Fresati σ_a Innesco 2 mln cilcli [MPa]	16	18	19
Differenza %	21.9	13.3	28.4

Tabella 4.5: Risultati sperimentali delle prove a fatica sui provini intagliati di Rocchi[7]

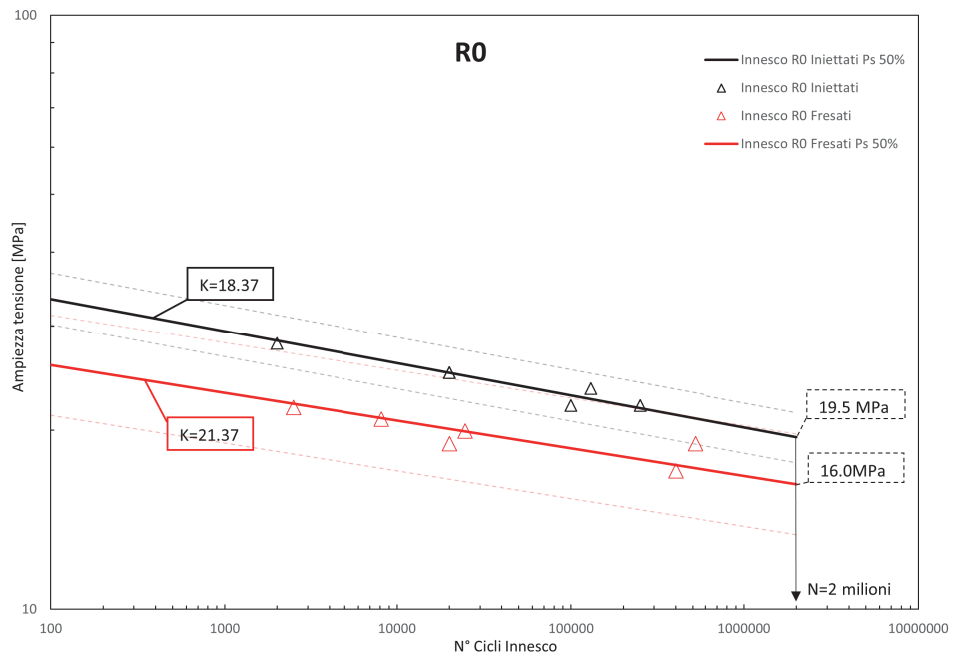


Figura 4.11: Confronto delle curve inneschi fresati e iniettati per i provini con $R = 0.2 \text{ mm}$

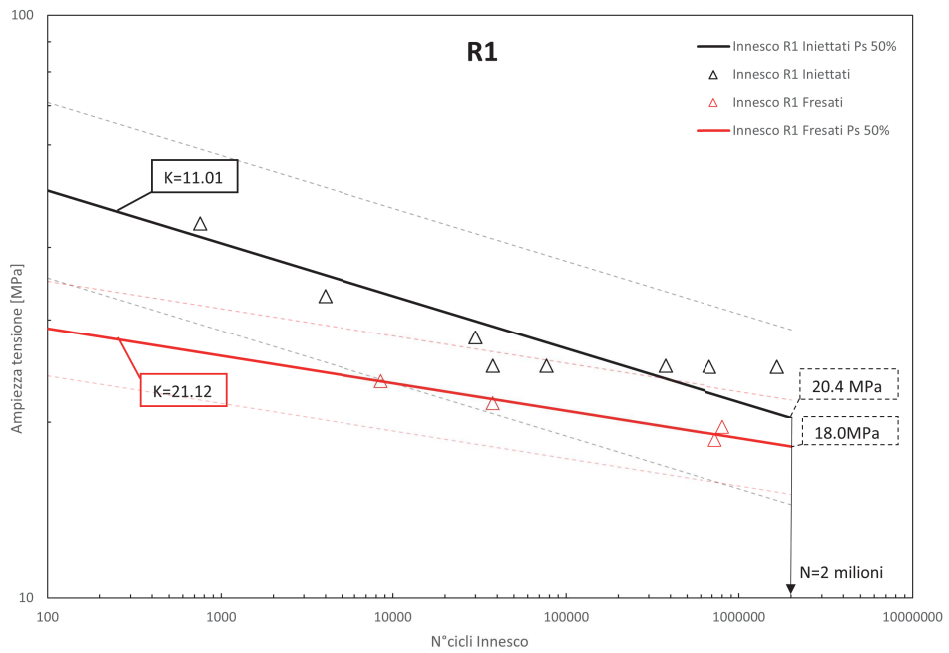


Figura 4.12: Confronto delle curve inneschi fresati e iniettati per i provini con $R = 1 \text{ mm}$

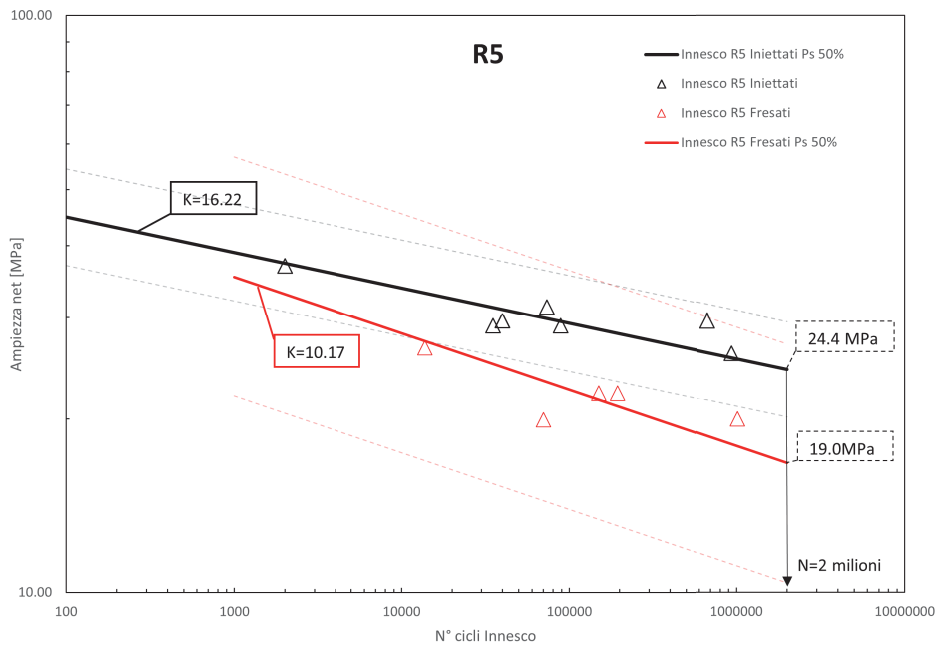


Figura 4.13: Confronto delle curve inneschi fresati e iniettati per i provini con $R = 5 \text{ mm}$

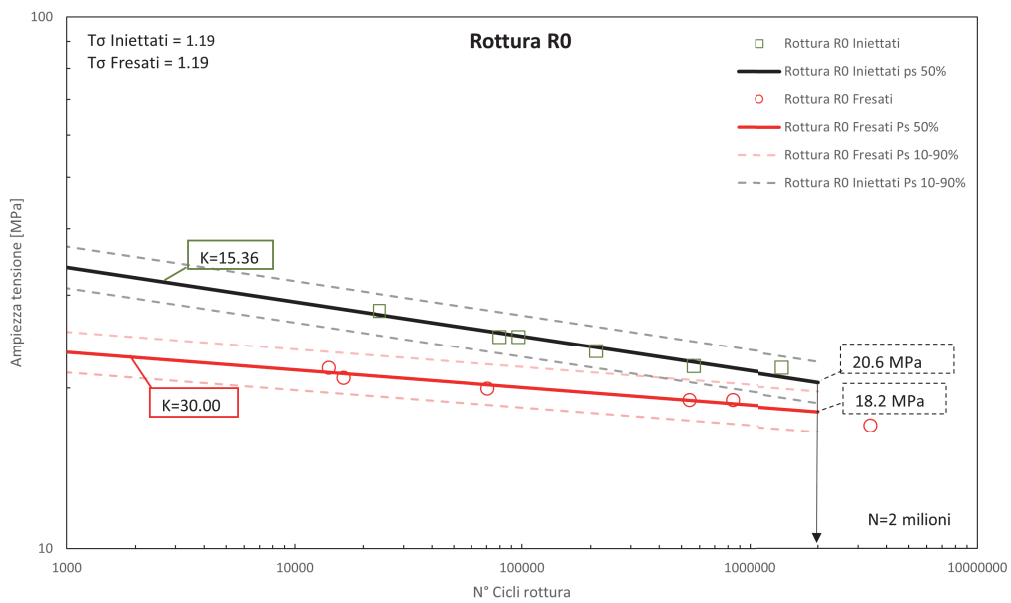


Figura 4.14: Confronto delle curve di rottura fresati e iniettati per i provini con $R = 0.2 \text{ mm}$

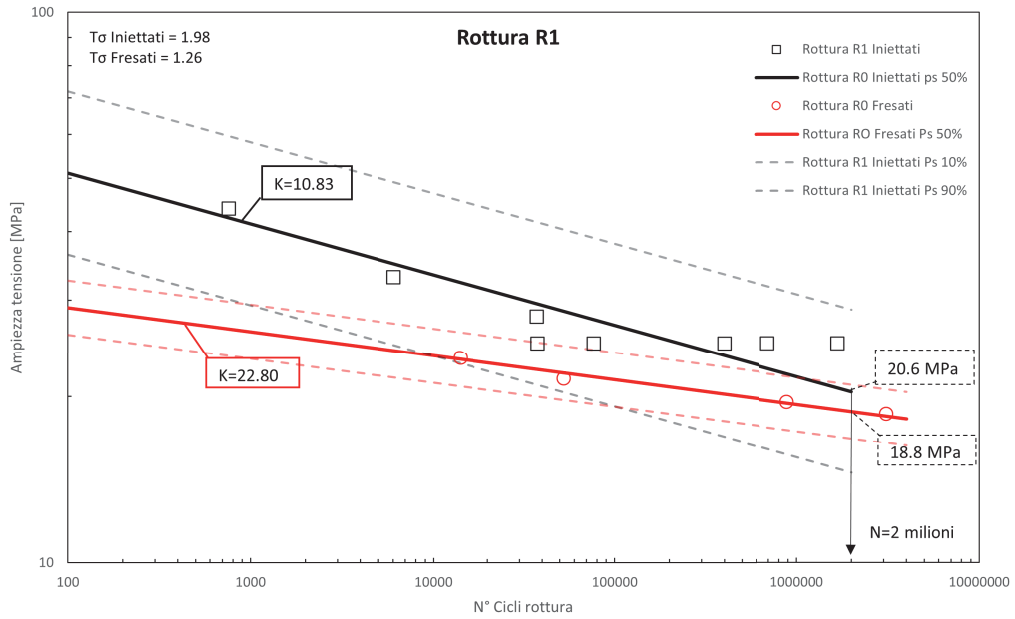


Figura 4.15: Confronto delle curve di rottura fresati e iniettati per i provini con $R = 1 \text{ mm}$

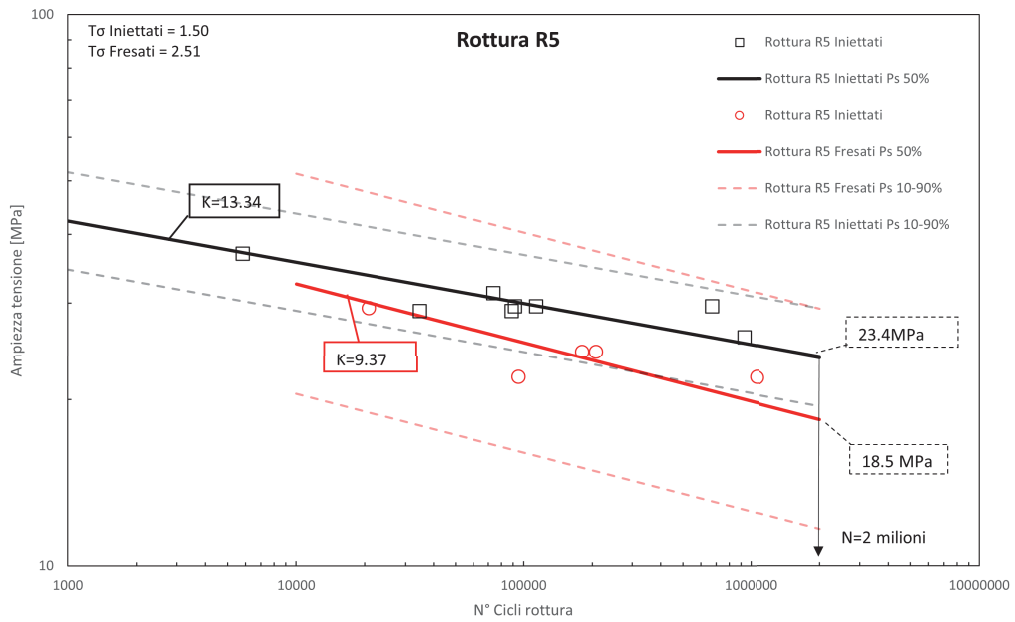


Figura 4.16: Confronto delle curve di rottura fresati e iniettati per i provini con $R = 5 \text{ mm}$

4.7 ANALISI DELLE SUPERFICI DI FRATTURA

In questa sezione, analogamente a quanto fatto per la statica, verranno mostrate le analisi al SEM delle superfici di frattura dei provini testati a fatica con lo scopo di osservarne i mecca-

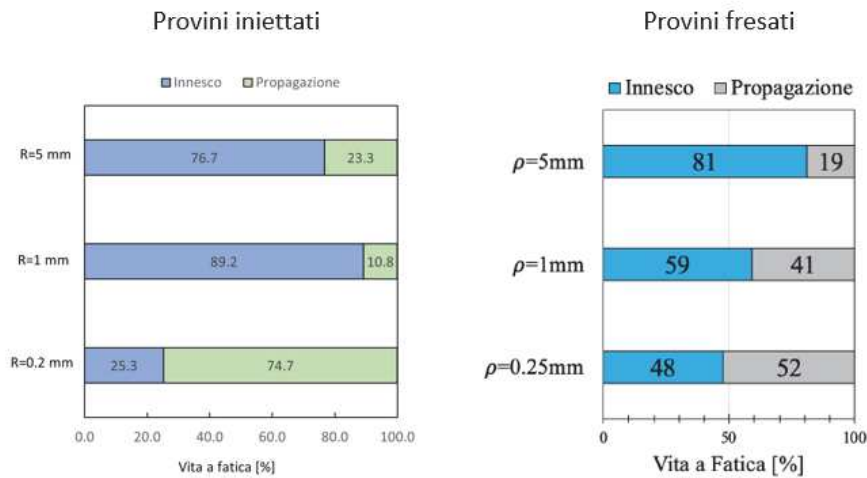


Figura 4.17: Confronto tra percentuale di vita a fatica dei provini iniettati contro fresati

nismi di frattura. La procedura e l'apparato sperimentale sono riportate al paragrafo 3.5.

In figura 4.18 vediamo un'immagine che mostra a vari ingrandimenti la superficie di frattura in corrispondenza dell'apice intaglio. Come si può notare, i meccanismi di frattura sono gli stessi osservati nel caso statico (figura 4.20) (*debonding*, *pull-out* delle fibre e *fib- rillation*). L'unica differenza che si nota è la notevole deformazione della matrice all'apice intaglio rispetto a quello che si osserva nel caso statico (figura 4.20). Ad una certa distanza dall'apice si nota come la superficie di frattura sia molto simile a quanto osservato nel caso statico. Questo perchè ci troviamo (figura 4.19) in una zona in cui la rottura avviene per schianto e la matrice subisce una deformazione meno accentuata.

In figura 4.21 vediamo un'immagine che mostra in maniera abbastanza evidente la transizione tra la superficie di frattura nel caso di propagazione della cricca e nel caso di rottura di schianto.

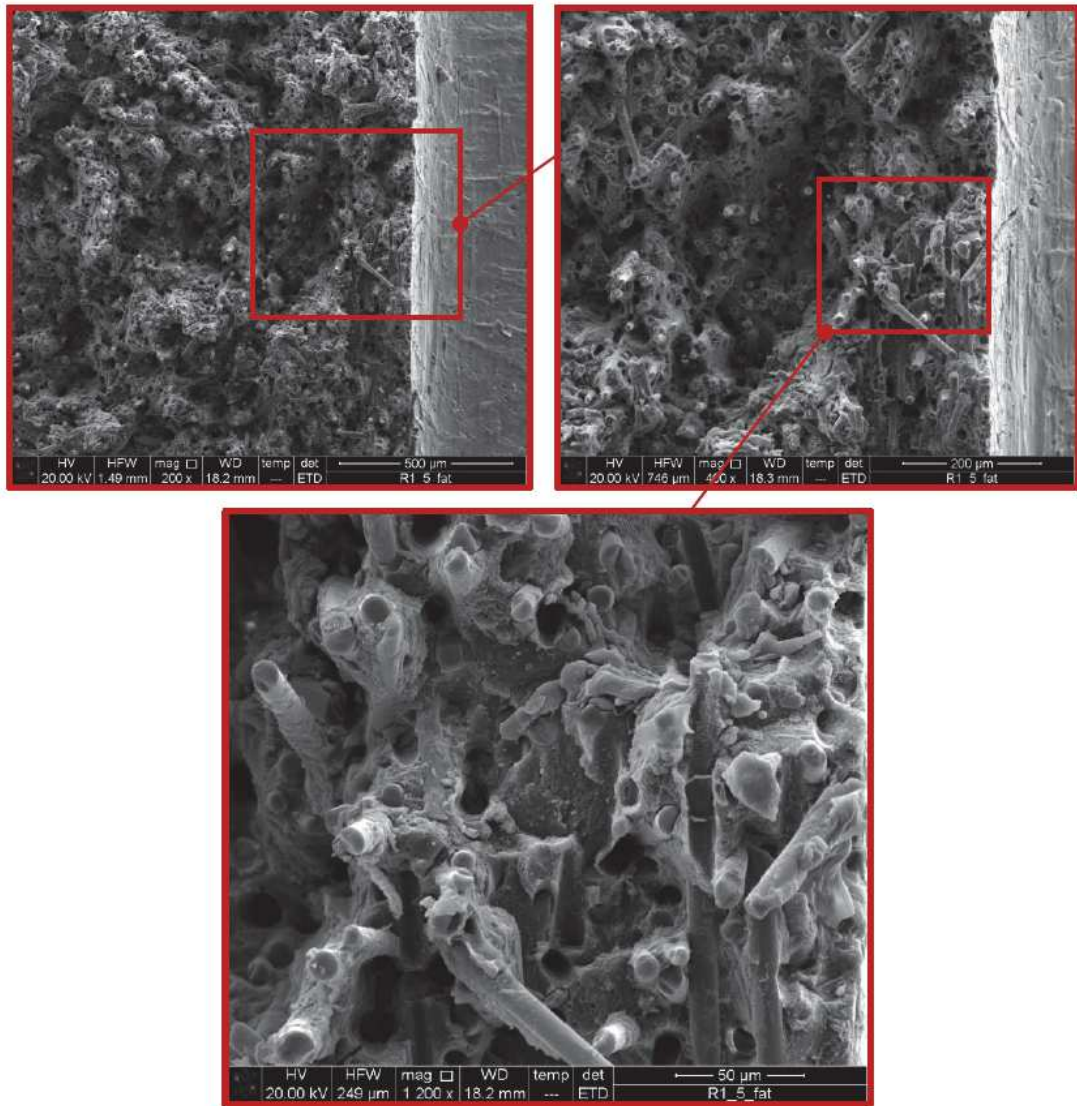


Figura 4.18: Immagini SEM a vari ingrandimenti della superficie di frattura in corrispondenza dell'apice dei provini testati a fatica

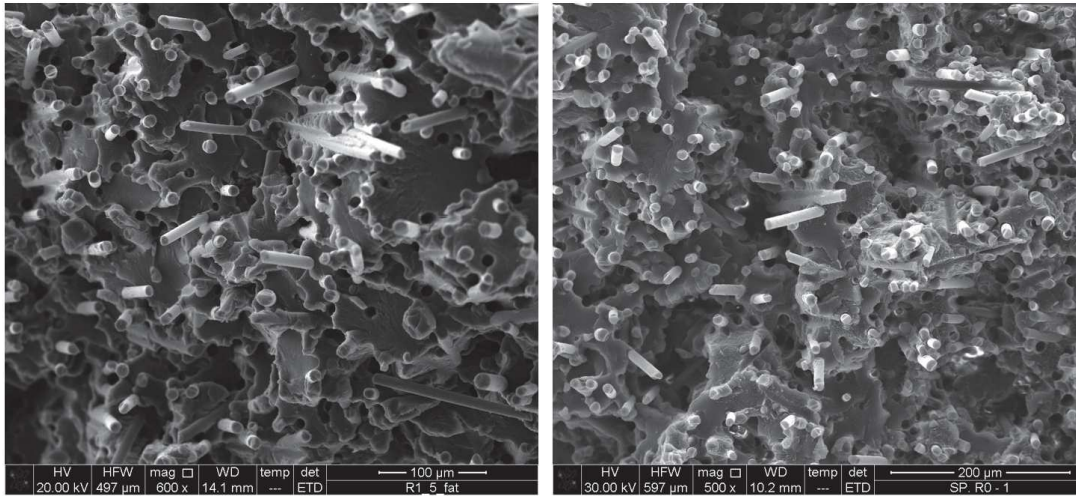


Figura 4.19: A sinistra la superficie di frattura dei provini a fatica nella zona di rottura di schianto, a destra la superficie di frattura dei provini testati staticamente

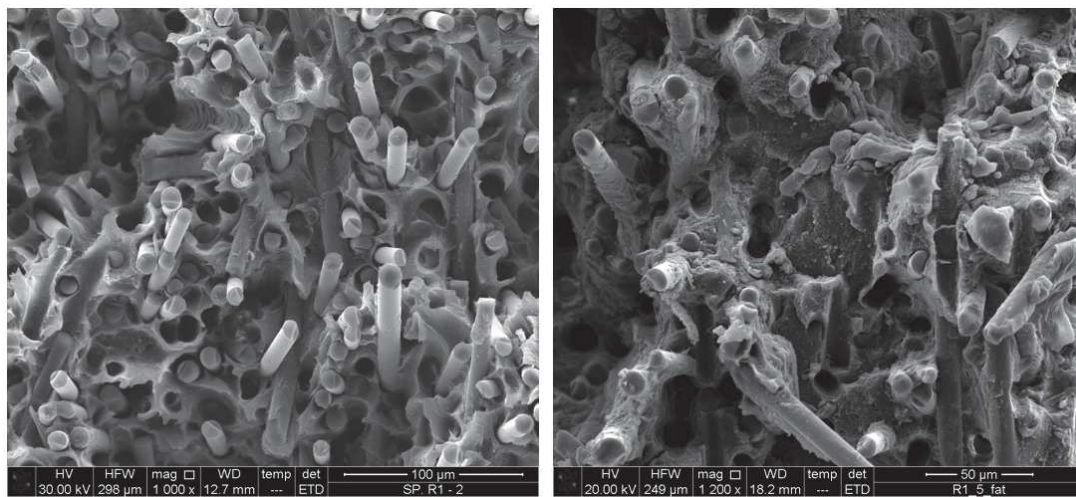


Figura 4.20: A sinistra la superficie di frattura dei provini a fatica all'apice, a destra la superficie di frattura dei provini testati staticamente all'apice

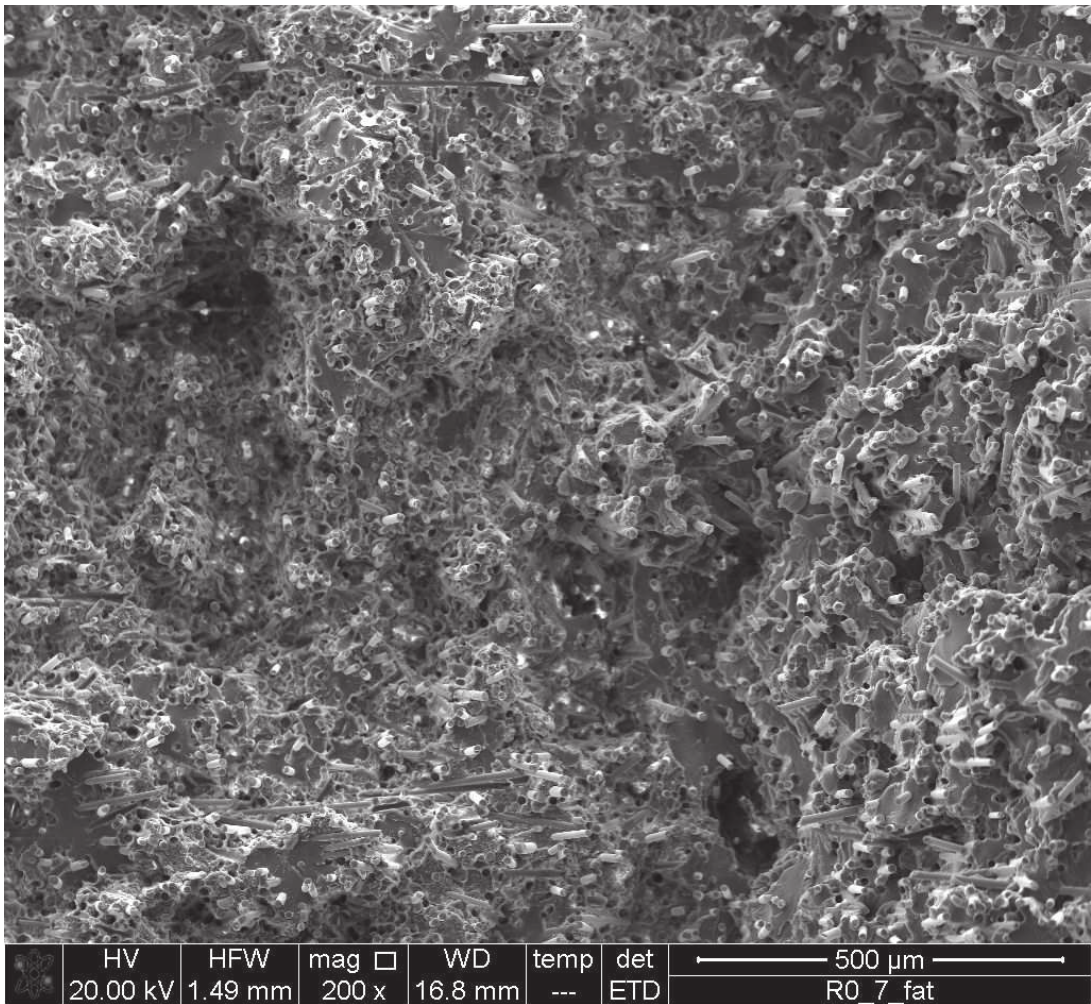


Figura 4.21: Immagine che mostra la zona di transizione tra la rottura di schianto (nella parte destra dell'immagine) e la zona in cui avviene propagazione della cricca (a sinistra dell'immagine)

5

Analisi FEM e analisi dei risultati

In questo capitolo verranno condotte una serie di analisi agli elementi finiti con l'obiettivo finale di ricavare i campi di tensione all'apice dell'intaglio. Le analisi svolte (laddove richiesto) sono state effettuate tramite Heliuss, un programma che consente la risoluzione di modelli strutturali che tengano conto delle proprietà del materiale derivanti dal processo produttivo. In questo lavoro, Heliuss è stato utilizzato per tener conto della proprietà del materiale (in particolare della distribuzione ed orientazione delle fibre) derivanti dal processo produttivo che è stato simulato tramite il software Moldflow. Il modello strutturale invece è stato realizzato in Ansys. Nell'appendice A si trova una guida che spiega i passaggi utilizzati per realizzare le simulazioni con Heliuss. I risultati verranno infine utilizzati nel cap.3 per determinare il valore di K_{Ic} e nel capitolo 4 per il calcolo del SED mediato.

5.1 ANALISI PRELIMINARI

Le prime analisi sono state svolte per verificare le proprietà elastiche del materiale derivante dalla simulazione di processo. E' stato costruito un primo modello Ansys (ne vediamo una schematizzazione nella figura 5.1 a destra) costituito da un rettangolo $10 \times 20 \text{mm}$ avente spessore pari a quello del modello Moldflow (1.8mm) (a sinistra nella figura 5.1), vincolato in una faccia e caricato con 1MPa nella faccia opposta. Tramite Heliuss sono state mappate le proprietà del materiale del modello Moldflow (a sinistra, nella figura 5.1) in corrispondenza della porzione del modello ritagliato (il riquadro rosso a sinistra nella figura rappresenta il

modello Ansys sovrapposto al modello Moldflow)

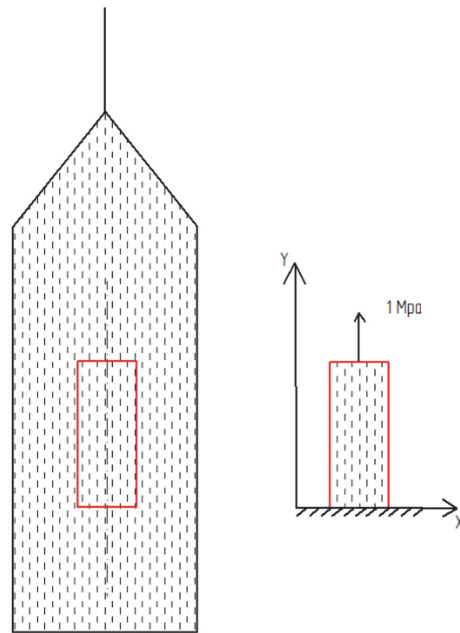


Figura 5.1: Schematizzazione del modello strutturale Ansys (destra) che combina le proprietà del materiale ritagliate nel modello Moldflow (sinistra)

In questa simulazione l'angolo tra la direzione di applicazione del carico e quello delle fibre (rappresentate dalle linee tratteggiate in figura 5.1) è pari a 0° . Sono state realizzate altre due simulazioni in cui l'angolo di orientazione tra la direzione delle fibre e quella di applicazione del carico è di 45° , figura 5.2 e 90° figura 5.3

In queste analisi sono stati utilizzati in Ansys gli elementi *brick* a 8 nodi (*solid 185*), la *mesh* utilizzata non necessita di particolari accorgimenti nell'affinamento dato che il modello è molto semplice e non presenta particolari variazioni geometriche. E' sufficiente che la *mesh* sia più piccola di quella utilizzata nel modello Moldflow di cui al cap. 2.

In tabella 5.1 vediamo riportate le proprietà elastiche ricavate in [6] mentre in tabella 5.4 vediamo i risultati ottenuti nelle simulazioni di cui sopra.

Spessore [mm]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_3 [MPa]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
1.8	14780	7490	7490	0.40	0.40	0.37

Tabella 5.1: Proprietà elastiche del materiale [6]

Come si può notare, i valori ricavati in tabella 5.4 si discostano da quelli ricavati nell'articolo di Ricotta et al. [6]. Perciò si è deciso di inserire delle curve Tensione-deformazione che si

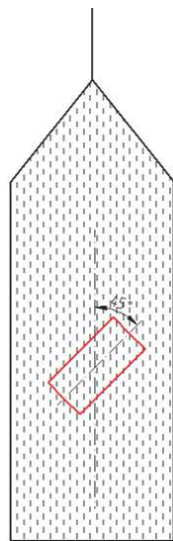


Figura 5.2: Schematizzazione del modello Ansys e del modello Moldflow con angolo di 45° tra direzione fibre e direzione di applicazione del carico

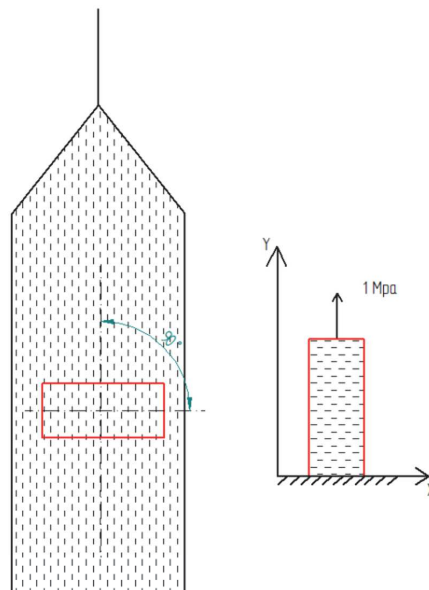


Figura 5.3: Schematizzazione del modello Ansys e del modello Moldflow con angolo di 90° tra direzione fibre e direzione di applicazione del carico

Spessore [mm]	E_0 [MPa]	E_{90} [MPa]	E_{45} [MPa]	ν_{12}
1.8	16400	8607	9269	0.42

Tabella 5.2: Proprietà elastiche ricavate dalle simulazioni

impostano in Helius (per i dettagli sul procedimento vedere appendice A) nel momento in cui si effettua l'analisi, in modo tale da ottenere delle proprietà elastiche (ottenute ripetendo le analisi schematizzate nelle figure 5.1, 5.3 e 5.2) che siano confrontabili con quelle mostrate in tabella 5.1. Le curve Tensione-deformazione da inserire in Helius vengono fornita per coppie di punti. Dato che stiamo operando in ipotesi lineari elastiche (viene applicato 1 MPa di carico e le curve Tensione-deformazione del materiale nel tratto iniziale sono lineari [6]) le coppie di punti sono state ricavate calcolando per valori di tensione che partono da 0 a 35 MPa (ad intervallo di 0.1 MPa da 0 a 15 MPa ed intervallo 0.3 MPa da 15 a 35 MPa) i corrispondenti valori di deformazione ricavati dalla Ramberg-Osgood 5.1.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (5.1)$$

I coefficienti n e K sono stati impostati in modo tale che la curva fosse molto tesa nel tratto

iniziale (approssimativamente una retta). In particolare, è stato usato un valore di $n = 0.179$ e $K = 150$. La curva Ramberg-Osgood è stata utilizzata per generare le coppie di punti, perchè il software (Helius) approssima i valori inseriti in input con tale funzione. Questo procedimento (generazione delle coppie di punti tramite Ramberg-Osgood) è stato ripetuto per ottenere le coppie di punti relative alle curve a 0° , 45° e 90° (inserendo per ciascuna orientazione le corrispondenti proprietà elastiche, n e K invece sono gli stessi). In figura 5.4 vediamo un esempio delle tre curve Ramberg-Osgood utilizzate per generare le coppie di punti tensione-deformazione.

5.1.1 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE DA UTILIZZARE NELLE SIMULAZIONI

Tenendo in mente quanto detto nel paragrafo precedente, sono state eseguite delle analisi (sempre secondo lo schema delle figure 5.1, 5.2 e 5.3) in cui vengono impostati nella Ramberg-Osgood i valori dei moduli elastici di tabella 5.1, sempre con $n = 0.179$ ed $K = 150$. Quello che si ottiene sono dei valori per i moduli elastici confrontabili con quelli della tabella 5.1, ma il modulo di Poisson $\nu_{12} = 0.376$ è ancora non accettabile. Perciò sono state eseguite una serie di analisi (sempre seguendo lo schema delle figure 5.1, 5.2 e 5.3) in cui si va a variare del 10% uno ad uno i moduli elastici. L'obbiettivo è stato quello di ottenere una soluzione di compromesso in cui tutte le proprietà elastiche possono ritenersi accettabili. In tabella 5.3 un riassunto dei tentativi eseguiti e in tabella 5.4 i dati relativi alle proprietà di compromesso scelte per le simulazioni di cui al paragrafo 5.1.1.

	Proprietà da tab.5.1	+10% su E_0	+10% su E_{90}	+10% su E_{45}
ν_{12} risultante	0.376	0.41	0.417	0.375
differenza %	0%	9.04%	10.90%	-0.26%

Tabella 5.3: Tentativi eseguiti per trovare le proprietà elastiche di compromesso

Spessore [mm]	E_0 [MPa]	E_{90} [MPa]	E_{45} [MPa]	ν_{12}
1.8	14780	8700	8090	0.38

Tabella 5.4: Proprietà elastiche di compromesso, scelte per le successive simulazioni

In figura 5.4 vediamo un grafico che mostra le coppie tensione-deformazione utilizzate nelle analisi successive (paragrafo 5.1.1), relative alle proprietà elastiche di tabella 5.4, ricavate con il procedimento spiegato precedentemente (servendosi dell'equazione 5.1). In figura 5.5,

le rette di approssimazione delle coppie delle prime coppie di punti di figura 5.4; le pendenze delle rette sono in accordo con le proprietà elastiche di tabella 5.4.

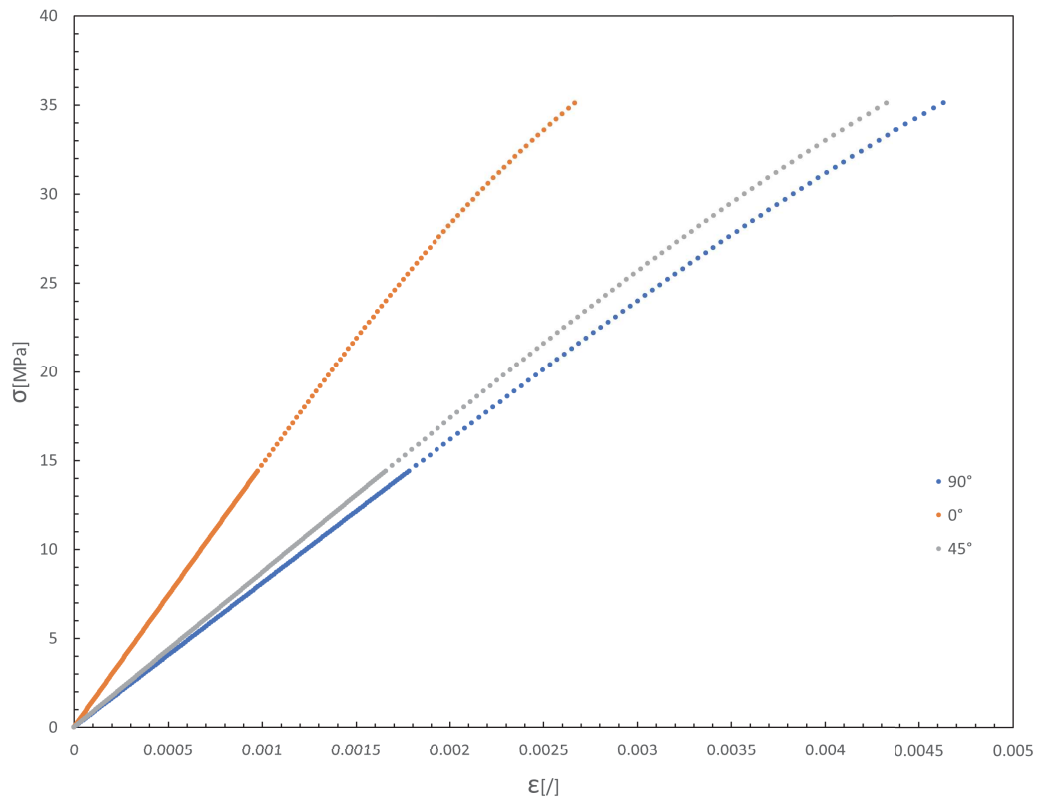


Figura 5.4: Grafico delle coppie di punti tensione-deformazione utilizzate per le analisi, relative alle proprietà di compresso scelte di tabella 5.4

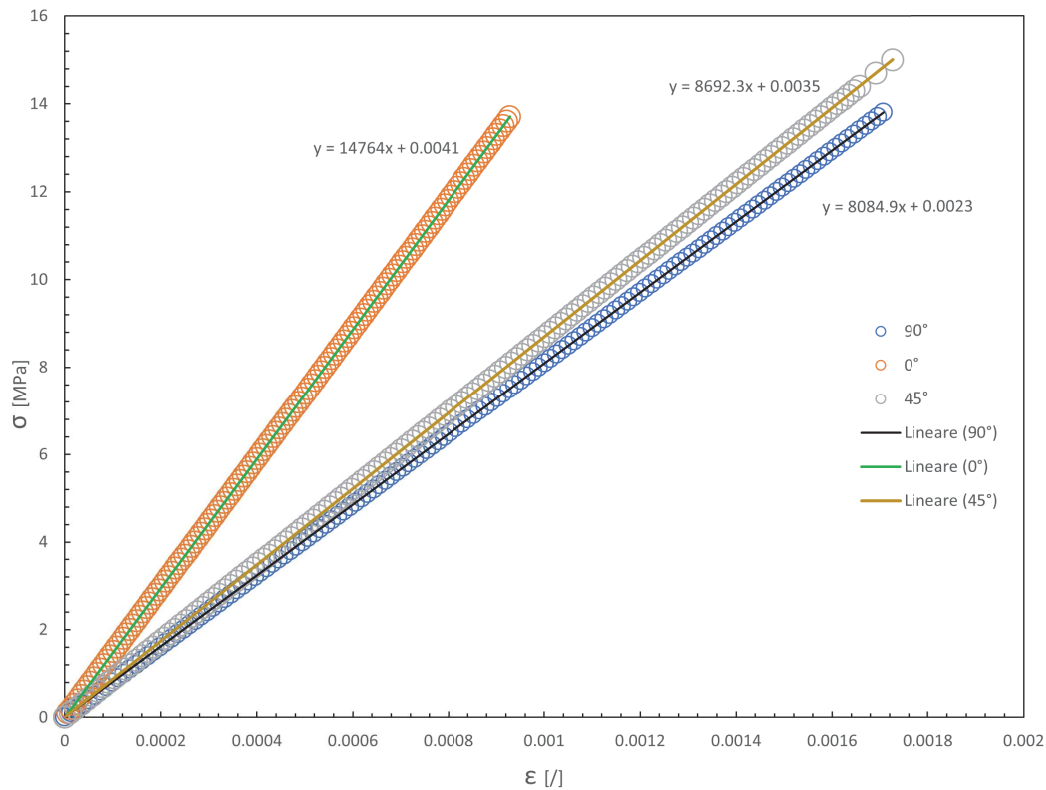


Figura 5.5: Rette di approssimazione per il tratto iniziale dei punti di figura 5.4, la pendenza delle rette (che corrisponde al modulo elastico) è in linea con le proprietà di tabella 5.4

In figura 5.6 vediamo uno schema del modello FEM utilizzato per la determinazione dei campi di tensione all'apice intaglio dei provini. L'area in blu rappresenta le condizioni di vincolo, ossia tutti i nodi di quella superficie sono stati bloccati. L'area in rosso invece rappresenta il carico applicato. In particolare è stato applicato un carico tale per cui la tensione nella sezione netta sia di 1 MPa . Il valore del carico si ottiene facendo un rapporto tra la larghezza lorda e la larghezza netta (vedi geometria provini in figura 4.2). Le aree gialle invece rappresentano le condizioni di *coupling*, ossia tutti i nodi appartenenti a quell'area si muovono tutti della stessa quantità nella sola direzione di applicazione del carico, questo serve per simulare l'afferraggio del provino in macchina.

Nel modelli utilizzati sono state poi sfruttate le simmetrie: nello spessore e nella larghezza. Non è stata sfruttata la simmetria nella lunghezza nonostante geometricamente sia possibile. Infatti osservando i risultati delle analisi sulla morfologia (capitolo 2) si nota come la dis-

tribuzione ed orientazione delle fibre sia approssimativamente simmetrica nello spessore e nella larghezza del provino ma non nella lunghezza; il flusso del materiale quando incontra la strizione della sezione dovuta agli intagli subisce una variazione che causa una diversa distribuzione delle fibre prima e dopo la strizione stessa.

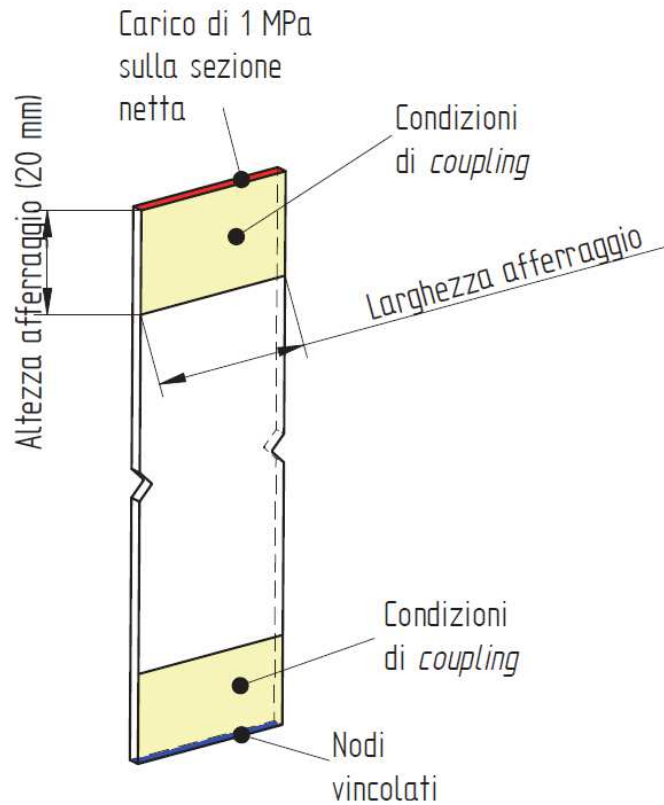


Figura 5.6: Schema del modello FEM dei provini realizzati in Ansys

La mesh è stata creata a partire dalla meshatura del modello piano tramite elementi *plane 182*. E' stato eseguito un affinamento della mesh in vicinanza dell'apice intaglio (figura 5.10). La mesh piana è stata poi estrusa per generare la mesh 3D (figura 5.8). Gli elementi utilizzati sono i *solid 185* e le impostazioni di elemento selezionate sono la *simple enhanced strain*.

5.1.2 STUDIO DELLA CONVERGENZA

Utilizzando la procedura esposta nell'appendice A, utilizzando i dati del materiale di tabella 5.4, sono state eseguite delle simulazioni in cui è stato diminuita progressivamente la dimensione di elemento all'apice intaglio con l'obiettivo di ricavare un modello a convergenza. In

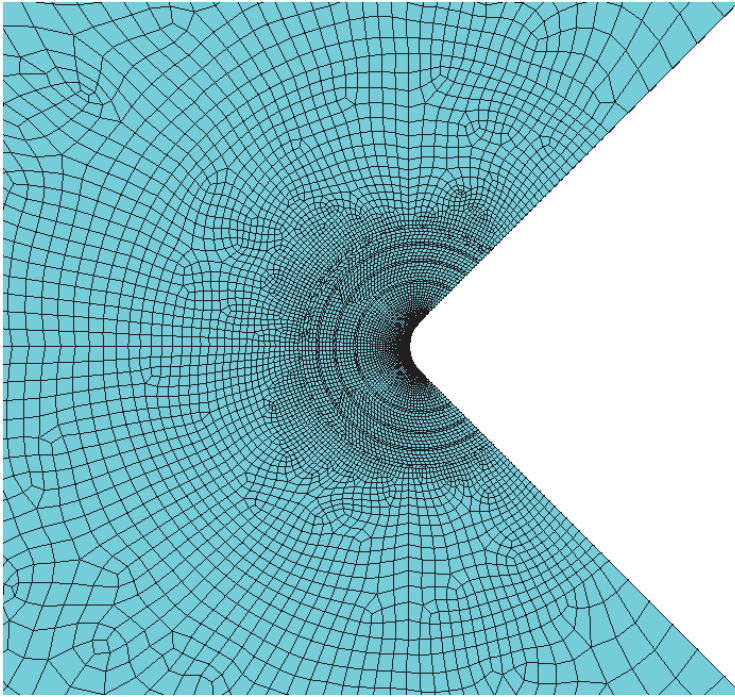


Figura 5.7: Affinamento della mesh in corrispondenza dell'apice intaglio

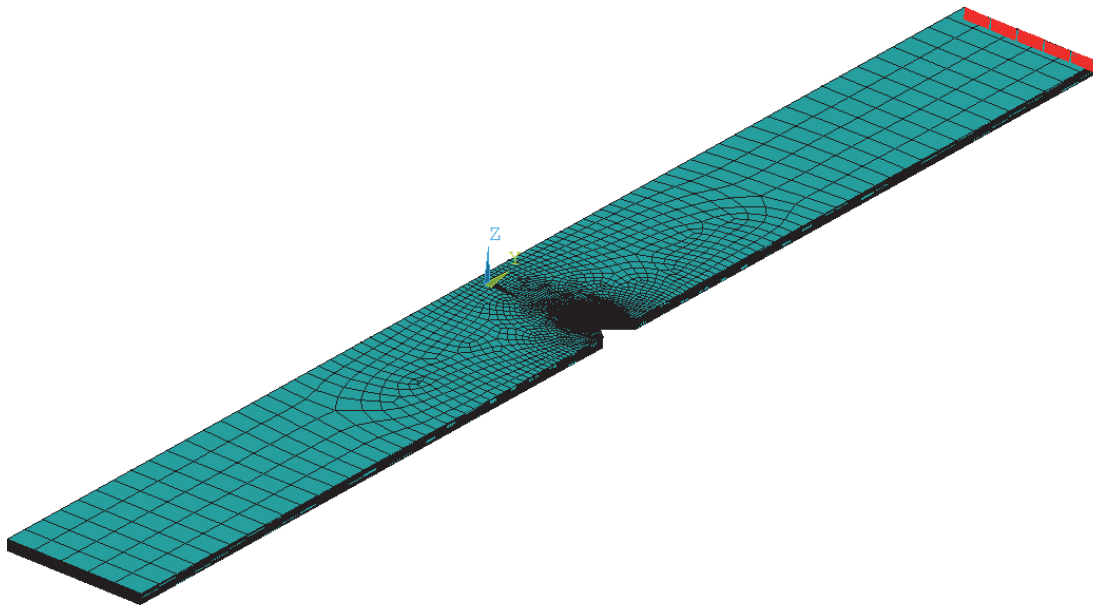


Figura 5.8: Esempio di mesh utilizzata nelle simulazioni

figura 5.9 viene mostrato un diagramma di convergenza della mesh, i punti nel grafico rappresentano i tentativi eseguiti. In ascissa viene mostrato, come di consueto il rapporto tra la dimensione di elemento nel punto in cui si vuole analizzare la convergenza, e una dimensione geometrica caratteristica del modello (in questo caso il raggio di raccordo dell'intaglio). In ordinata invece il valore di tensione σ_1 letta all'apice intaglio in corrispondenza del cuore del provino (a metà spessore). Come si può notare dal grafico la convergenza è buona; c'è un errore del 0.4% tra gli ultimi due tentativi. I dati sono poi riassunti in tabella 5.5

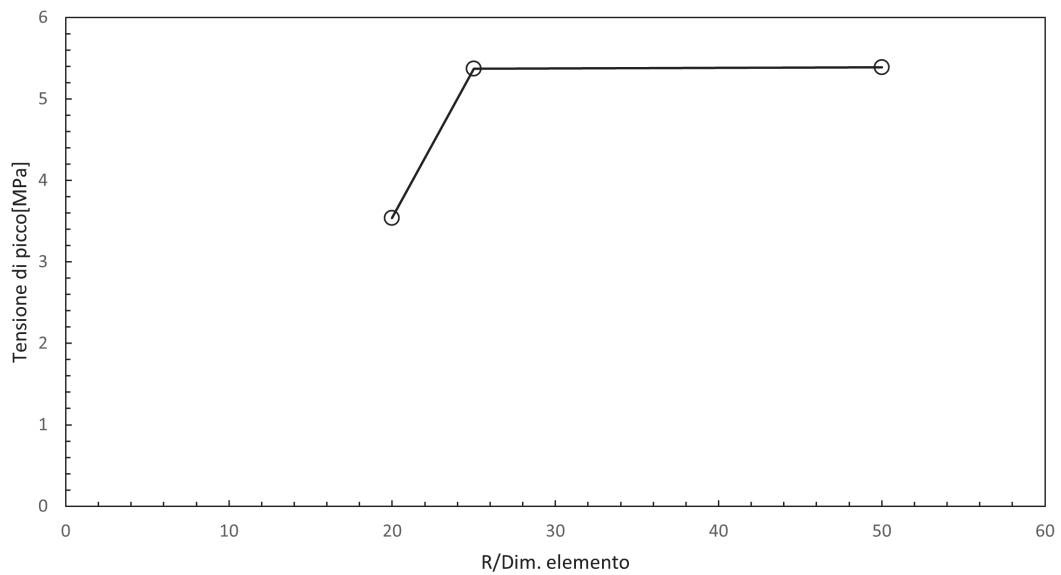


Figura 5.9: Grafico di convergenza per determinare la dimensione di elemento da utilizzare

Dim. Elemento [mm]	R [mm]	R /Dim. elemento	Tensione di picco [Mpa]
0.004	0.2	50	5.39
0.008	0.2	25	5.37
0.01	0.2	20	3.54

Tabella 5.5: Dati dello studio convergenza relativi alla figura

5.2 CAMPI DI TENSIONE

Utilizzando i risultati e metodi mostrati nel paragrafo 5.1, sono state eseguite le simulazioni su tutte e tre le geometrie. In aggiunta, sono state eseguite delle simulazioni, sempre per

tutte e tre le geometrie, in cui non è stato utilizzato Helius per mappare le proprietà del materiale nel modello FEM, ma è stato inserito un modello di materiale ortotropo in Ansys con le proprietà elastiche di tabella 5.1. Quest'ultimo tipo di analisi rappresenta la simulazione FEM sui provini fresati, perchè, in corrispondenza dell'intaglio le proprietà elastiche non variano. Nei provini iniettati invece, dato che in corrispondenza dell'intaglio la distribuzione ed orientazione delle fibre cambia, anche le proprietà elastiche nell'intorno dell'intaglio cambiano, ed è per questo motivo che si usa Helius per mappare tali proprietà (vedi figura 5.11). Nelle figure un'esempio della mesh in corrispondenza dell'intaglio per i provini $r = 0 \text{ mm}$. Nelle figure 5.12, 5.13 e 5.14 i campi di tensione ricavati nelle due configurazioni mostrate in figura 5.6 per tutte e tre le geometrie. In tabella 5.6 vengono riassunti i valori di K_t relativi alle analisi FEM svolte.

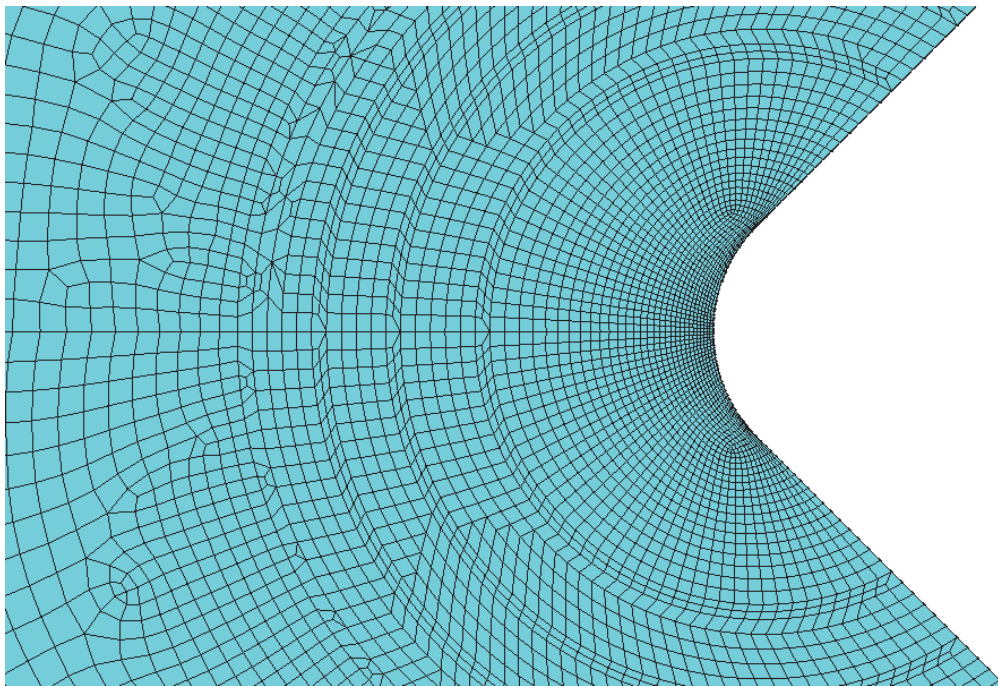


Figura 5.10: mesh all'apice utilizzata nelle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 0.2 \text{ mm}$.

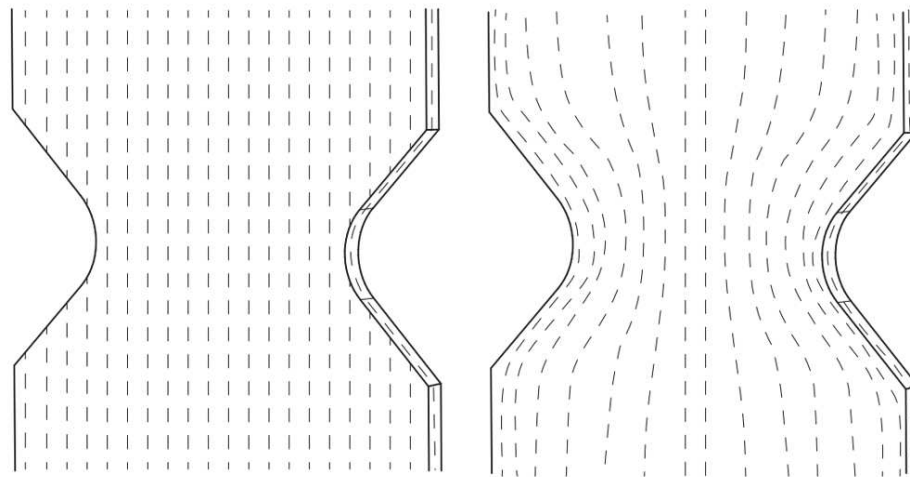


Figura 5.11: Schema rappresentativo della disposizione fibre nel provino fresato (a sinistra) e di quello iniettato (a destra)

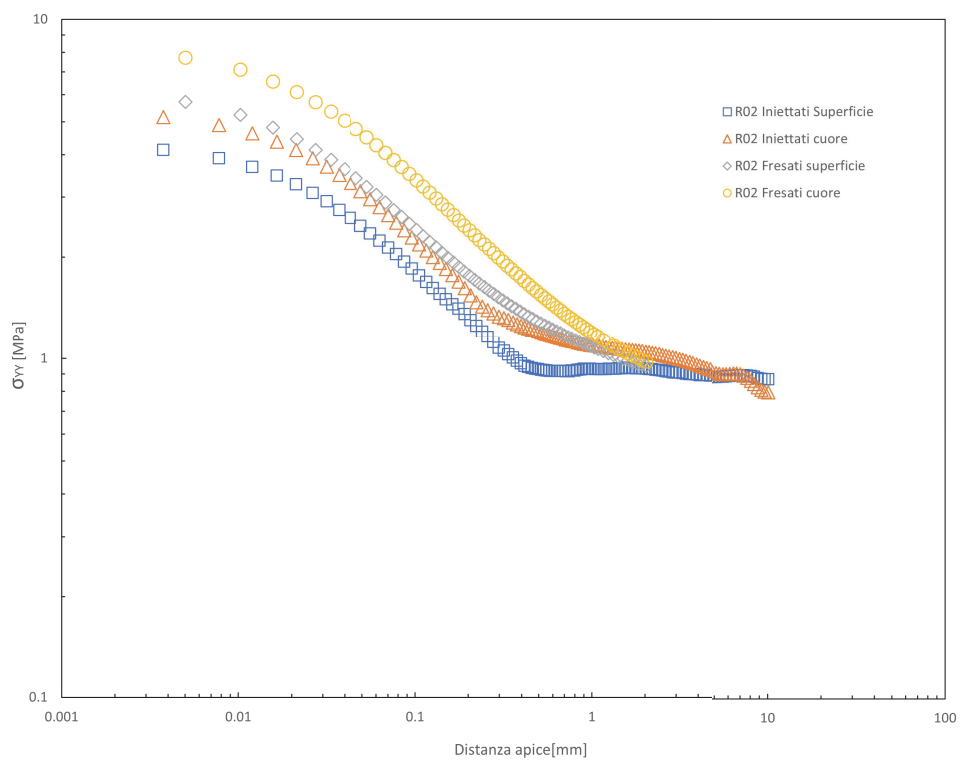


Figura 5.12: Campi di tensione ricavati dalle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 0.2 \text{ mm}$

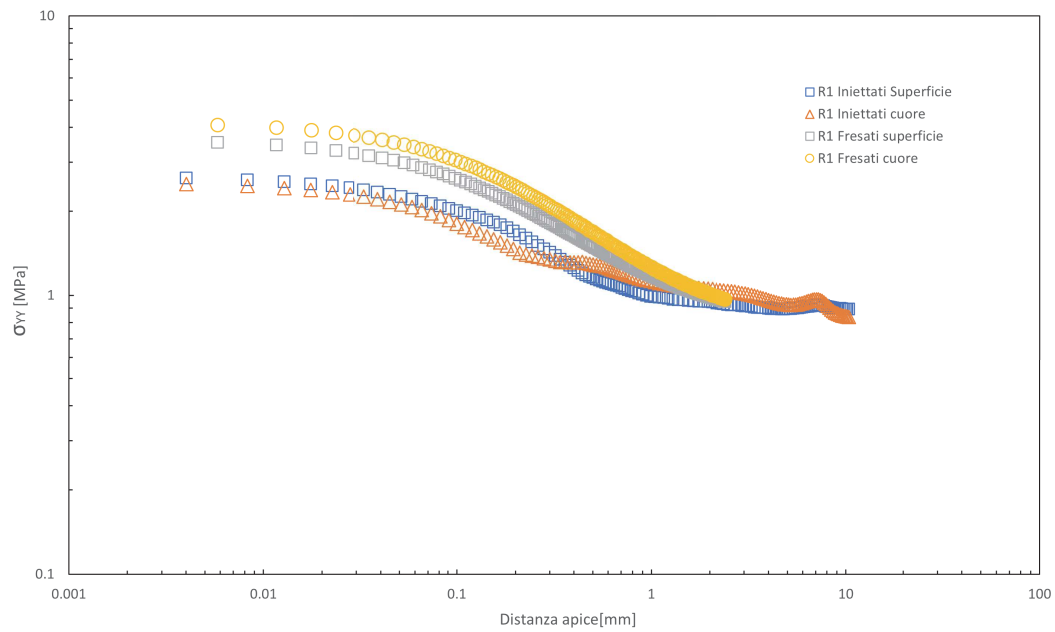


Figura 5.13: Campi di tensione ricavati dalle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 1 \text{ mm}$

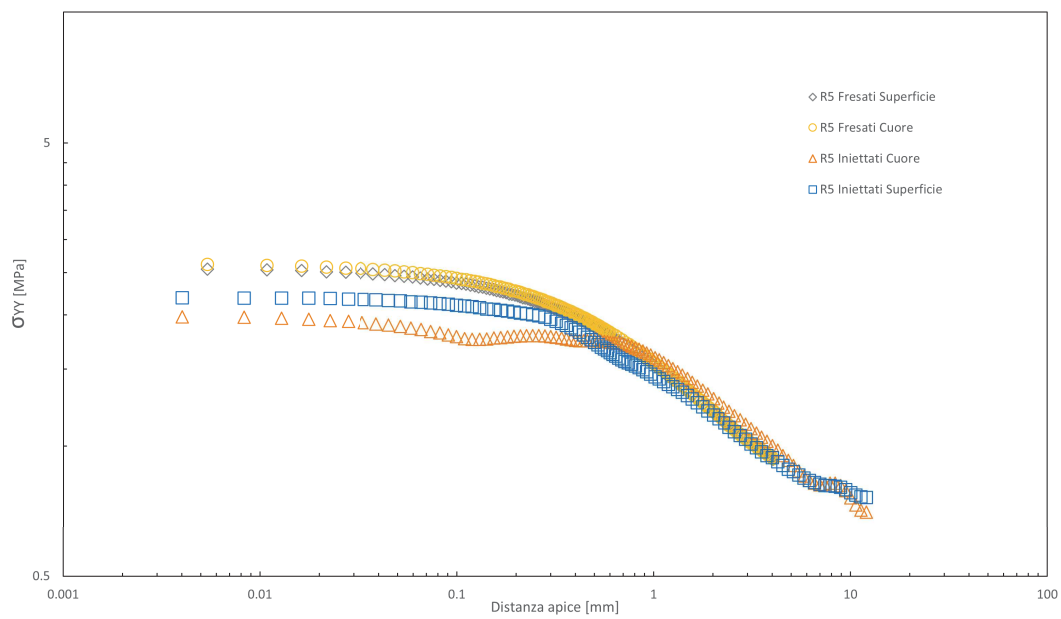


Figura 5.14: Campi di tensione ricavati dalle simulazioni FEM dei provini aventi $R = 5 \text{ mm}$

Come ci si aspettava, i campi di tensione dei provini fresati sono più alti di quelli dei

provini iniettati, questo perchè le fibre non seguono la curvatura dell'intaglio (come invece accade per i provini iniettati, vedi capitolo su analisi morfologia 2) di conseguenza il campo di tensione è più gravoso. A conferma di questo, le prove sperimentali mostrano la minor resistenza dei provini fresati su quelli iniettati (vedi capitoli 4 e 3). C'è una differenza sostanziale nei campi di tensione anche tra cuore e superficie, questo è dovuto all'orientazione delle fibre. Al cuore le fibre sono orientate maggiormente in direzione trasversale alla direzione del carico; questo comporta una maggior gravosità del campo di tensione.

	Iniettati		<i>Fresati</i>	
	K_t cuore	K_t superficie	K_t cuore	K_t superficie
<i>R0</i>	5.4158	4.3377	8.5502	6.3919
<i>R1</i>	2.5332	2.6708	4.1839	3.6638
<i>R5</i>	1.9815	1.9815	2.6207	2.5586

Tabella 5.6: Valori di tensione di picco ricavati dalle analisi FEM svolte

5.3 CALCOLO DELLA TENACITÀ A FRATTURA

Utilizzando i campi di tensione ricavati dalle simulazioni sui provini con $R = 0.2mm$, è stato ricavato l'esponente di singolarità delle tensioni λ considerando il tratto costante dei valori nodali di figura 5.12. Nella figura 5.15 vengono mostrati i valori nodali considerati per il calcolo di λ . Tali valori sono stati approssimati con una legge di potenza, e l'esponente di tale legge è il valore di $\lambda - 1$. Sempre in figura 5.15, vengono mostrate le leggi di potenza utilizzate con i relativi valori dell'esponente. I valori di $\lambda - 1$ così ricavati sono riassunti in tabella 5.7. Tramite la 1.46 vengono calcolati i rispettivi valori di K_I . Ricordiamo che tali valori di K_I sono riferiti ad un campo di tensione di 1MPa dei provini $R = 0.2mm$, bisogna perciò scalare tali valori delle rispettive tensioni di rottura ricavate sperimentalmente, ossia moltiplicandoli per $\sigma_{UTS,fresato} = 79.9MPa$ (per il K_I del provino fresato) e per $\sigma_{UTS,iniettato} = 103.4MPa$ (per il K_I del provino iniettato), si veda il capitolo 3 per i valori sperimentali di σ_{UTS} . Per il calcolo di K_{Ic} sono state fatte alcune assunzioni:

- Il valore di K_{Ic} è stato assunto uguale a quello di K_{Ipc} , ipotizzando quindi che il campo di tensione del provino $R = 0.2mm$ sia sovrapponibile con quello del corrispondente V-notch.
- Per il calcolo di K_{Ic} è stato utilizzato un valore di $1 - \lambda = -0.47$ che è lo stesso utilizzato da Zappalorto e Ricotta [6], ed è stato calcolato utilizzando la 1.15. Tale valore è infatti confrontabile con quelli ricavati tramite le simulazioni e riassunti in tabella 5.7.

	Iniettato cuore	Iniettato superficie	Fresato cuore	Fresato superficie
$\lambda - 1$	-0.488	-0.451	-0.479	-0.439

Tabella 5.7: Dati corrispondenti a $\lambda - 1$ ricavati dalla figura 5.15

In figura 5.16 vengono mostrati i valori di K_{Ic} relativi ai punti del grafico di figura 5.15 con i relativi valori medi. Il K_{Ic} del provino fresato è di $228.4 MPamm^{1-\lambda}$ che è confrontabile con $222.0 MPamm^{1-\lambda}$ ricavato da Ricotta et al. in [6] mediante la 1.35. Applicando la 5.2 al caso dei provini iniettati otteniamo $182.22 MPamm^{1-\lambda}$ (con $\sigma_{tip} = K_{t,cuore}\sigma_{UTS,iniettato}$), che è confrontabile con il corrispondente valore calcolato tramite la 1.46 (che vale $195.9 MPamm^{1-\lambda}$). Nel paragrafo successivo si decide di utilizzare il $K_{Ic} = 182.22 MPamm^{1-\lambda}$ ricavato tramite la 5.2, come fatto da Ricotta et al. [6].

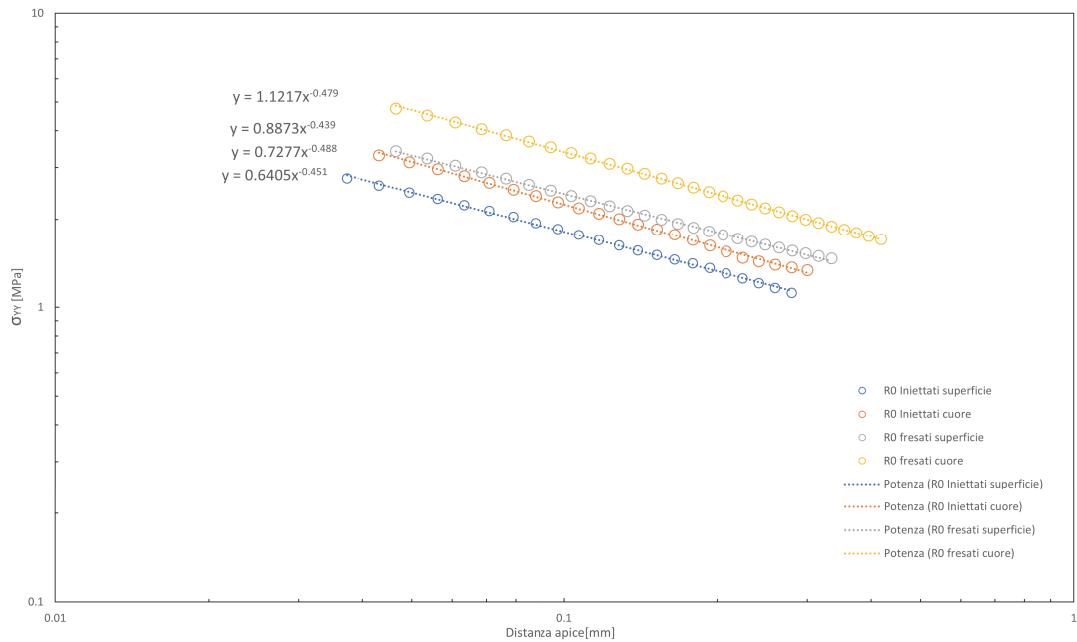


Figura 5.15: Valori delle tensioni ricavati da figura 5.12 per il calcolo di λ (grado di singolarità delle tensioni)

5.4 CALCOLO DEL GSIF NORMALIZZATO PER I PROVINI TESTATI STATICAMENTE

Il valore di K_{Ic} per i provini iniettati, ($182.22 \text{ MPamm}^{1-\lambda}$) viene utilizzato per calcolare il GSIF normalizzato (vedi paragrafo 1.1.6). In particolare il valore di $K_{I\rho c}$ viene calcolato per ogni punto sperimentale tramite la 1.35 di seguito riportata:

$$K_{I\rho c} = M\sigma_{tip}r_0^{1-\lambda} \quad (5.2)$$

Dove:

- viene calcolato tramite la 1.30 con le proprietà elastiche da articolo Ricotta et al. [6]. Esso vale $M = 1.16$ ed è lo stesso dei provini fresti [6]
- σ_{tip} è la tensione di picco elastica, ottenuta moltiplicando i K_t a cuore ricavati al paragrafo 5.2 per la σ_{UTS} ricavata dalle prove sperimentali sui provini intagliati (capitolo 3)
- r_0 è stato ricavato dalla 1.12, e dipende dal raggio di raccordo e dall'angolo di apertura.

Infine in figura 5.17 viene riportato il grafico del GSIF normalizzato che mostra come i dati sperimentali, sia quelli sui provini fresati testati da Ricotta et al. [6], sia quelli iniettati

testati in questo elaborato, possano essere condensati in una unica curva con la relativa banda di dispersione. La curva nera è l'equazione 1.38 ricavata da Zappalorto [19] (si consiglia di vedere il paragrafo 1.1.6). A differenza di quanto fatto con i provini fresati, facciamo notare che per i provini iniettati, l'aver utilizzato le formulazioni proposte da Zappalorto [19] è una forzatura, perchè tali espressioni sono valide nel caso di materiale ortotropo ideale. Nel caso dei provini iniettati invece le proprietà elastiche in corrispondenza dell'intaglio non sono costanti ma variano (a causa della distribuzione ed orientazione delle fibre, vedi capitolo 2). L'approccio utilizzato perciò è ibrido: il K_{Ipc} è stato calcolato con le proprietà elastiche del materiale fresato ma con la tensione di picco elastico ricavato da analisi FEM che tengono conto della morfologia del materiale. Il K_{Ic} invece è stato calcolato tramite la definizione, utilizzando i campi di tensione che ancora una volta tengono conto della microstruttura del materiale. In conclusione possiamo affermare che l'approccio in GSIF normalizzato si è rivelato robusto e in grado di prevedere in maniera piuttosto accurata la resistenza statica dei provini testati.

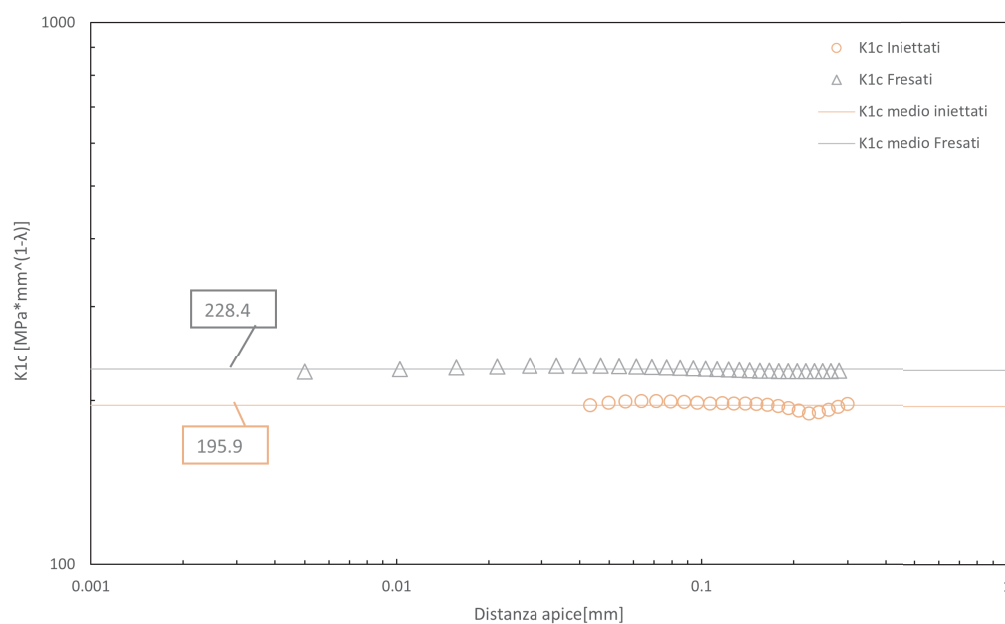


Figura 5.16: Valori di K_I calcolati per i punti di figura 5.15 con la formula 1.46

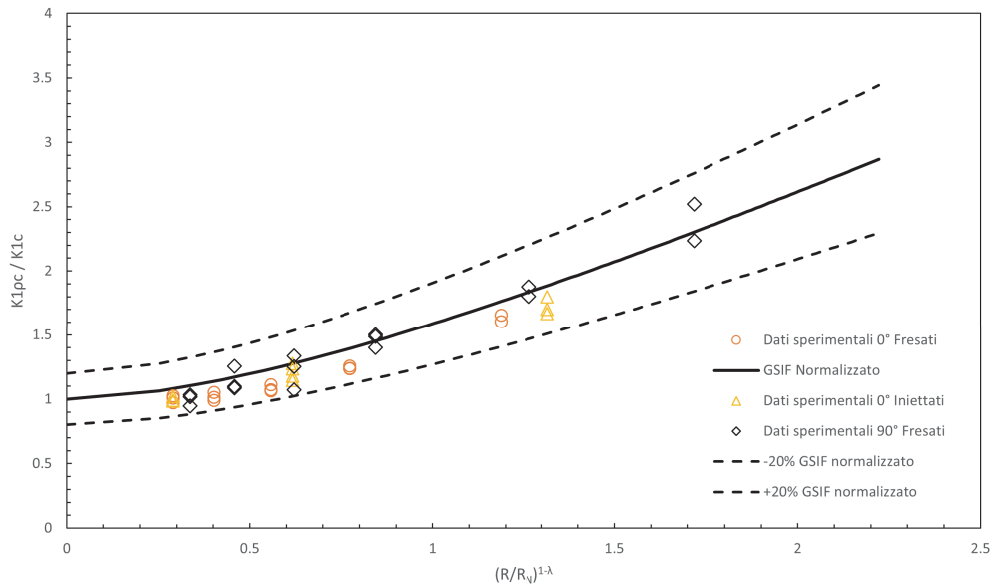


Figura 5.17: Grafico che mostra i valori sperimentali rianalizzati in termini di GSIF normalizzato. I dati sperimentali vengono condensati in un'unica curva con le relative bande di dispersione al 20%

5.5 ANALISI DEI DATI A FATICA IN TERMINI DI GSIF

In questo paragrafo utilizziamo l'approccio in GSIF per analizzare i risultati ottenuti nelle prove sperimentali a fatica. L'obiettivo è quello di condensare tutti i dati in un'unica curva GSIF-numero cicli ad innesco. Chiamiamo questa grandezza K_{Iai} , che si differenzia da K_{Ipc} utilizzato nella statica, in quanto per calcolarla verrà utilizzata l'ampiezza di tensione ad innesco anziché la tensione di rottura statica. Per ogni punto sperimentale è stato quindi calcolato K_{Iai} tramite la seguente:

$$K_{Iai} = M \sigma_{a,tip} r_0^{1-\lambda} \quad (5.3)$$

Dove:

- M viene calcolato tramite la 1.30 con le proprietà elastiche da articolo Ricotta et al. [6]. Esso vale $M = 1.16$ ed è lo stesso dei provini fresati. [6]
- $\sigma_{a,tip}$ è l'ampiezza di tensione di picco elastico ad innesco, ottenuta moltiplicando i K_t a cuore ricavati al paragrafo 5.2 per la $\sigma_{a,net}$ ad innesco ricavata dalle prove sperimentali sui provini intagliati (capitolo 4)

- r_0 è stato ricavato dalla 1.12, e dipende dal raggio di raccordo e dall'angolo di apertura.
- $1 - \lambda$ vale ancora 0.47, perchè anche per la fatica sono validi i ragionamenti di cui al paragrafo 5.4

In figura 5.18 il grafico che mostra i punti sperimentali rianalizzati secondo questo approccio (in tabella 5.8 vengono mostrati i valori di GSIF calcolati per ogni punto sperimentale).

Nome provino	$K_{Iai}[Mpa\ mm^{1-\lambda}]$	$\sigma_{a,net}[Mpa]$	N_i
<i>R0_1_fat</i>	49.33	28	2000
<i>R0_2_fat</i>	44.04	25	20000
<i>R0_3_fat</i>	44.04	25	20000
<i>R0_4_fat</i>	41.40	23.5	130000
<i>R0_5_fat</i>	38.76	22	100000
<i>R0_7_fat</i>	38.76	22	250000
<i>R1_3_fat</i>	85.32	44	758
<i>R1_4_fat</i>	63.99	33	4000
<i>R1_5_fat</i>	54.30	28	30000
<i>R1_6_fat</i>	48.48	25	1650000
<i>R1_8_fat</i>	48.48	25	375000
<i>R1_7_fat</i>	48.48	25	76805
<i>R1_10_fat</i>	48.48	25	37720
<i>R1_11_fat</i>	48.48	25	671981
<i>R5_1_fat</i>	86.48	29.6	670924
<i>R5_2_fat</i>	107.81	36.9	2000
<i>R5_3_fat</i>	91.57	31.34	73639
<i>R5_5_fat</i>	84.73	29	35027
<i>R5_6_fat</i>	84.73	29	88587
<i>R5_8_fat</i>	86.48	29.6	40000
<i>R5_9_fat</i>	86.48	29.6	40000
<i>R5_12_fat</i>	75.97	26	934726

Tabella 5.8: Valori di GSIF (K_{Iai}) calcolati per ogni punto sperimentale

In figura 5.19 invece viene riproposto un grafico Tensione-Numero cicli ad innesco, in cui tutti i dati, indipendentemente dalla geometria, vengono approssimati da una unica curva con le relative bande di dispersione.

Come si può notare dai grafici di figura xx1 e 5.19 la dispersione che si ottiene nel caso del grafico in GSIF è maggiore rispetto al grafico in σ . Questo ci suggerisce che il fattore di intensificazione delle tensioni generalizzato, non rappresenta, per la fatica, un valido approccio per la previsione della resistenza dei provini testati.

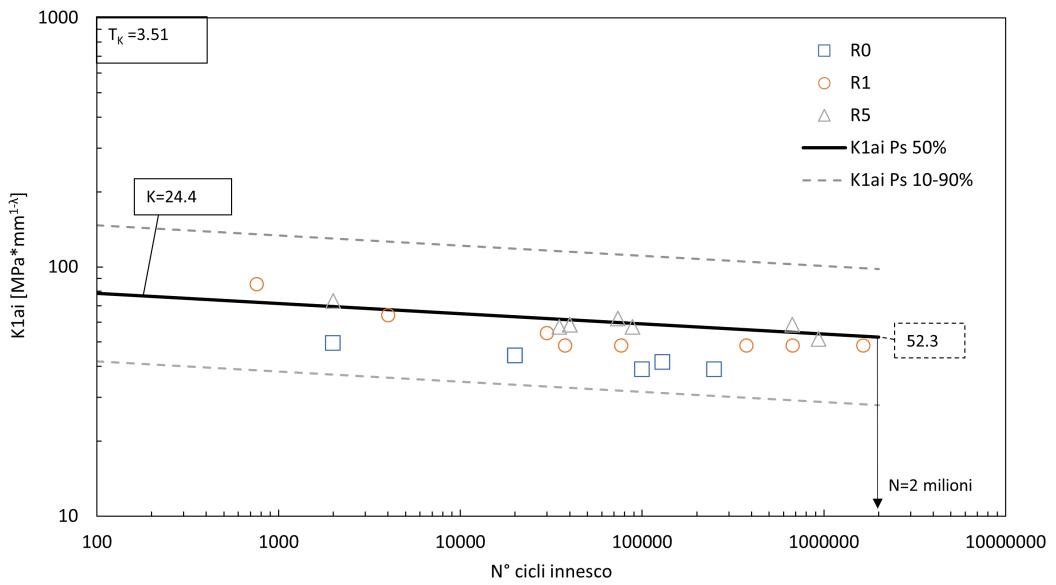


Figura 5.18: Grafico GSIF-Numero cicli ad innesco, in cui i valori sperimentali vengono approssimati da una unica curva indipendentemente dalla geometria

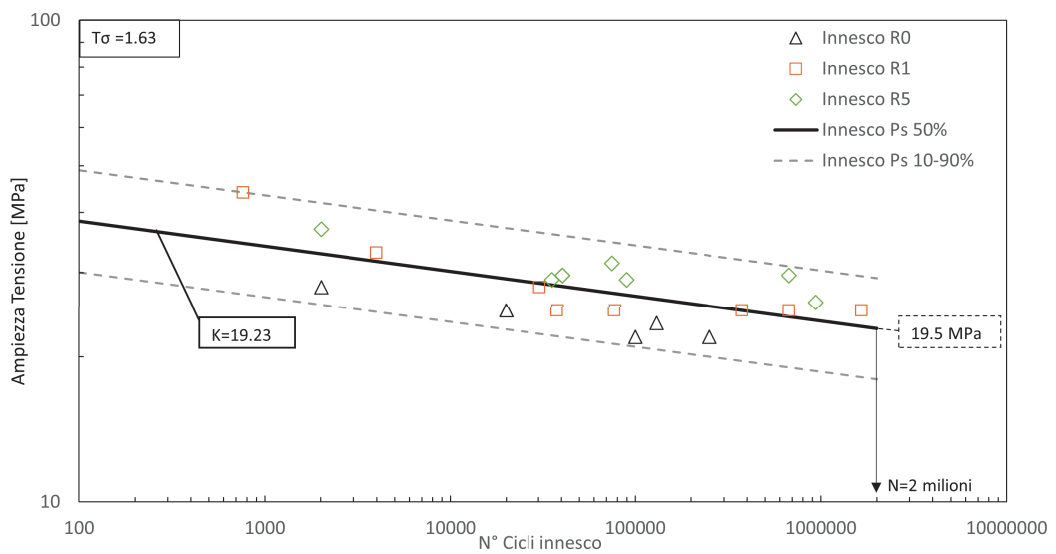


Figura 5.19: Grafico Ampiezza tensione-Numero cicli ad innesco, in cui i valori sperimentali vengono approssimati da una unica curva indipendentemente dalla geometria

5.6 ANALISI DEI DATI A FATICA TRAMITE IL SED

In questo paragrafo verranno analizzati i risultati sperimentali ricavati dalle prove di fatica utilizzando l'approccio al SED. Il criterio consiste nel calcolare il SED mediato in un specifico volume di controllo definito dal parametro r_c che è una proprietà del materiale (vedi paragrafo 1.2.3). Una volta calcolato il SED nel volume di controllo di uno specifico provino è possibile costruire una curva di fatica in cui in ascissa compare il numero di cicli ad innesco e in ordinata il SED mediato sul volume di controllo. Il raggio r_c è stato calcolato per tentativi (si nota dalle immagini della mesh che è stata costruita in modo tale che gli elementi siano appoggiati su più circonferenze aventi diversi valori del raggio, questo per facilitare e rendere più accurata la selezione degli elementi del volume di controllo di tentativo), uguagliando il SED mediato del provino liscio con quello del provino intagliato in condizioni di uguale danneggiamento (ad esempio considerando le tensioni e deformazioni a 2 milioni di cicli ad innesco). Il SED mediato sul provino liscio vale:

$$W_{mediato,liscio} = \frac{\sigma_{a,50\%}}{2E} \quad (5.4)$$

Il SED mediato sul volume di controllo sostenuto da r_c si calcola seguendo la seguente procedura:

- si ricavano i valori nodali di elemento delle tensioni e deformazioni principali, avendo cura di selezionare gli elementi che fanno parte del volume di controllo. In figura 5.20 vediamo un esempio del volume di controllo utilizzato per il calcolo del SED mediato.
- si ricavano i volumi dei singoli elementi che fanno parte del volume di controllo
- si fa la media delle tensioni e deformazioni principali per ogni elemento
- si calcola il SED su ogni elemento tramite la seguente:

$$W = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1 + \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2 + \frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_3 dV \quad (5.5)$$

- si moltiplica il SED di ciascun elemento per il proprio volume e si sommano tutti i prodotti
- si divide quest'ultimo risultato per il volume di controllo ottenendo il SED mediato

Per calcolare il SED mediato tramite questa procedura è stato realizzato un programma in *Python* di cui viene riportato il codice nell'appendice C.

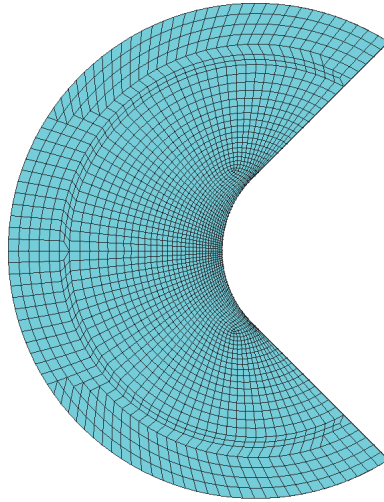


Figura 5.20: Esempio del raggio di controllo utilizzato nei provini $r = 0 \text{ mm}$

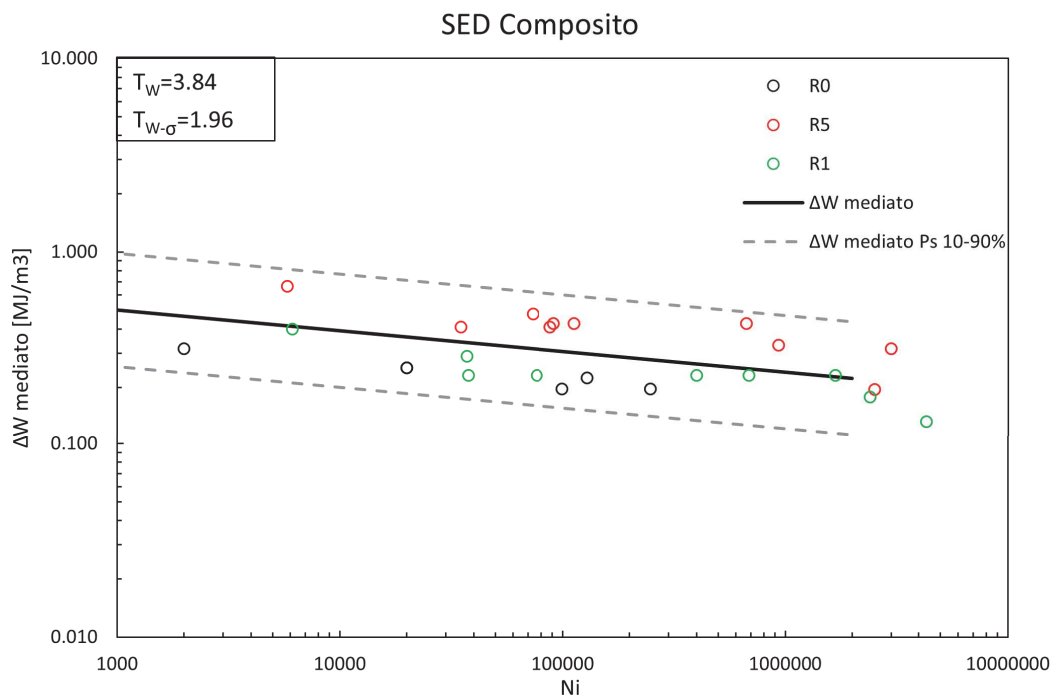


Figura 5.21: Dati sperimentali rianalizzati in termini di SED mediato sul composito

Nella tabella 5.9 vengono mostrati i valori di R_c ricavati dopo le operazioni di taratura. Il SED mediato del liscio sul composito è lo stesso utilizzato da Rcchi[7] nei provini fresati e vale $W_{mediato,liscio} = 0.0366[MJ/m^3]$, mentre il corrispondente valore per la matrice

vale $W_{mediato,liscio,matrice} = 0.0549[MJ/m^3]$. Una volta tarato il raggio di controllo r_c , si può procedere con la costruzione del grafico. Ricordando che le analisi FEM sono state effettuate applicando 1MPa sulla sezione netta (questo è valido anche quando si sta tarando r_c), si moltiplica il valore del SED mediato calcolato per l'ampiezza di tensione netta ad innesco al quadrato di ciascun dato sperimentale (ricordiamo che si calcola il SED ad innesco perché, la schematizzazione del volume di controllo proposta da Lazzarin e Berto [3] non sarebbe altrimenti valida poichè la cricca, propagando, modificherebbe la definizione di r_0). A questo punto è possibile costruire un grafico SED mediato- N_i che comprende tutti i dati sperimentali rianalizzati secondo questo approccio (figura 5.21).

	Geometria	$R_c[mm]$	$W_{mediato} 1MPa[MJ/m^3]$
Matrice	R0	0.64	$3.41E - 05$
	R1	0.64	$2.852E - 05$
	R5	0.64	$3.98E - 05$
Composito	R0	0.42	$1.01E - 4$
	R1	0.42	$9.19E - 05$
	R5	0.42	$1.21E - 4$

Tabella 5.9: Valori del raggio di controllo ricavati dalle operazioni di taratura

In figura 5.22 viene mostrato un grafico costruito analogamente a quello di figura 5.21 in cui il SED mediato viene calcolato nella sola matrice. A anche in questo caso si tara prima il raggio r_c (che sarà diverso rispetto a quello calcolato per il composito) sempre per tentativi, uguagliando il SED mediato del provino liscio con quello del provino intagliato in condizioni di uguale danneggiamento. In questo caso però l'energia del liscio non si può calcolare tramite la 5.4, ma si calcola l'energia di Beltrami, la procedura è la seguente:

- si ricavano i valori nodali di elemento delle 6 componenti del tensore di tensione per la sola matrice (tali valori sono ricavabili applicando nelle simulazioni FEM la procedura relativa al calcolo degli SVAR mostrata nell'appendice A), avendo cura di selezionare gli elementi che fanno parte del volume di controllo.
- si ricavano i volumi dei singoli elementi che fanno parte del volume di controllo
- si fa la media delle 6 componenti del tensore di tensione per ogni elemento
- si calcola il SED su ogni elemento tramite la seguente:

$$W = \frac{1}{2E}(\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - 2\nu(\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{33}\sigma_{22} + \sigma_{33}\sigma_{11}) + 2(1+\nu)(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)) \quad (5.6)$$

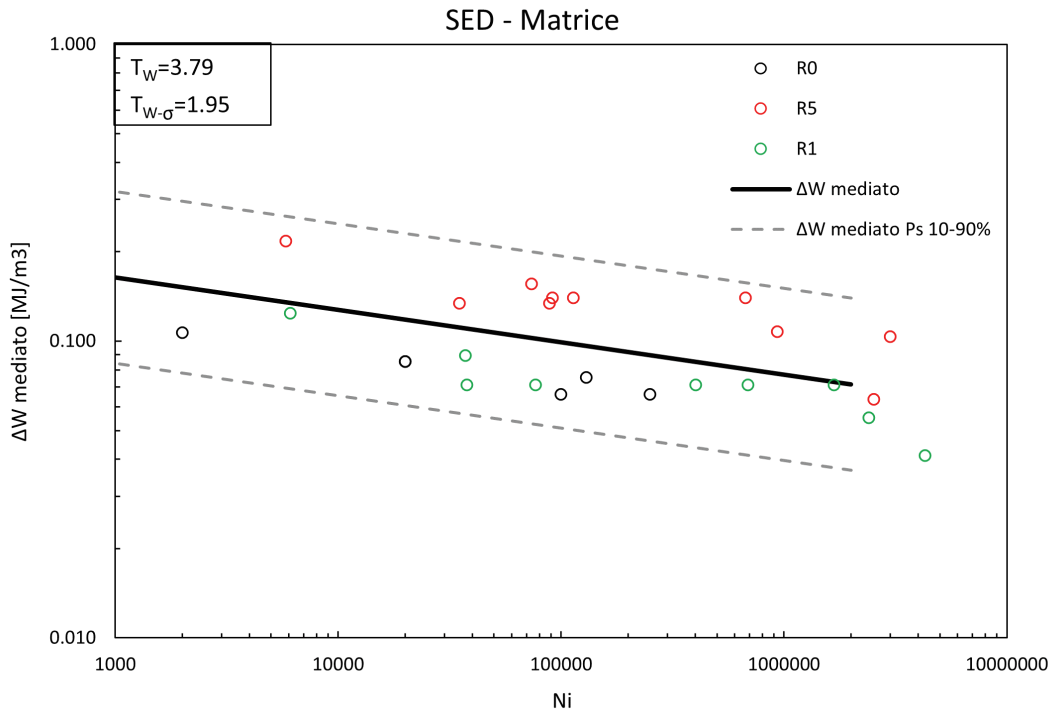


Figura 5.22: Dati sperimentali rianalizzati in termini di SED mediato sulla matrice

- si moltiplica il SED di ciascun elemento per il proprio volume e si sommano tutti i prodotti
- si divide quest'ultimo risultato per il volume di controllo ottenendo il SED mediato sulla sola matrice

I valori di ν e E sono le proprietà elastiche della matrice e si ricavano da Moldflow (proprietà del materiale) e valgono $\nu = 0.389$ ed $E = 4640$. Una volta tarato il raggio di controllo, si moltiplica il valore del SED mediato calcolato, per l'ampiezza di tensione netta ad innesco al quadrato di ciascun dato sperimentale, ottenendo il grafico di figura 5.22. Facciamo notare che sia nella figura 5.22 sia nella 5.21 è stato calcolato il valore di $\delta W_{mediato}$.

I valori di T_w non possono essere direttamente confrontati con il T_σ e T_K perchè la il SED mediato dipende dal quadrato della tensione. Per questo motivo calcoliamo il termine:

$$T_{W-\sigma} = \sqrt{T_W} \quad (5.7)$$

In questo modo possiamo confrontare le dispersioni ottenute dalle analisi dei risultati secondo i quattro approcci: analisi in ampiezza di tensione, analisi in GSIF, SED mediato sulla

matrice e SED mediato sull'intero composito. In tabella 5.10 vengono mostrati e riassunti i valori della dispersione dei dati sperimentali.

	$\sigma_{a,net}$	GSIF	$SED_{mediato,matrice}$	$SED_{mediato,composito}$
Dispersione	1.63	3.51	1.95	1.96

Tabella 5.10: Tabella comparativa dei valori di dispersione relativa ai quattro approcci utilizzati per l'analisi risultati a fatica

5.7 ANALISI DEI PROVINI IN PPS-40GF A FATICA TRAMITE IL SED

Come visto nel paragrafo precedente, il SED non sembra in grado di migliorare la dispersione dei dati che si ottiene tramite l'analisi in termini di ampiezza di tensione. Ma se consideriamo anche i dati sperimentali a fatica sui provini fresati otteniamo qualcosa di interessante. In figura 5.23 viene mostrato un grafico che rappresenta tutti i dati sperimentali a fatica raccolti sul PPS-40GF, analizzati in termini di ampiezza di tensione. Come si può notare, le serie di dati sono distinguibili, su di tutti emergono i punti sperimentali relativi ai provini lisci. In figura 5.24 gli stessi dati vengono rianalizzati tramite il SED mediato. Si nota come le varie serie tendano a condensarsi in una unica banda, anche se gli iniettati $R5$ sono abbastanza distanziati, i lisci non sono più nettamente staccati come in figura 5.23. Quindi confrontando i due approcci notiamo che:

- rispetto alla figura 5.21 la dispersione è migliorata, passiamo da un $T_{W-\sigma} = 1.96$ nel caso precedente ad un $T_{W-\sigma} = 1.66$.
- l'approccio al SED che, nel caso dei soli dati sui provini iniettati, aveva peggiorato la dispersione che restituiva l'analisi in σ_a (tabella 5.10), in questo caso considerando anche i dati sui provini fresati, la dispersione migliora sensibilmente; da $T_{\sigma} = 2.21$ (analisi in σ_a , figura 5.23) a $T_{W-\sigma} = 1.66$
- il calcolo del SED mediato sugli iniettati è stato eseguito con un $R_c = 0.42mm$ per i provini iniettati, e con un $R_c = 0.59mm$ per quelli fresati.

In tabella 5.11 vengono riassunti e confrontati i valori di $T_{W-\sigma}$ e T_{σ} ricavati nei vari casi.

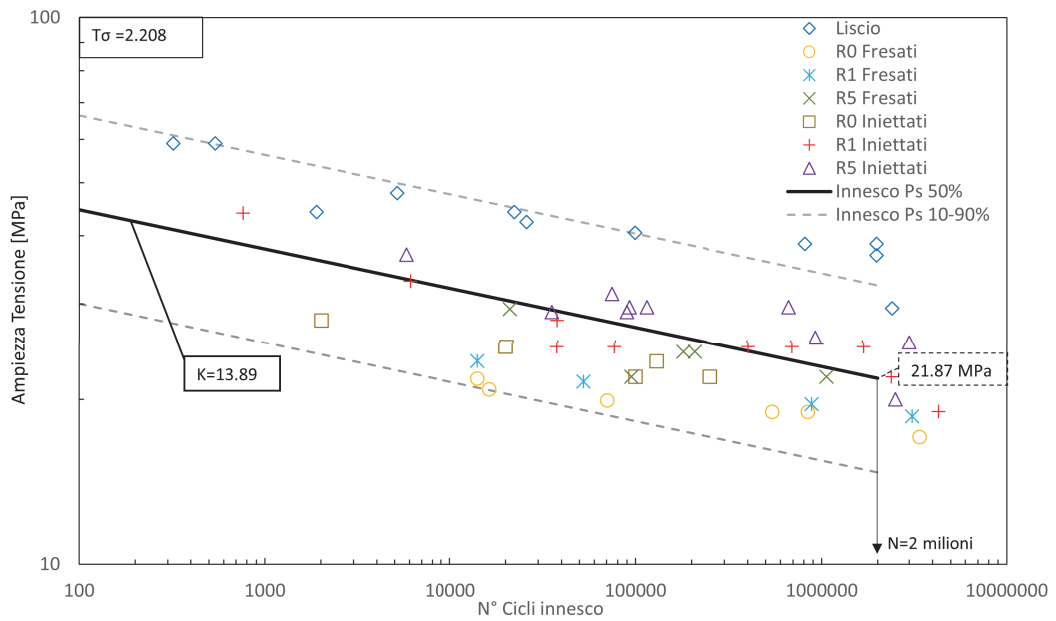


Figura 5.23: Dati sperimentali sul PPS-40GF rializzati a fatica in termini di ampiezza di tensione

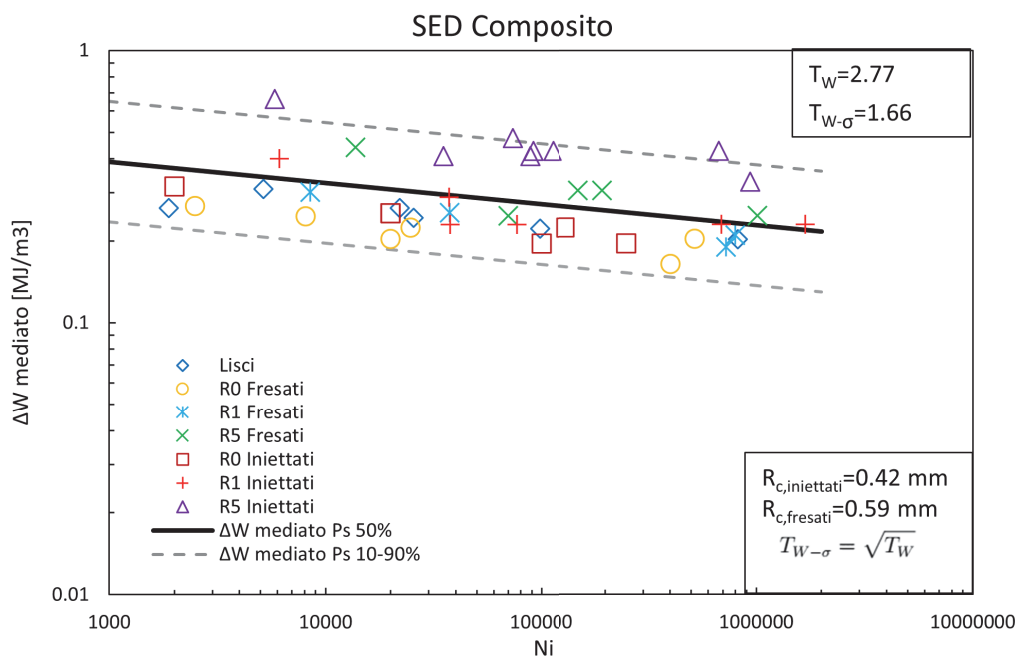


Figura 5.24: Dati sperimentali sul PPS-40GF rializzati a fatica in di SED mediato

	$\sigma_{a,net}$	$SED_{mediato}$
Solo Iniettati	1.63	1.96
Fresati+Iniettati+Lisci	2.21	1.66

Tabella 5.11: Tabella comparativa dei valori di dispersione relativa all'analisi in ampiezza tensione e SED mediato sui dati sperimentali ricavati dalle prove a fatica sui provini in PPS-40GF (sia iniettati che fresati)

6

Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi, provini in PPS-40GF realizzati per stampaggio ad iniezione sono stati testati sia staticamente che a fatica. Si è partiti dai dati sperimentali (ricavati in altri studi) ottenuti da provini costituiti dello stesso materiale ma con gli intagli realizzati tramite il processo di fresatura. Le prove di laboratorio hanno sempre mostrato come la resistenza dei provini iniettati sia superiore rispetto a quella dei provini fresati. Le analisi sulla morfologia del materiale hanno mostrato che le fibre in corrispondenza del raggio di intaglio si orientano in maniera tale da seguire la forma dell'intaglio (vedi la schematizzazione di figura 6.1).

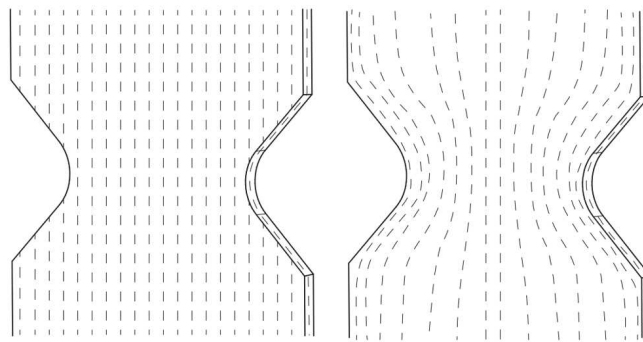


Figura 6.1: Schema della disposizione delle fibre all'apice intaglio nel provino fresato (sinistra) e nel provino iniettato (destra)

Questo fa sì che le fibre siano più favorevolmente orientate lungo il flusso di tensione e che quindi i campi di tensione stessi siano meno gravosi rispetto a quelli che si ritrovano

nei provini fresati. Da qui deriva la maggior resistenza dei provini iniettati riscontrata nelle prove sperimentali. Le analisi delle superfici di frattura non hanno evidenziato particolari differenze tra i meccanismi di danneggiamento evidenziati nei provini fresati e in quelli iniettati. Infine, i dati sperimentali sono stati analizzati tramite dei criteri e messi a confronto con quanto evidenziato nel caso dei provini fresati. Si è visto, nel caso della statica, come l'utilizzo del GSIF normalizzato per la rianalisi dei dati ricavati dalle prove di laboratorio abbia funzionato piuttosto bene. I punti sperimentali, sono pressoché sovrapponibili con i relativi punti dei provini fresati testati da Ricotta, Sorgato e Zappalorto [6] (figura 6.2).

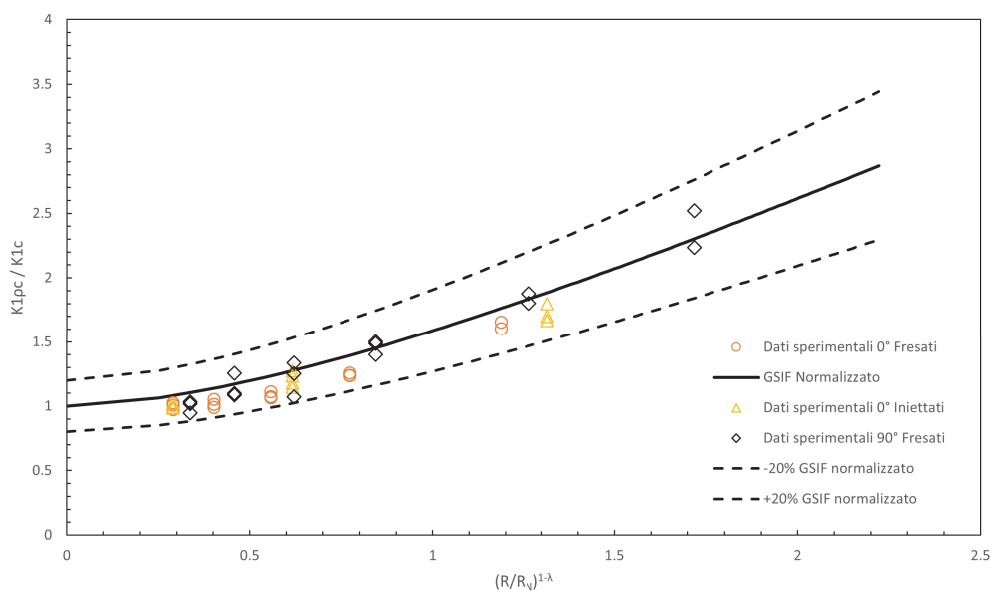


Figura 6.2: Grafico che mostra i valori sperimentali rianalizzati in termini di GSIF normalizzato. I dati sperimentali vengono condensati in un'unica curva con le relative bande di dispersione al 20%

L'utilizzo del GSIF a fatica invece, ha notevolmente peggiorato i risultati che si ottengono nella rappresentazione dei dati sperimentali in termini di ampiezza di tensione. Anche l'approccio di analisi tramite il SED mediato sul composito e sulla matrice non ha migliorato la dispersione dei dati che si ottiene in termini di ampiezza di tensione (anche se, in quest'ultimo caso, il peggioramento è nettamente inferiore rispetto a ciò che si ottiene dal GSIF). Se si analizzano tutti assieme i dati sperimentali a fatica (gli iniettati, i fresati e i provini lisci) tramite il SED mediato invece, si ottiene un miglioramento nella dispersione rispetto al caso in cui si considerino solo i dati dei provini iniettati e permette di condensare meglio i punti sperimentali rispetto a quanto riesce a fare l'analisi in termini di ampiezza di tensione (figura 6.3).

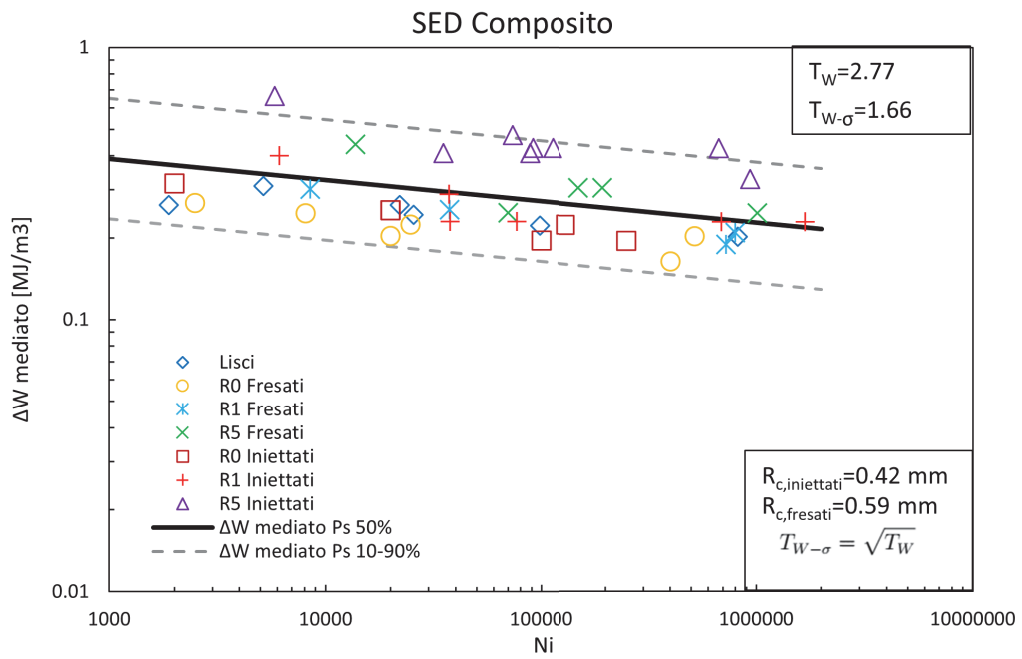


Figura 6.3: Dati sperimentali sul PPS-40GF rianalizzati a fatica in termini di SED mediato



Guida Helius PFA

La presente guida ha lo scopo di mostrare come effettuare un'analisi che integri le caratteristiche del materiale derivanti da una simulazione di processo effettuata con Moldflow con un'analisi strutturale su Ansys. Nel caso specifico, Moldflow è stato utilizzato per simulare il processo di stampaggio ad iniezione di un materiale a matrice polimerica rinforzato con fibre di vetro discontinue. Il risultato di tale simulazione è stato poi utilizzato (tramite Helius) per effettuare un'analisi strutturale che tenga conto della distribuzione e orientazione delle fibre derivanti dal processo di produzione, al fine di ottenere dei risultati più accurati e simili alla realtà. Per quanto riguarda la procedura, di seguito esposta in dettaglio, una volta pronto il modello FEM generato in Ansys lo si importa nell'ambiente di lavoro Helius (Advanced Material Exchange) assieme ai risultati della simulazione Moldflow. Si allineano i due modelli, si definiscono le proprietà elastiche del materiale, e si mappano i risultati Moldflow nel modello Ansys. A questo punto si lancia l'analisi strutturale e, una volta terminata, il software (Helius) genera un file .db Ansys in cui è possibile effettuare il post-processing.

La guida si articola per punti, inoltre, se l'utente non è interessato a ricavare i valori che Helius nomina SVAR, che sta per *State Variable*, (si tratta di valori specifici che Helius genera per alcuni materiali caricati e non; per maggiori informazioni si rimanda al seguente link: [guida online di Helius PFA](#)) si consiglia di ignorare i punti in cui compare la scritta SOLO SVAR tra parentesi alla fine del titolo del punto, questo perché il procedimento per effettuare questa analisi differisce per alcune istruzioni rispetto al caso in cui non si è interessati, e perché il computo degli SVAR richiede tempi di risoluzione maggiori. Mentre per chi è

interessato a ricavarli, seguire i punti in cui compaiono, tra parentesi, alla fine del titolo del punto, le scritte SVAR o SOLO SVAR. Si può trovare poi al seguente [link](#), un tutorial ben costruito con dei video illustrativi che mostra la procedura esposta nella presente guida.

1. Creazione del Load Step (SOLO SVAR)

Una volta creato il modello Fem in *Ansys*, completo di carichi e vincoli, aprire il modello *Ansys* e dal Pre-processor digitare nel prompt dei comandi:

- NSUBST, 100, 100, 100 - Che specifica il numero di substep da usare nell'analisi, se si vogliono usare 10 substep, ad esempio, il comando da digitare sarà: NSUBST, 10, 10, 10
- TIME, 1 - Specifica la dimensione dello Step

2. Definizione dei valori di output (SOLO SVAR)

Digitare nel prompt dei comandi le seguenti istruzioni:

- OUTRES, SVAR, ALL - specifica che tutte le variabili di stato devono essere scritte nel file dei risultati ad ogni Substep
- OUTRES, NSOL, ALL - specifica che le soluzioni nodali devono essere scritte nel file dei risultati ad ogni Substep
- OUTRES, NLOAD, ALL - specifica che le condizioni al contorno devono essere scritte nel file dei risultati ad ogni Substep
- OUTRES, RSOL, ALL - specifica che le reazioni vincolari devono essere scritte nel file dei risultati ad ogni Substep

Per rendere l'analisi meno pesante da un punto di vista computazionale, si possono alternativamente inserire i comandi qui di seguito in cui la scrittura dei dati anziché avvenire ad ogni Substep avviene solo nell'ultimo (che è quello che ci interessa nel nostro esempio):

- OUTRES, SVAR, LAST - specifica che tutte le variabili di stato devono essere scritte nel file dei risultati nell'ultimo Substep
- OUTRES, NSOL, LAST - specifica che le soluzioni nodali devono essere scritte nel file dei risultati nell'ultimo Substep
- OUTRES, NLOAD, LAST - specifica che le condizioni al contorno devono essere scritte nel file dei risultati nell'ultimo Substep

- OUTRES, RSOL, LAST - specifica che le reazioni vincolari devono essere scritte nel file dei risultati nell'ultimo Substep

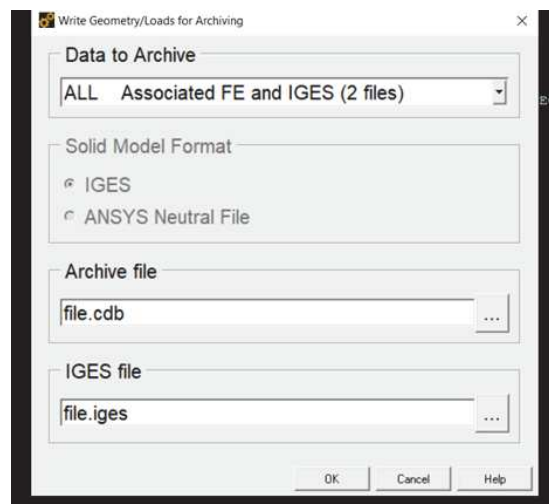
3. Generazione del file .cdb (SOLO SVAR)

Digitare nel prompt dei comandi la seguente istruzione:

- CDWRITE, ALL, NOME_FILE, CDB - per scrivere nella stessa cartella di lavoro del file Ansys un file .cdb

4. Creazione del modello CDB

Una volta creato il modello Fem in Ansys, completo di carichi e vincoli, in *Ansys* da PREPROCESSOR → ARCHIVE MODEL → WRITE



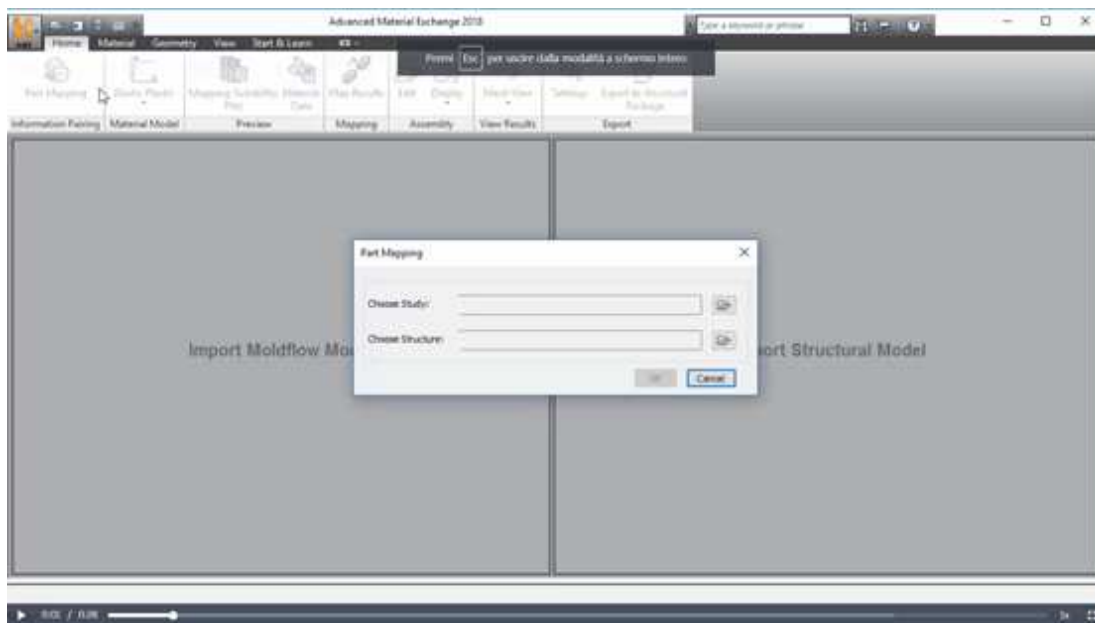
Si inserisce il nome del file seguito da l'estensione(.cdb) e si preme OK

5. Apertura dell'ambiente di lavoro e selezione dei file da analizzare (SVAR)

Si apre il software *Advanced Material Exchange* → PART MAPPING

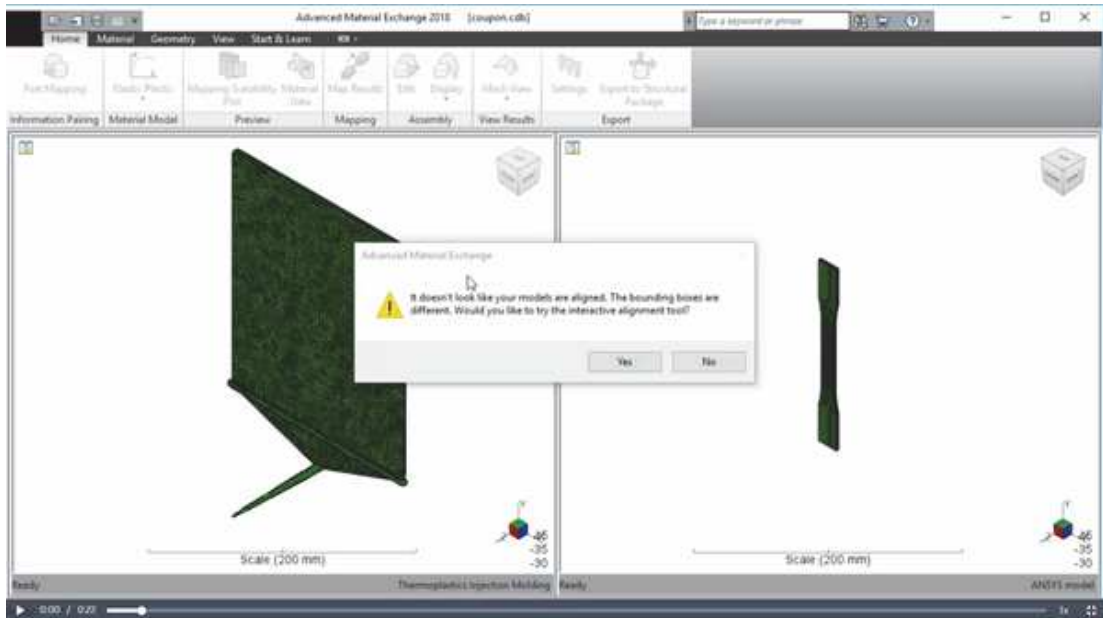


Si inserisce in *Choose study* il file Moldflow dei risultati della simulazione (con estensione .sdy) e premere CONTINUE e in *Choose Structure* il file .cdb creato al punto 3 o punto 4



Selezionare l'unità di misura e premere OK. Compare una prima finestra in cui chiede di caratterizzare la curva Ramberg-Osgood → scegliere NO

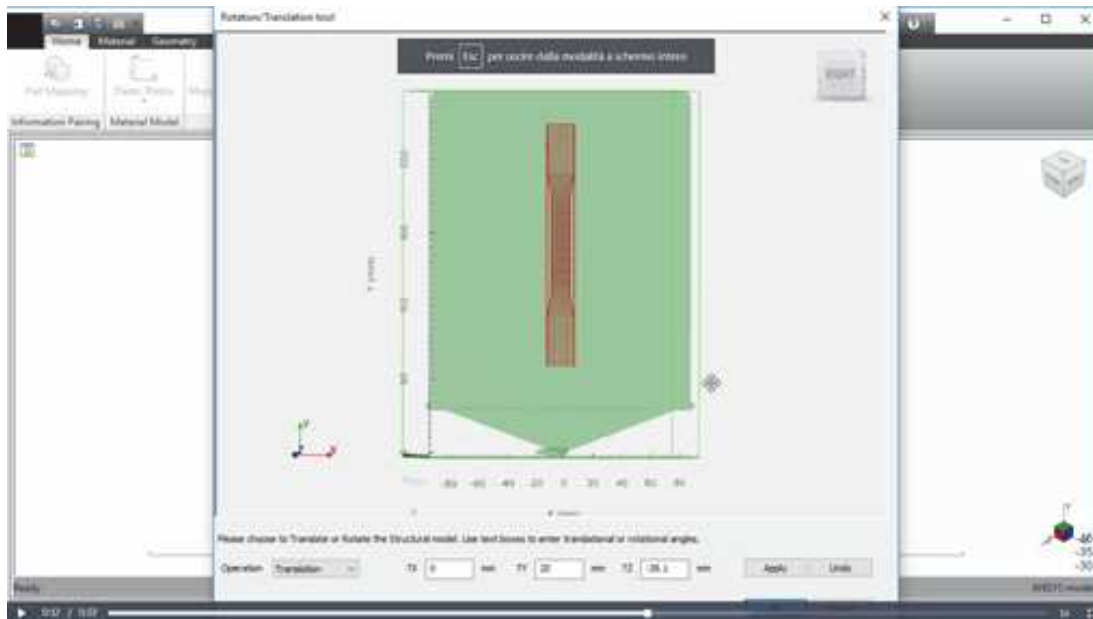
6. Allineamento del modello (SVAR)



Compare una seconda finestra → scegliere YES (Si può alternatively cliccare GEOMETRY → INTERACTIVE ALIGNMENT)

Ora con lo strumento di allineamento si definisce la porzione del modello Moldflow (a sinistra) che si vuole mappare nel modello strutturale (a destra).

Con i comandi *translation* e *rotation* si sposta il modello FEM in rosso (tenendo fisso il modello Moldflow in verde), con la rotella del mouse si ingrandisce la visuale, con mouse 3 si sposta la visuale e con mouse 1 si può ruotare la visuale (questi ultimi tre comandi servono solo da aiuto; muovono solo la visuale e non agiscono sulla posizione reciproca tra modello FEM e Moldflow)



7. Definizione proprietà del materiale (SVAR)

Si definisce la curva del materiale (per coppie di punti) inserendo un file csv in:

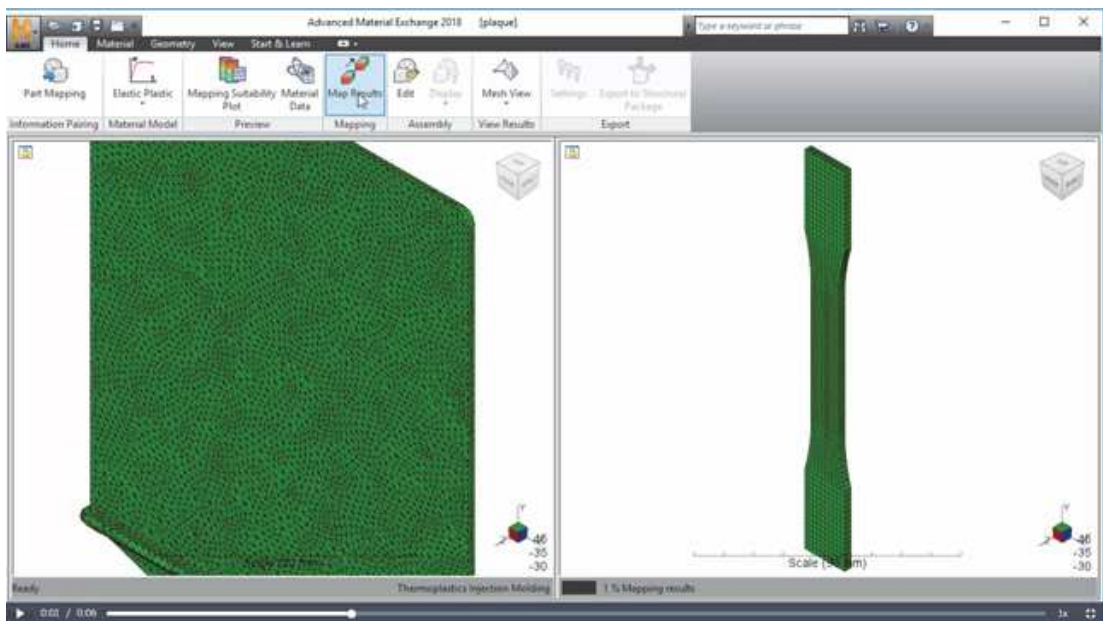
MATERIAL → ADD NON LINEAR MATERIAL → OPEN e si seleziona il file .csv

Il file csv deve essere creato rispettando le colonne e il loro ordine, come l'esempio mostrato in figura dove le colonne sono rispettivamente: la tensione, la deformazione, l'angolo, la temperatura, l'umidità e la velocità di deformazione. Nel caso in esame, vengono fornite 3 curve in successione, corrispondenti agli angoli 0, 45 e 90 gradi.

	0	0	0	22.95	50	0.03
0.1	6,77E-02	0	22.95	50	0.03	
0.2	1,35E+00	0	22.95	50	0.03	
0.3	2,03E+00	0	22.95	50	0.03	
0.4	2,71E+00	0	22.95	50	0.03	
0.5	3,38E+00	0	22.95	50	0.03	
0.6	4,06E+00	0	22.95	50	0.03	
0.7	4,74E+00	0	22.95	50	0.03	
0.8	5,41E+00	0	22.95	50	0.03	
0.9	6,09E+00	0	22.95	50	0.03	
	1	6,77E-01	0	22.95	50	0.03
1.1	7,44E+00	0	22.95	50	0.03	
1.2	8,12E+00	0	22.95	50	0.03	
1.3	8,80E+00	0	22.95	50	0.03	
1.4	9,47E+00	0	22.95	50	0.03	
1.5	0.0001014	0	22.95	50	0.03	
1.6	0.0001082	0	22.95	50	0.03	
1.7	0.0001150	0	22.95	50	0.03	
1.8	0.0001217	0	22.95	50	0.03	
1.9	0.0001285	0	22.95	50	0.03	
	2	0.0001353	0	22.95	50	0.03

8. : Mappatura dei risultati (SVAR)

Si preme poi MAP RESULT

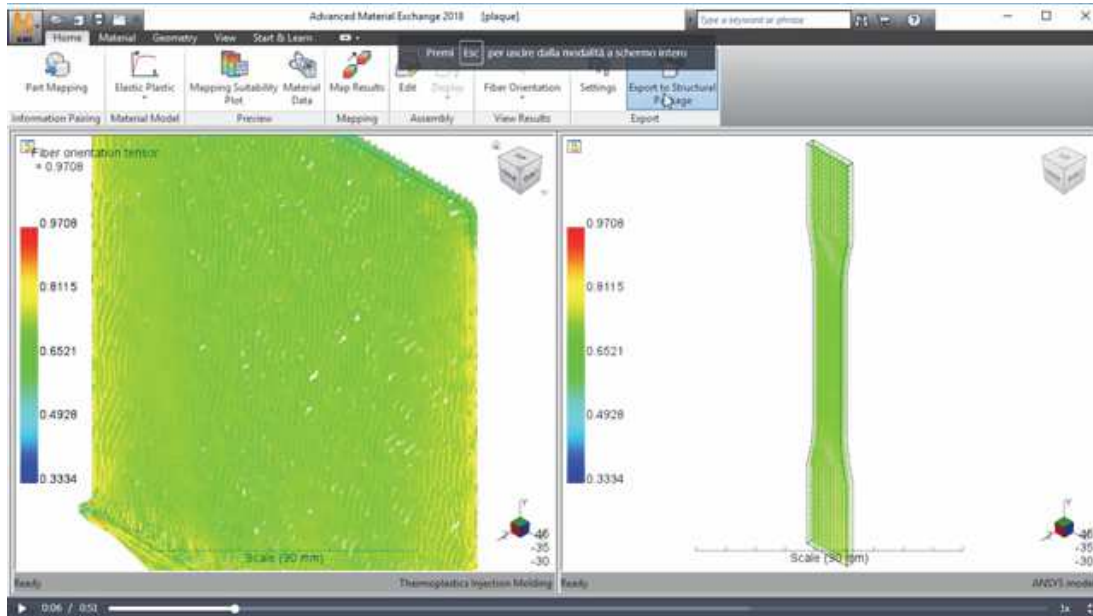


9. Esportazione del modello (SVAR)

Cliccare su HOME → EXPORT → SETTINGS

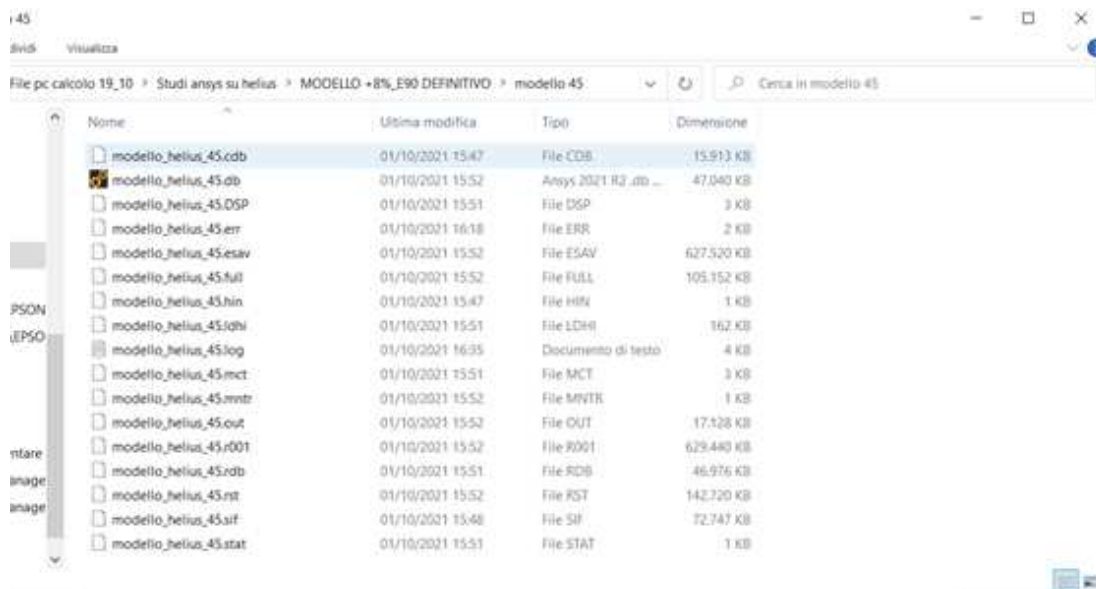
attivare la spunta relativa ad *Enable Rupture* e premere OK

Si clicca su *export structural package* e si inserisce il nome del file.cdb che verrà creato nella directory selezionata

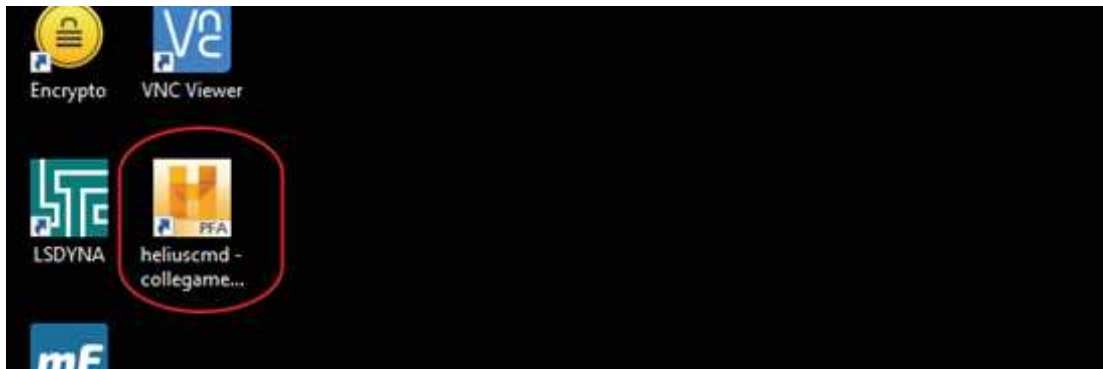


10. Lancio dell'analisi strutturale (SVAR)

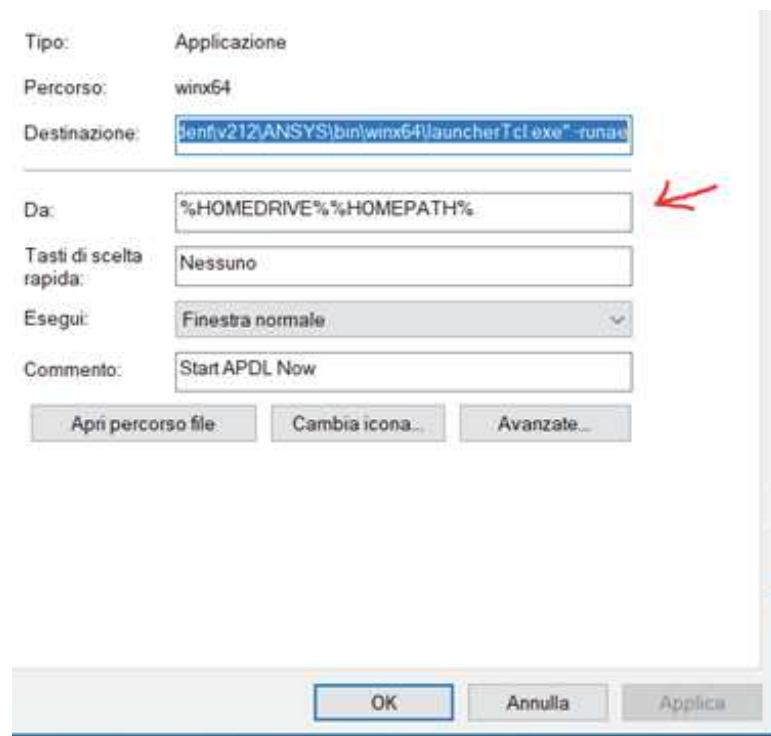
Da *explora risorse* si raggiunge la directory del file .cdb appena creato, mouse dx sul percorso e si seleziona *copia indirizzo come testo*



Si individua il programma command shell (cerchiata in rosso nella figura sotto)



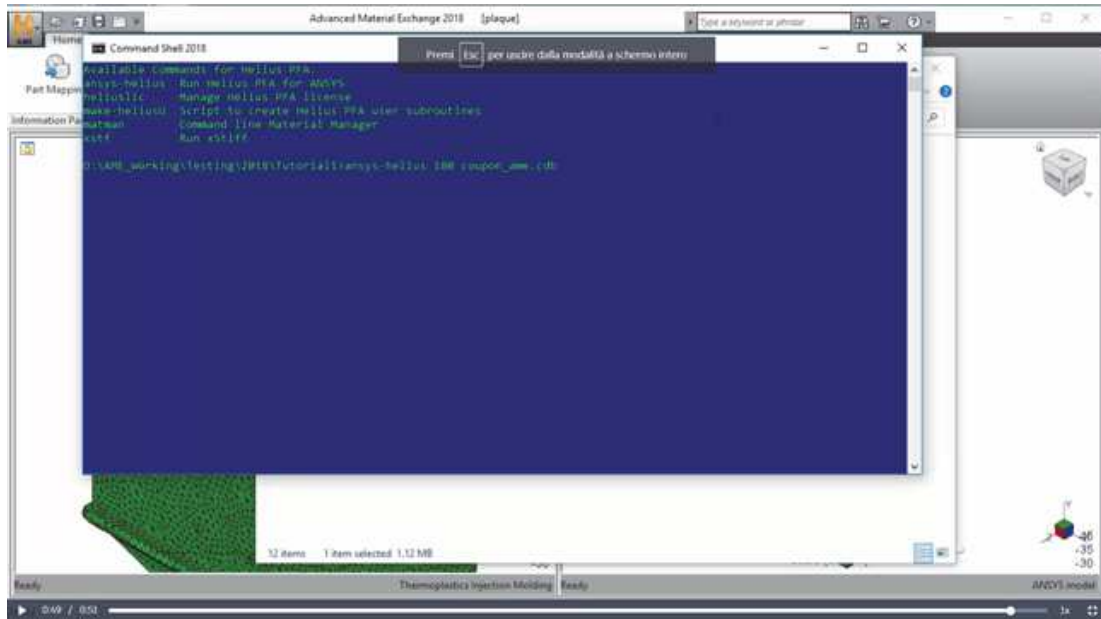
si preme MOUSE DX → PROPRIETA' e si incolla l'indirizzo precedentemente copiato in *Da:* e si preme OK



Si apre poi il *command shell* e si inserisce la seguente riga di comando e si preme invio:

- `ansys-helius 190 nome_del_file.cdb`

(190 è la versione del software che si sta usando, *nome_del_file* è il file creato al punto 9)



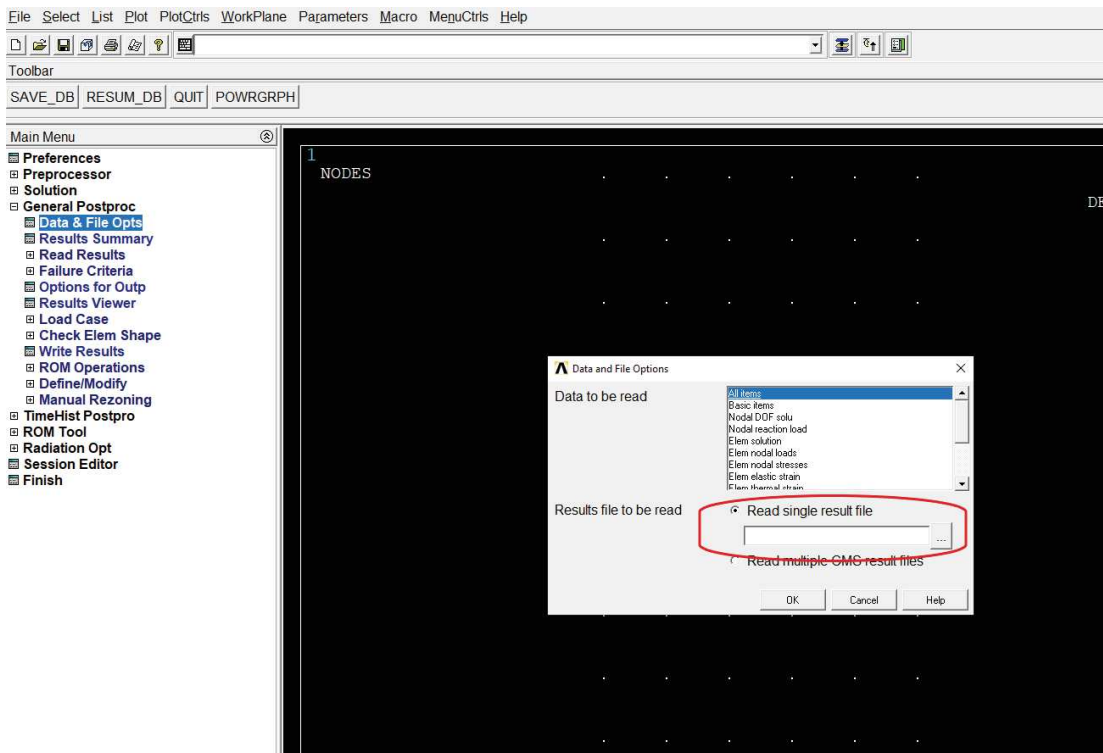
Una volta premuto invio, l'analisi termina quando compare una stringa sotto quella digitata. A questo punto il software ha generato un file.db da aprire in Ansys per la visualizzazione dei risultati.

11. Lettura dei valori SVAR (SOLO SVAR)

Si apre con Ansys il file creato al termine dell'analisi lanciata al punto precedente (punto 10) e dal **post-processor**:

GENERAL POSTPROC → DATA FILE OPTS → READ RESULTS

e si inserisce nel riquadro cerchiato in rosso nell'immagine sotto, il file .rst dei risultati generato al termine dell'analisi di cui al punto 10



Dovremmo poi selezionare il set dei risultati corretto. Nel nostro caso il set che ci interessa è l'ultimo creato, perciò:

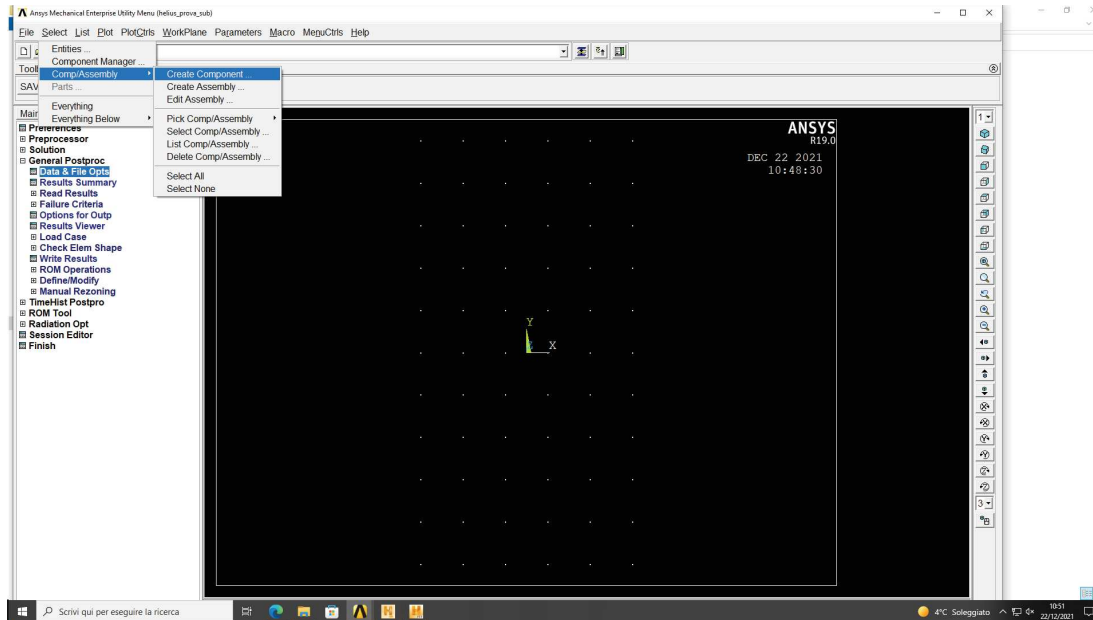
GENERAL POSTPROC → READ RESULTS → LAST SET

Bisogna poi selezionare i nodi di cui si intende ricavare i risultati tramite il comando:

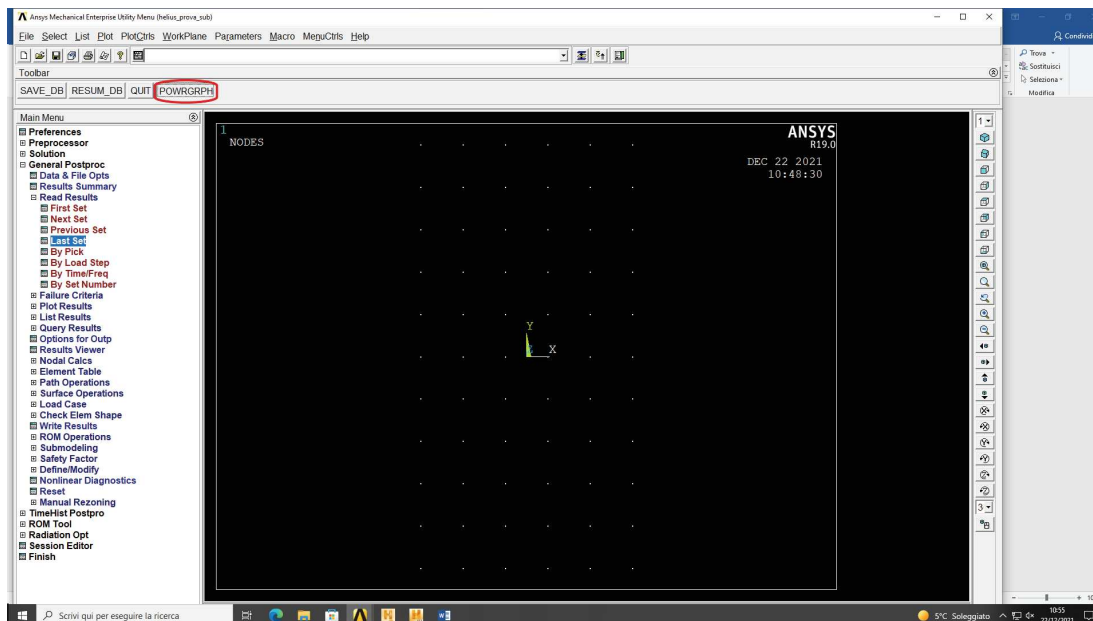
SELECT → ENTITIES

Si crea poi una *component* con:

SELECT → COMP/ASSEMBLY → CREATE COMPONENT



Si preme poi il tasto POWRGRPH cerchiato in rosso nella figura sotto



Si seleziona la spunta OFF → OK

A questo punto dal prompt dei comandi si digita la seguente istruzione:

- PRNSOL, SVAR, 3

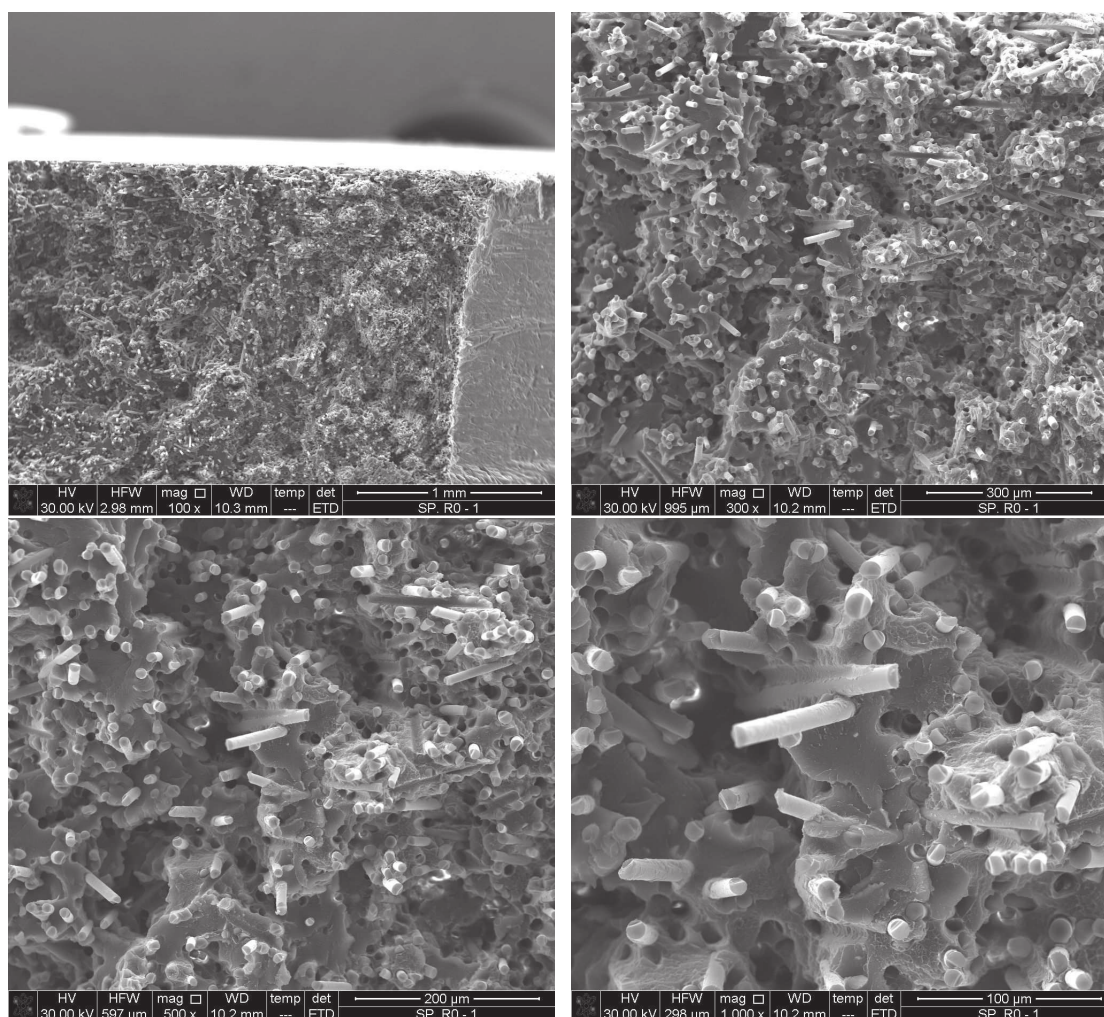
Che mostra i valori di SVAR 3 dei nodi selezionati all'inizio del punto 11. Se si vuole ricavare gli SVAR 4 ad esempio, basta sostituire il 3 con il 4 nella stringa di comando qui sopra, e così via. Viene mostrata nella figura qui sotto una lista con una rapida descrizione dei valori SVAR. Per maggiori dettagli si rimanda alla [guida online di Helius PFA](#).

SVAR	Description
SVAR1	Gauss point degradation status (1 = Not Ruptured, 2 = Ruptured)
SVAR2	For internal use only
SVAR3	Local matrix 11 stress
SVAR4	Local matrix 22 stress
SVAR5	Local matrix 33 stress
SVAR6	Local matrix 12 stress
SVAR7	Local matrix 13 stress
SVAR8	Local matrix 23 stress
SVAR9	Matrix tangent modulus
SVAR10	Matrix effective plastic strain
SVAR11	Matrix effective stress
SVAR12	Weld surface strength reduction factor. This variable is only applicable to analyses that have weld surfaces activated. It is useful for visualizing the location of weld surfaces in your part and understanding the reduction in strength applied to each element on the weld surface.
SVAR13	Matrix failure criterion index. This variable is a continuous real variable that ranges from 0.0 to 1.0. It is used to indicate the fraction of the matrix failure criterion that has been satisfied. For example, when SVAR13 = 0.0, the matrix stress state is zero. When SVAR13 = 1.0, the matrix stress state has initiated failure. SVAR13 is computed as the left hand side of Eq. 9 in The Rupture Model.
SVAR14	Failure mode. S0V14 = 0 represents no failure, SVAR14 = 1 represents a tensile failure, and SVAR14 = 2 represents a compressive failure. <i>Note:</i> If the material is forced to use a tensile response under compressive stress state, SVAR14 will report the failure mode as tensile.
SVAR15	Stress drop parameter μ for a failed integration point under a compressive stress state. S0V15 will range from 0.0 = μ = 1.0.
SVAR16	Fiber filled materials: Aspect ratio of the fiber. Unfilled materials: Stress State. SVAR16 = 1 represents a tensile dominated stress state and SVAR16 = 2 represents a compressive dominated stress state.
SVAR17	Fiber volume fraction
SVAR18	1st eigenvalue of the fiber orientation tensor
SVAR19	2nd eigenvalue of the fiber orientation tensor
SVAR20	3rd eigenvalue of the fiber orientation tensor
SVAR21	Stress State. SVAR21 = 1 represents a tensile dominated stress state and SVAR21 = 2 represents a compressive dominated stress state.

B

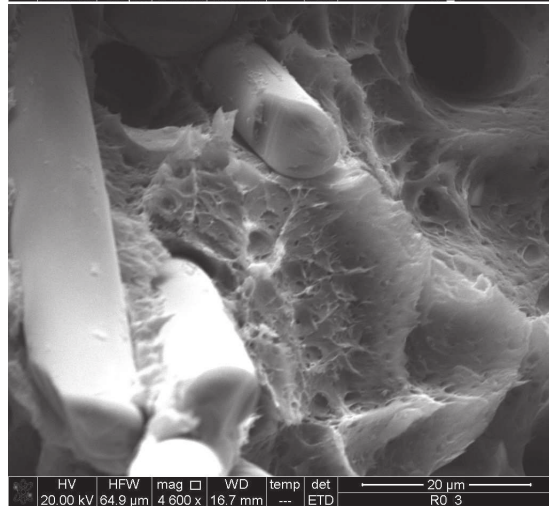
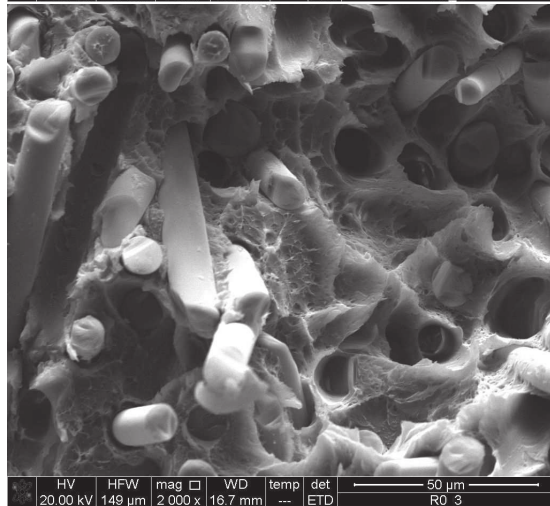
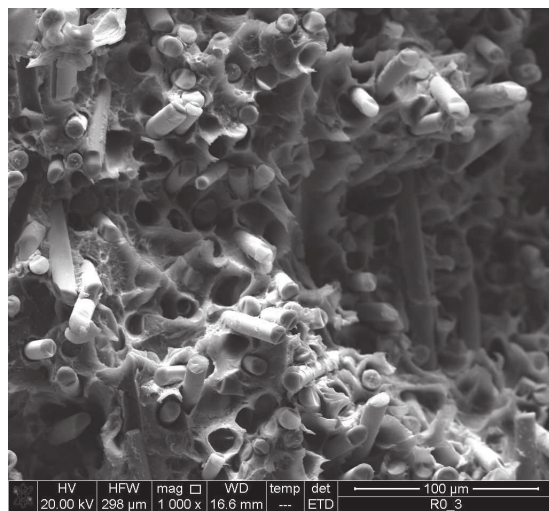
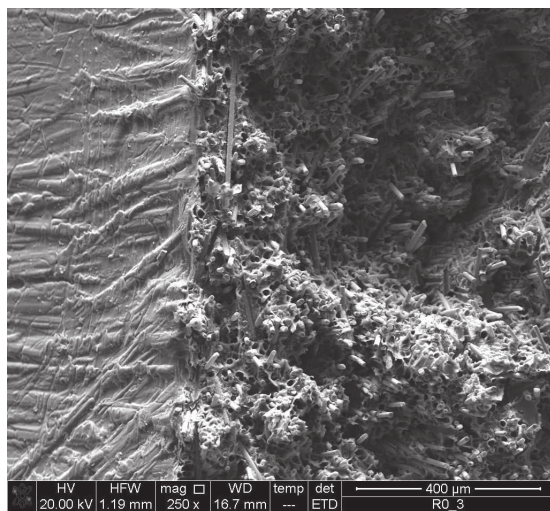
Schede provino

Nome Provino	<i>R0_1</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	20.32	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.100	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.182
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	102.0	$v[mm/min]$	2
Note			



Nome Provino	<i>R0_2</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	20.22	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.163	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.170
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	105.7	$v[mm/min]$	2
Note			

Nome Provino	<i>R0_3</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	20.36	$t[mm]$	1.90
$Raggio\ SX[mm]$	0.140	$Raggio\ DX[mm]$	0.164
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	102.6	$v[mm/min]$	2
Note			

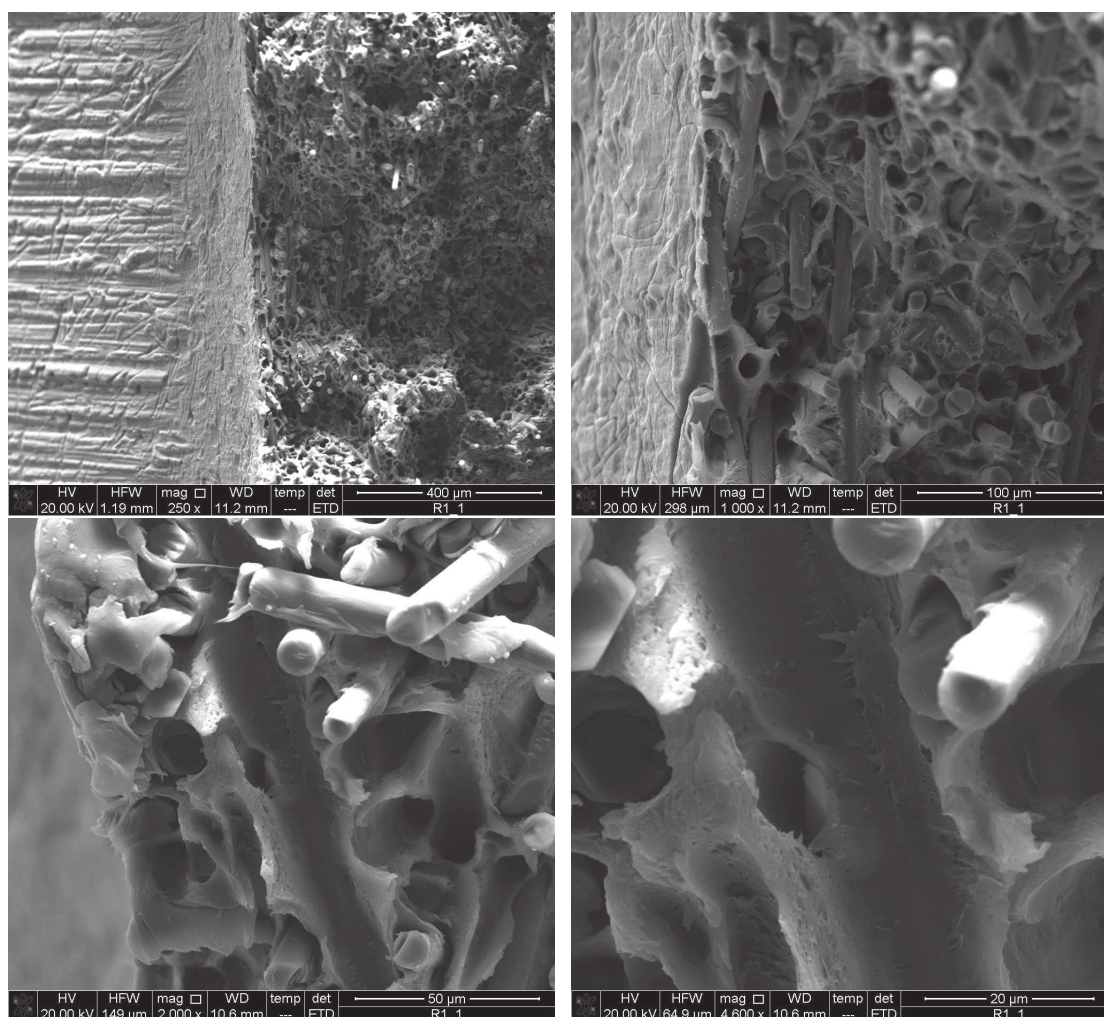


Nome Provino	<i>R0_4</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	20.33	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.227	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.226
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	/	$v[mm/min]$	2
Note			

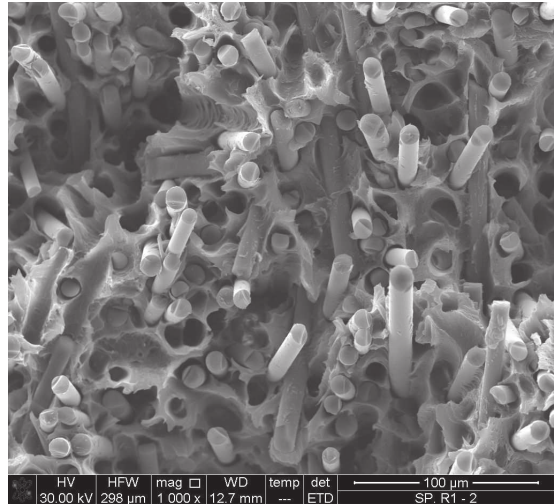
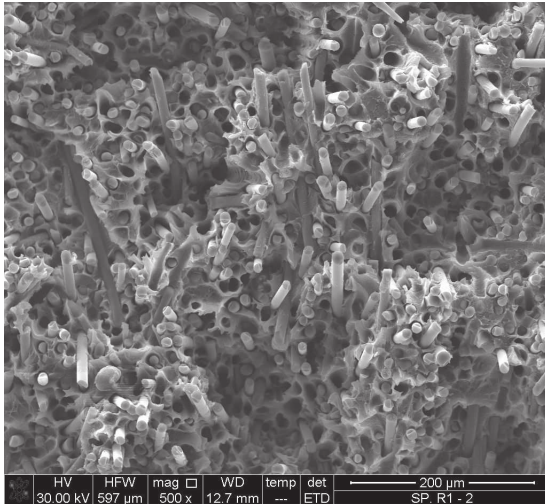
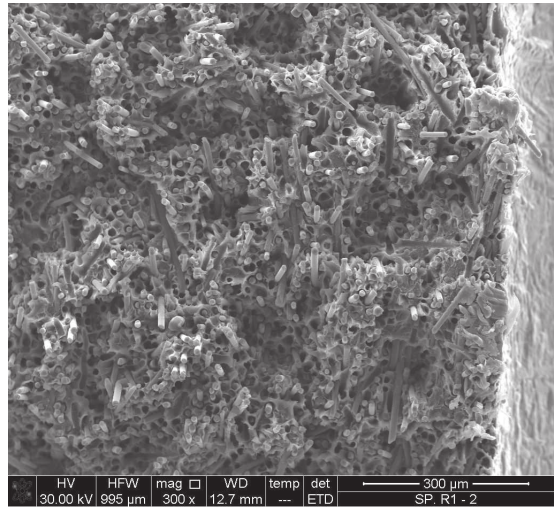
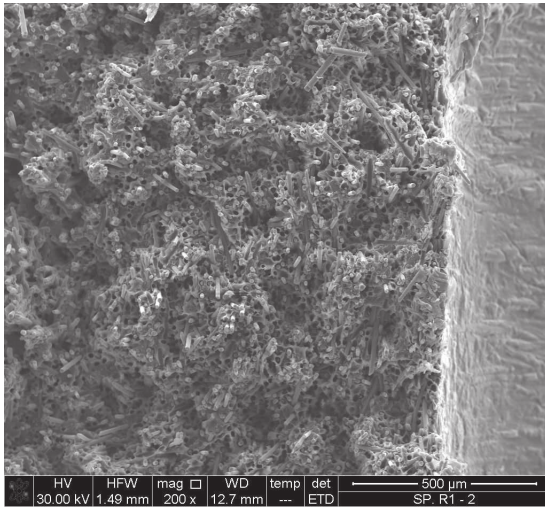
Nome Provino	<i>R0_5</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
<i>w_{net}</i> [mm]	20.30	<i>t</i> [mm]	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.160	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.074
Dati prova			
<i>σ_{UTS}</i> [MPa]	/	<i>v</i> [mm/min]	2
Note			

Nome Provino	<i>R0_6</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	20.37	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.103	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.089
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	/	$v[mm/min]$	2
Note			

Nome Provino	<i>R1_1</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	21.14	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	1.030	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.912
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	116.0	$v[mm/min]$	2
Note			



Nome Provino	<i>R1_2</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	21.20	$t[mm]$	1.85
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.992	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.933
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	119.8	$v[mm/min]$	2
Note			



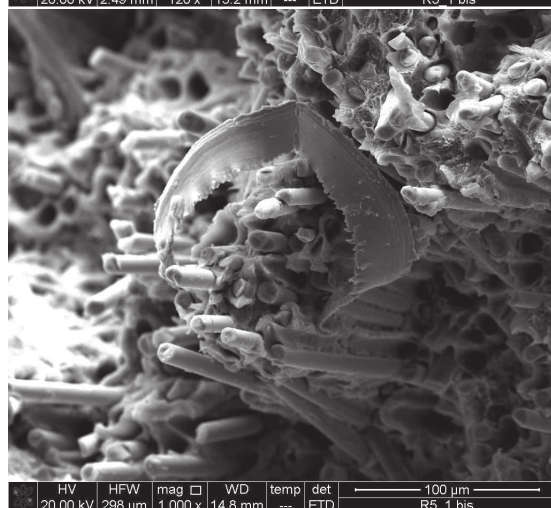
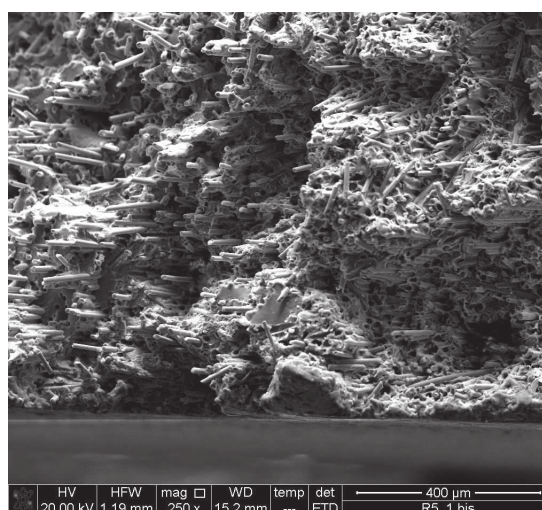
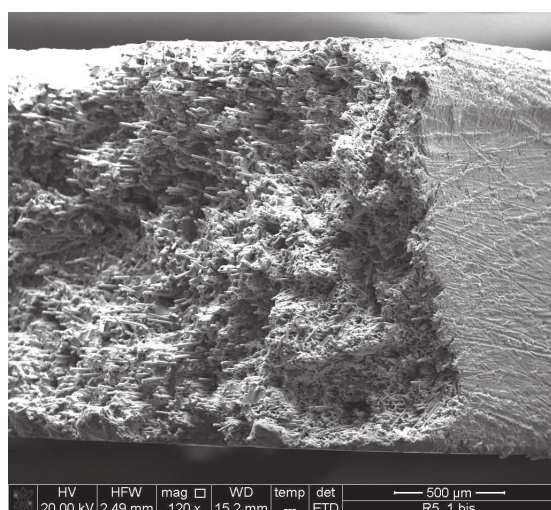
Nome Provino	<i>R1_3</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
<i>w_{net}</i> [mm]	21.05	<i>t</i> [mm]	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	1.015	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.972
Dati prova			
<i>σ_{UTS}</i> [MPa]	107.6	<i>v</i> [mm/min]	2
Note			

Nome Provino	<i>R1_4</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	21.06	$t[mm]$	1.85
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.971	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.929
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	/	$v[mm/min]$	2
Note			

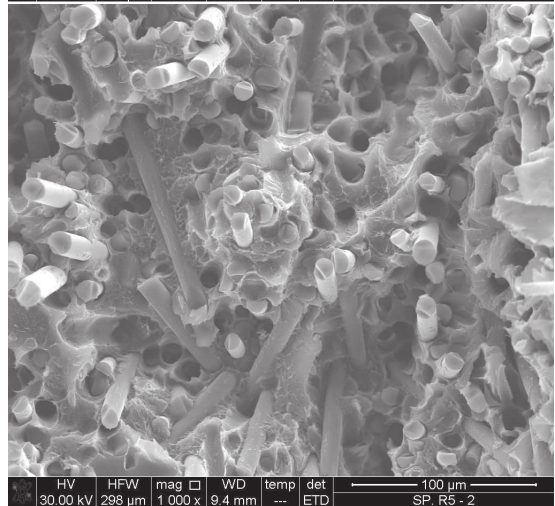
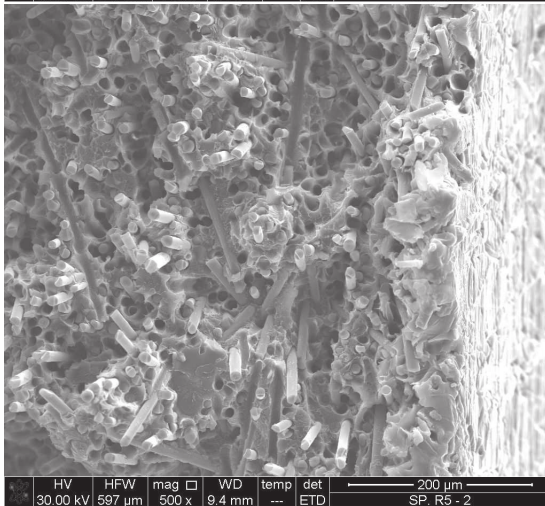
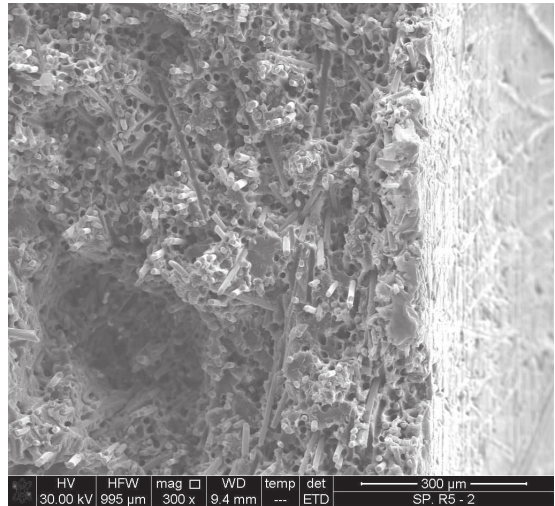
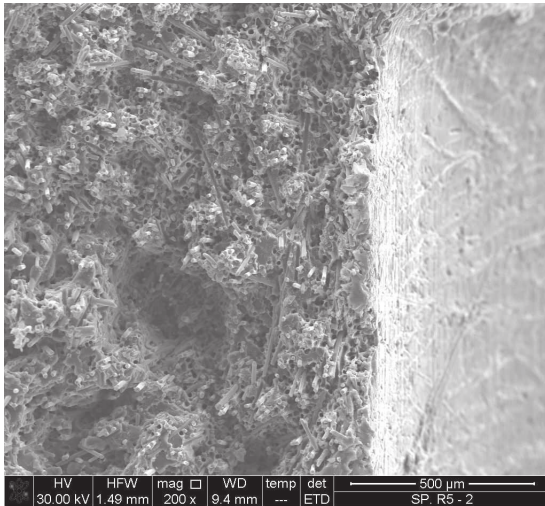
Nome Provino	<i>R1_5</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
<i>w_{net}</i> [mm]	21.17	<i>t</i> [mm]	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	1.009	<i>Raggio DX</i> [mm]	1.000
Dati prova			
<i>σ_{UTS}</i> [MPa]	110.6	<i>v</i> [mm/min]	2
Note			

Nome Provino	<i>R1_6</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	21.22	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	0.993	<i>Raggio DX</i> [mm]	0.946
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	/	$v[mm/min]$	2
Note			

Nome Provino	<i>R5_1</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	26.85	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	4.690	<i>Raggio DX</i> [mm]	4.840
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	106.0	$v[mm/min]$	2
Note			



Nome Provino	<i>R5_2</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	27.13	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	4.786	<i>Raggio DX</i> [mm]	4.806
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	104.1	$v[mm/min]$	2
Note			



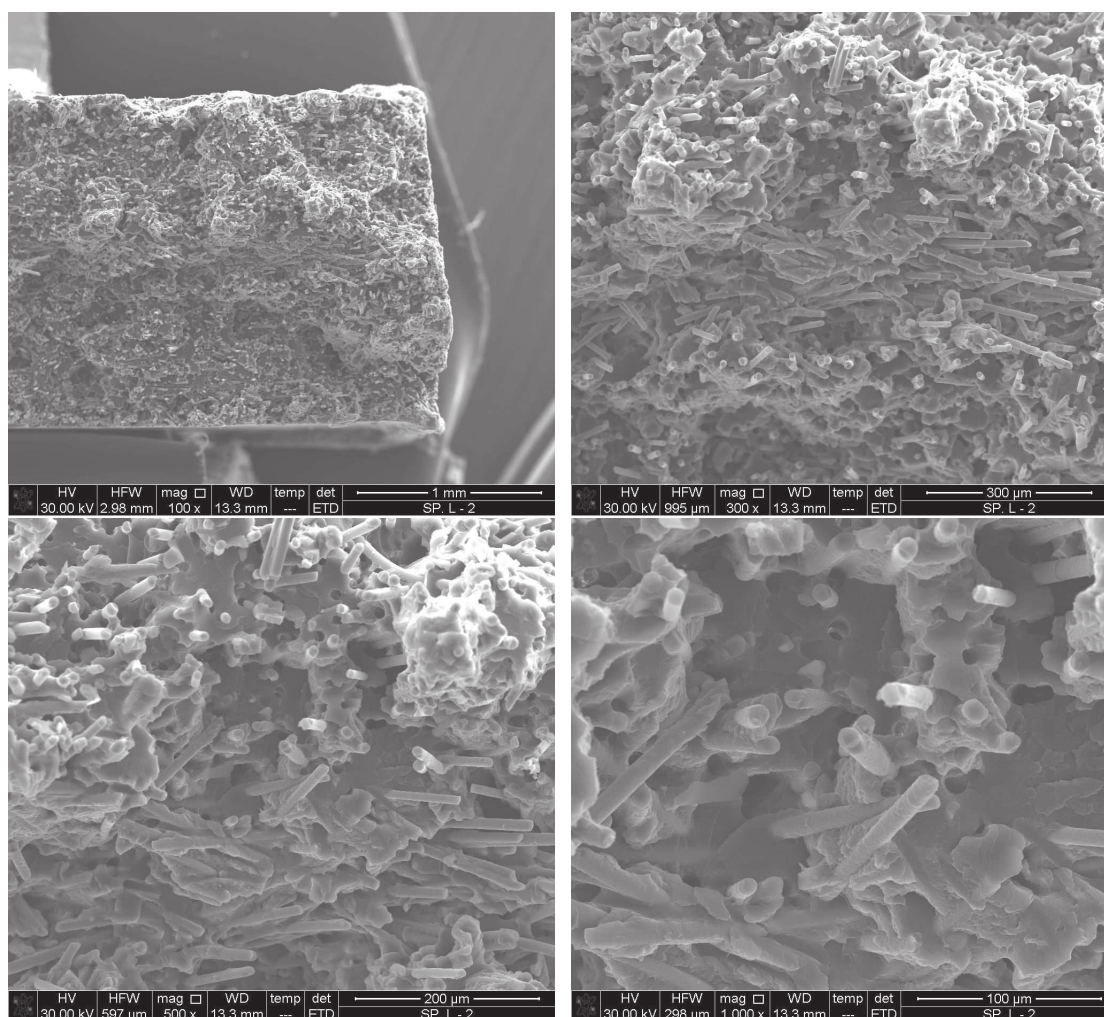
Nome Provino	<i>R5_3</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
<i>w_{net}</i> [mm]	26.71	<i>t</i> [mm]	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	4.764	<i>Raggio DX</i> [mm]	4.820
Dati prova			
<i>σ_{UTS}</i> [MPa]	112.1	<i>v</i> [mm/min]	2
Note			

Nome Provino	<i>R5_5</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	26.92	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	4.667	<i>Raggio DX</i> [mm]	4.599
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	/	$v[mm/min]$	2
Note			

Nome Provino	<i>R5_6</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	26.80	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	4.735	<i>Raggio DX</i> [mm]	4.653
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	/	$v[mm/min]$	2
Note			

Nome Provino	<i>L1</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	12.44	$t[mm]$	1.95
<i>Raggio SX</i> [mm]	/	<i>Raggio DX</i> [mm]	/
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	146.6	$v[mm/min]$	2
Note			

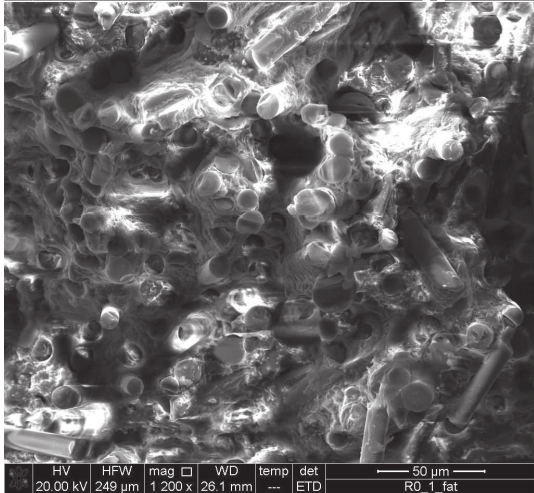
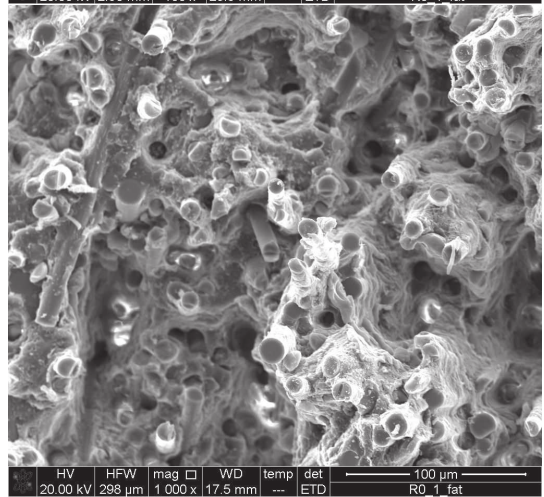
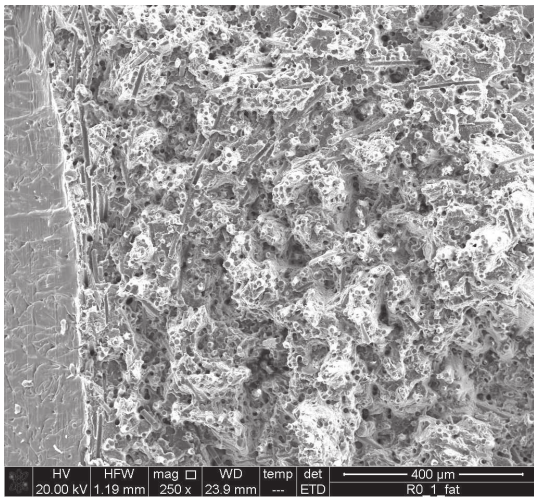
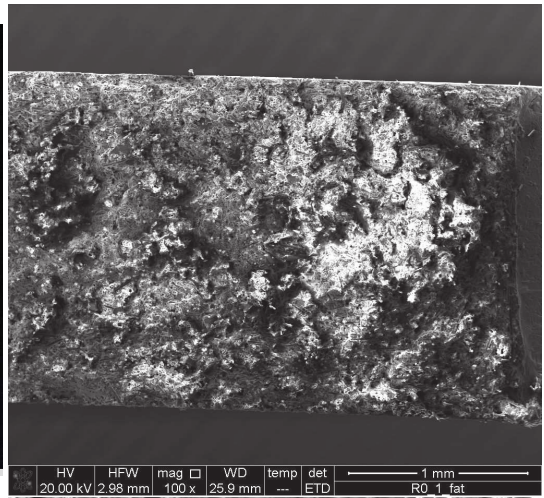
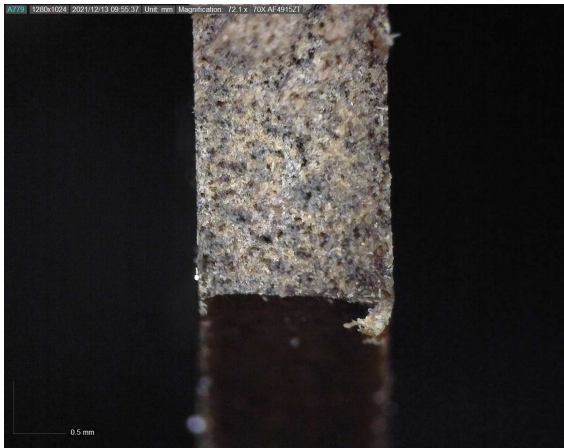
Nome Provino	<i>L2</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	12.44	$t[mm]$	1.95
<i>Raggio SX</i> [mm]	/	<i>Raggio DX</i> [mm]	/
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	147.2	$v[mm/min]$	2
Note			



Nome Provino	<i>L3</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	statica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
$w_{net}[mm]$	12.45	$t[mm]$	1.90
<i>Raggio SX</i> [mm]	/	<i>Raggio DX</i> [mm]	/
Dati prova			
$\sigma_{UTS}[MPa]$	150.8	$v[mm/min]$	2
Note			

Nome Provino	<i>R0_1_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.96	<i>a</i> [mm]	1.98
<i>p</i> [mm]	0,18	<i>p</i> [mm]	0.17
<i>Sezione net.</i> [mm]	35.67	<i>t</i> [mm]	1,8
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	6
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	28	<i>a_i</i> [mm]	0.26
<i>N_i</i>	2000	<i>N_R</i>	23624
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	8.5	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.102581895	<i>F_{min}</i> [KN]	0.105129095
Note			





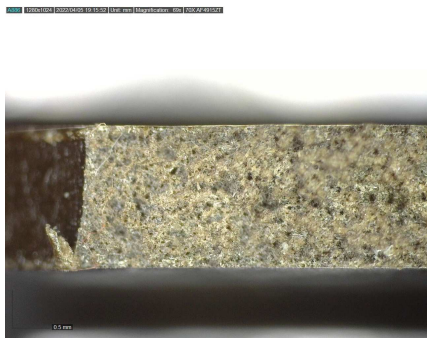
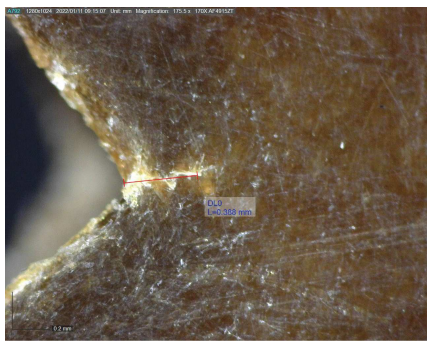
Nome Provino	<i>R0_2_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.93	<i>a</i> [mm]	2.04
<i>p</i> [mm]	0.23	<i>p</i> [mm]	0.16
<i>Sezione net.</i> [mm]	35.70	<i>t</i> [mm]	1,8
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25	<i>a_i</i> [mm]	0.11
<i>N_i</i>	20000	<i>N_R</i>	96414
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	20,7	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	1.878726316	<i>F_{min}</i> [KN]	0.093936316
Note			



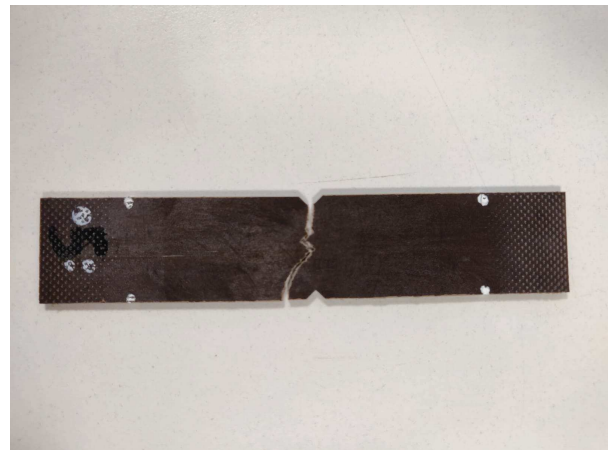
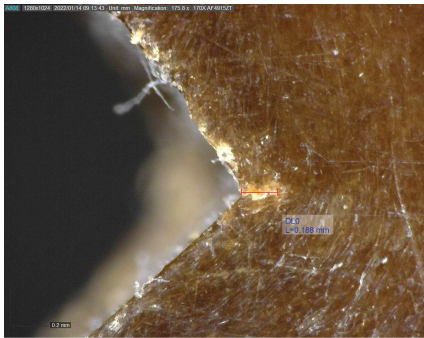
Nome Provino	<i>R0_3_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	2	<i>a</i> [mm]	2.04
<i>p</i> [mm]	0.19	<i>p</i> [mm]	0.19
<i>Sezione net.</i> [mm]	35.69	<i>t</i> [mm]	1,8
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25	<i>a_i</i> [mm]	0.27
<i>N_i</i>	20000	<i>N_R</i>	79479
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	25.2	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	1.878631579	<i>F_{min}</i> [KN]	0.093931579
Note			



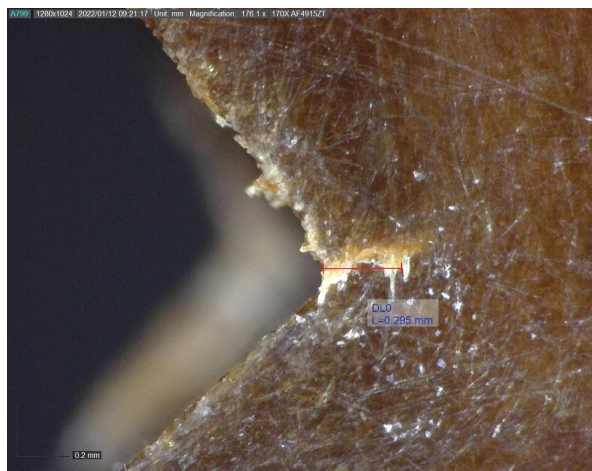
Nome Provino	<i>RO_4_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	2.05	<i>a</i> [mm]	2
<i>p</i> [mm]	0.2	<i>p</i> [mm]	0.18
<i>Sezione net.</i> [mm]	36.49	<i>t</i> [mm]	1,83
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	23.5	<i>a_i</i> [mm]	0.39
<i>N_i</i>	130000	<i>N_R</i>	211016
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	61.6	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	1.805304632	<i>F_{min}</i> [KN]	0.090265232
Note			

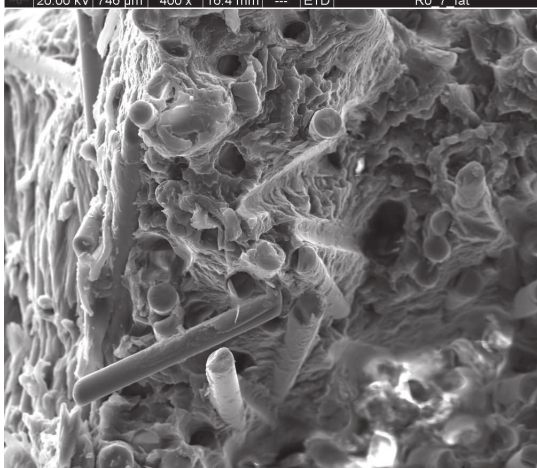
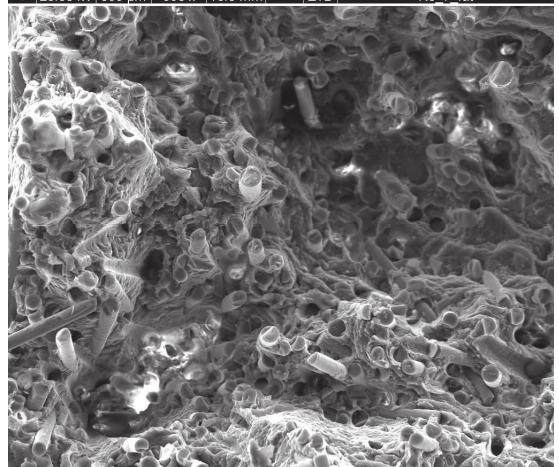
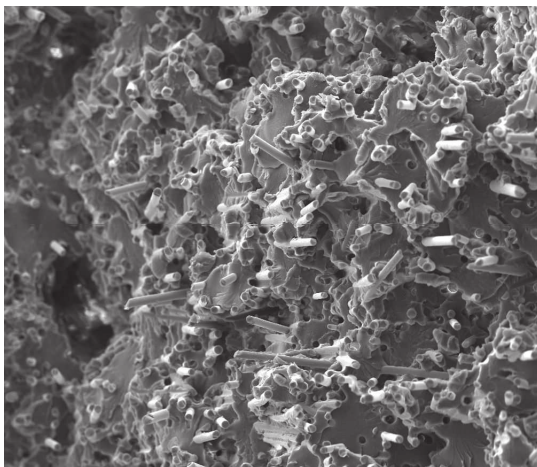
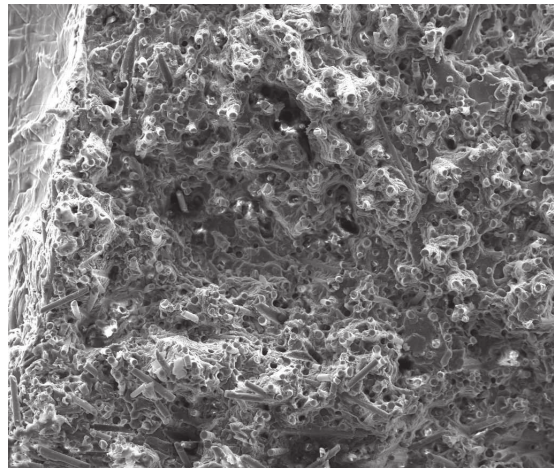


Nome Provino	<i>R0_5_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.99	<i>a</i> [mm]	1.99
<i>p</i> [mm]	0.18	<i>p</i> [mm]	0.14
<i>Sezione net.</i> [mm]	35.84	<i>t</i> [mm]	1,8
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	12
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	22	<i>a_i</i> [mm]	0.19
<i>N_i</i>	100000	<i>N_R</i>	565976
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	17.7	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	1.660115368	<i>F_{min}</i> [KN]	0.083005768
Note			



Nome Provino	<i>R0_7_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.88	<i>a</i> [mm]	1.96
<i>p</i> [mm]	0.2	<i>p</i> [mm]	0.22
<i>Sezione net.</i> [mm]	36.36	<i>t</i> [mm]	1,83
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	12
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	22	<i>a_i</i> [mm]	0.3
<i>N_i</i>	250000	<i>N_R</i>	1383040
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	18.1	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	1.684139368	<i>F_{min}</i> [KN]	0.084206968
Note			

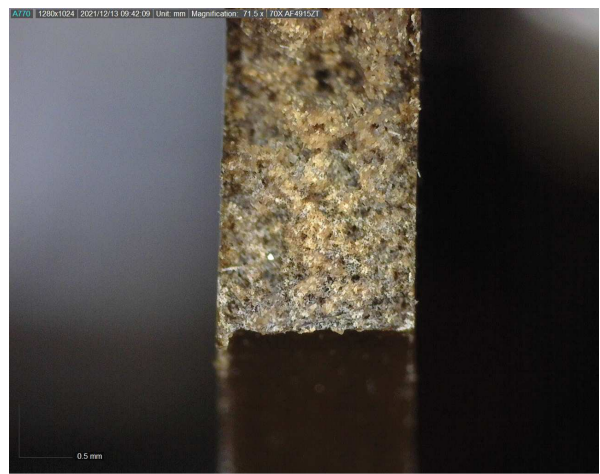
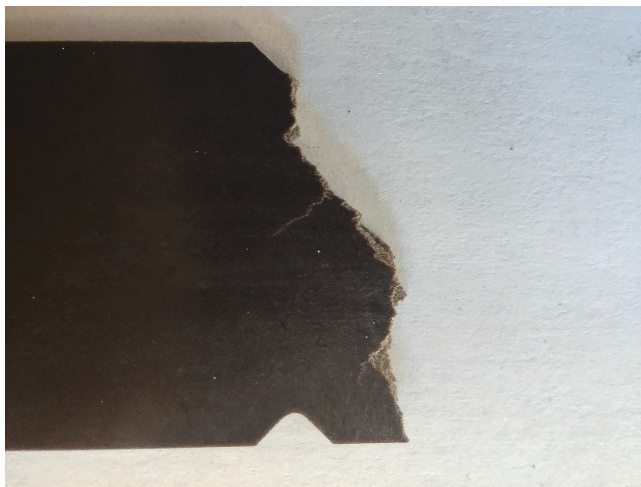


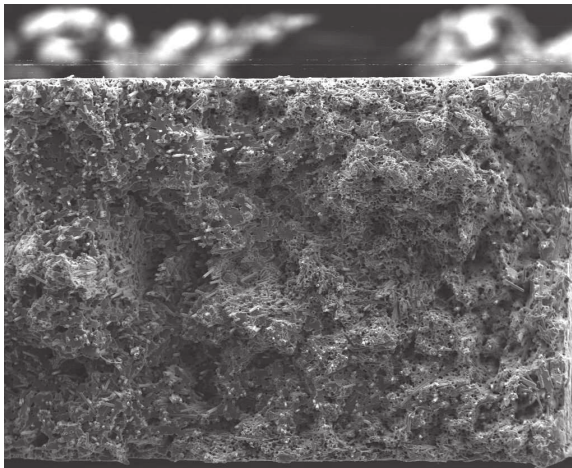


Nome Provino	<i>R1_1_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	2.02	<i>a</i> [mm]	2.10
<i>p</i> [mm]	1.02	<i>p</i> [mm]	0.97
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.27	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	6
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	22	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	/	<i>N_R</i>	/
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	/	<i>Run out</i>	2400000
<i>F_{max}</i> [KN]	1.772292211	<i>F_{min}</i> [KN]	0.088614611
Note			

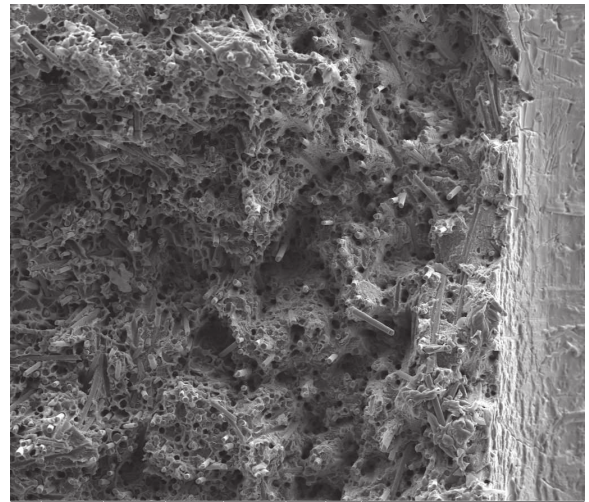
Nome Provino	<i>R1_2_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.94	<i>a</i> [mm]	1.93
<i>p</i> [mm]	0.92	<i>p</i> [mm]	0.99
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.35	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	10
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	19	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	/	<i>N_R</i>	/
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	/	<i>Run out</i>	4299144
<i>F_{max}</i> [KN]	1.533946	<i>F_{min}</i> [KN]	0.0766973
Note			

Nome Provino	<i>R1_3_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.93	<i>a</i> [mm]	1.94
<i>p</i> [mm]	1.01	<i>p</i> [mm]	1.04
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.26	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	2
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	44	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	758 *	<i>N_R</i>	758
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	3.543727579	<i>F_{min}</i> [KN]	0.177186379
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		

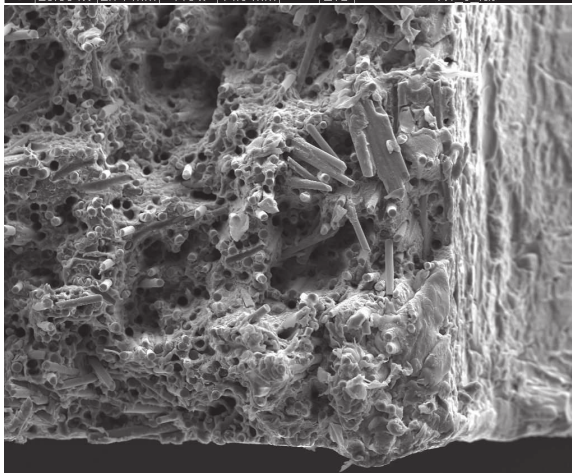




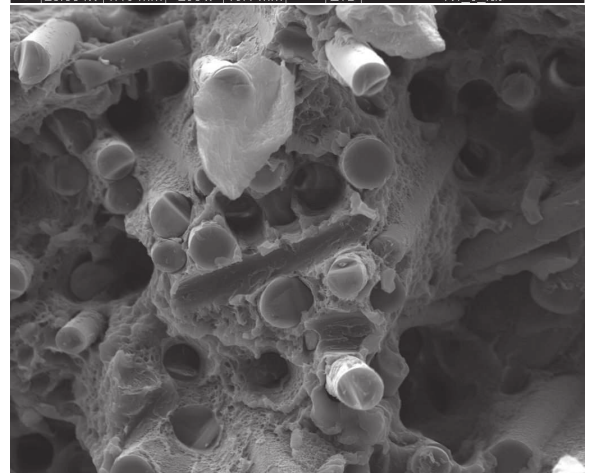
HV	HFW	mag	WD	temp	det	1 mm
20.00 kV	2.71 mm	110 x	14.9 mm	---	ETD	R1_3_fat



HV	HFW	mag	WD	temp	det	400 μm
20.00 kV	1.19 mm	250 x	15.1 mm	---	ETD	R1_3_fat

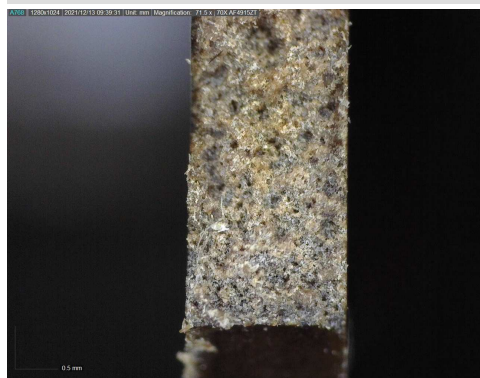
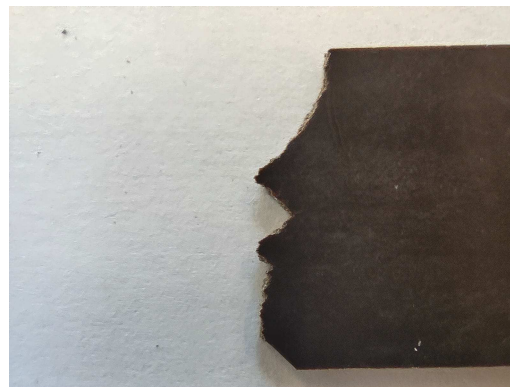


HV	HFW	mag	WD	temp	det	200 μm
20.00 kV	746 μm	400 x	14.8 mm	---	ETD	R1_3_fat



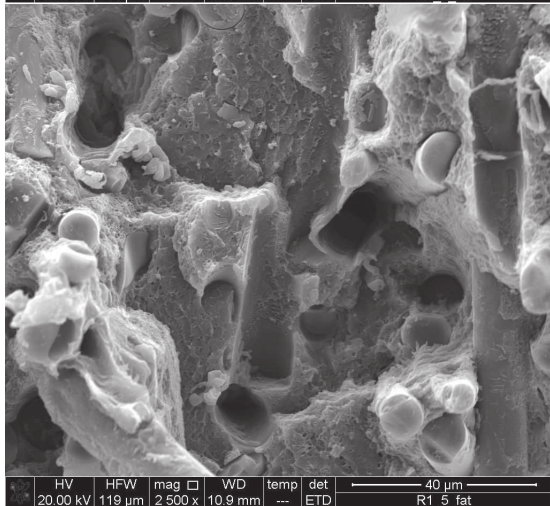
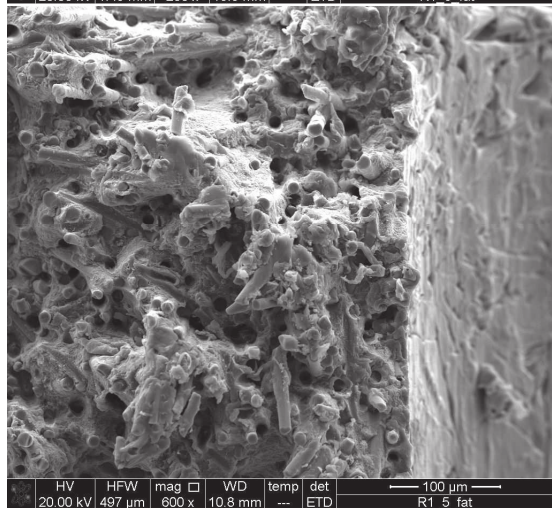
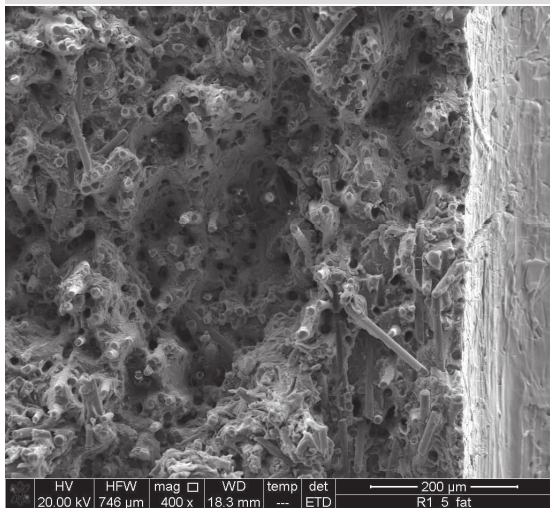
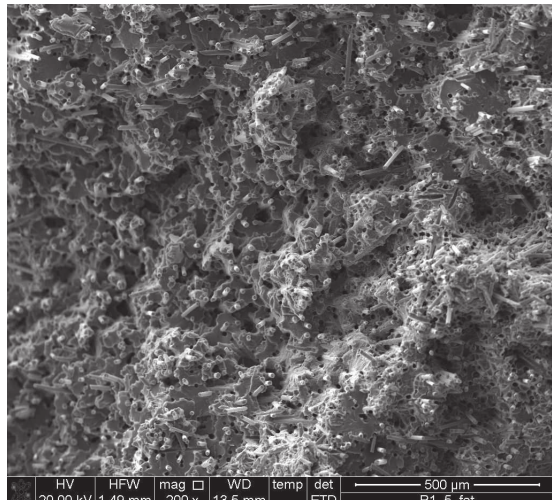
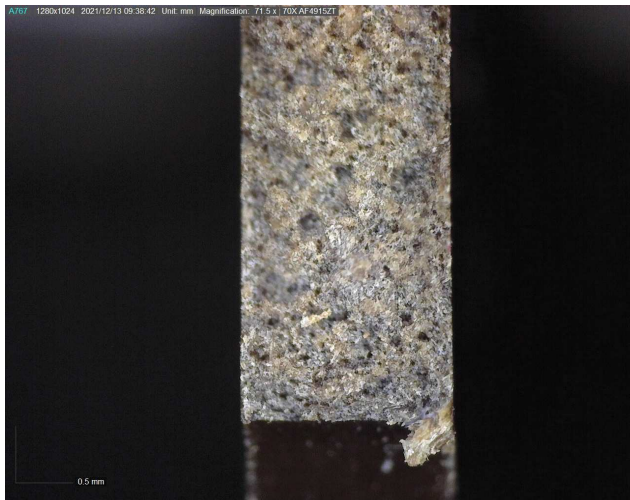
HV	HFW	mag	WD	temp	det	50 μm
20.00 kV	149 μm	2,000 x	14.9 mm	---	ETD	R1_3_fat

Nome Provino	<i>R1_4_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	2.01	<i>a</i> [mm]	2.08
<i>p</i> [mm]	0.97	<i>p</i> [mm]	1
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.31	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	2
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	33	<i>a_i</i> [mm]	0.39
<i>N_i</i>	4000	<i>N_R</i>	6108
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	65.5	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.661651474	<i>F_{min}</i> [KN]	0.133082574
Note			

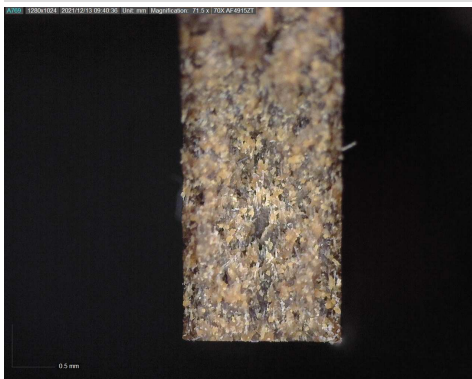
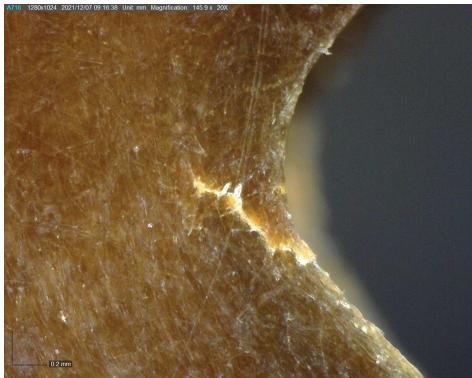


Nome Provino	<i>R1_5_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.96	<i>a</i> [mm]	2.05
<i>p</i> [mm]	0.94	<i>p</i> [mm]	1.03
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.39	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	5
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	28	<i>a_i</i> [mm]	0.23
<i>N_i</i>	30000	<i>N_R</i>	37272
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	80.5	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.262842105	<i>F_{min}</i> [KN]	0.113142105
Note			



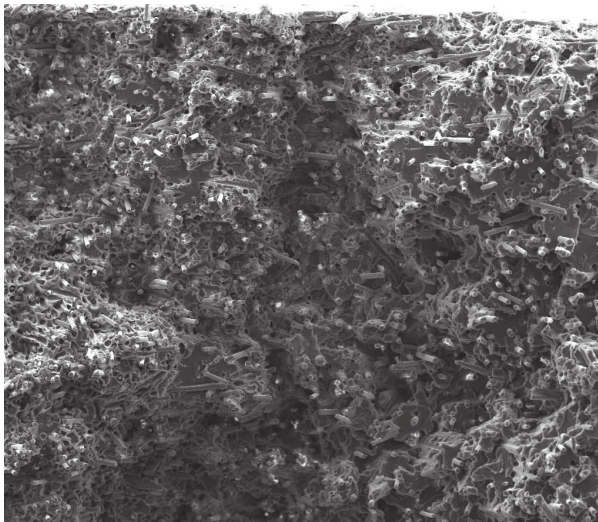


Nome Provino	<i>R1_6_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.94	<i>a</i> [mm]	1.93
<i>p</i> [mm]	0.9	<i>p</i> [mm]	0.98
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.35	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	10
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25	<i>a_i</i> [mm]	0.77
<i>N_i</i>	1650000	<i>N_R</i>	1678792
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	98.3	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.01835	<i>F_{min}</i> [KN]	0.1009175
Note			

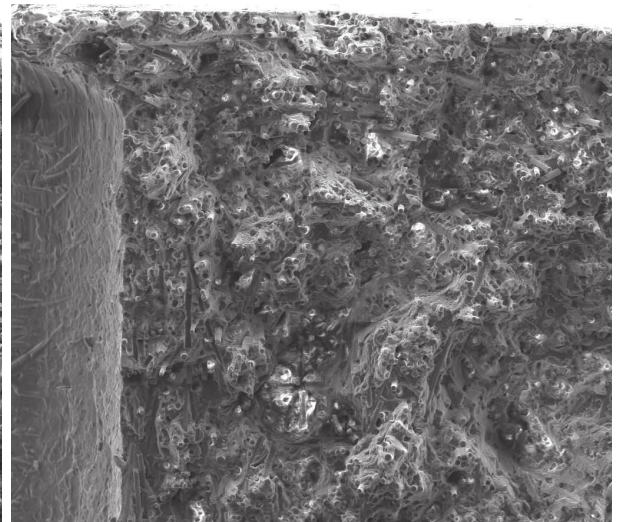


Nome Provino	<i>R1_7_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.99	<i>a</i> [mm]	2.05
<i>p</i> [mm]	0.98	<i>p</i> [mm]	0.93
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.34	<i>t</i> [mm]	1,84
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	76805 *	<i>N_R</i>	76805
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.018092632	<i>F_{min}</i> [KN]	0.100904632
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		

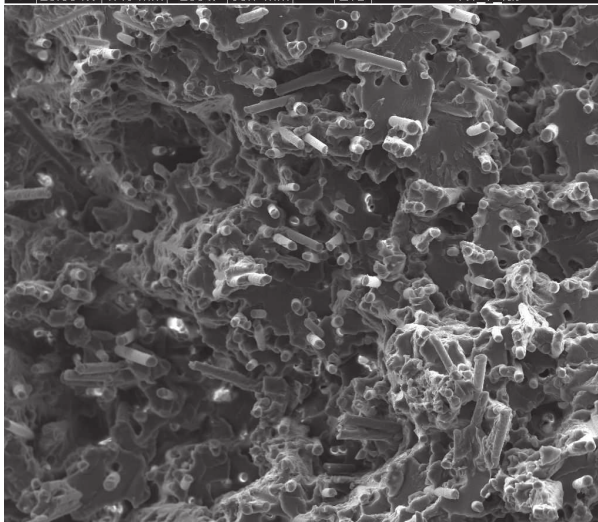




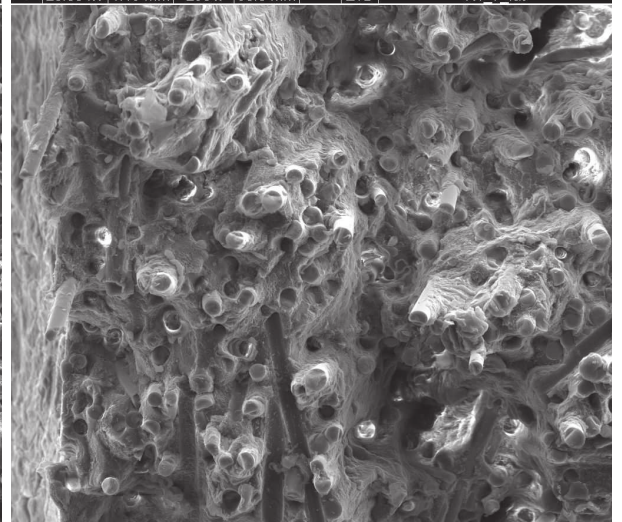
HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	1.49 mm	200 x	30.7 mm	---	ETD	500 μm
R1 7 fat						



HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	1.19 mm	250 x	30.8 mm	---	ETD	400 μm
R1 7 fat						

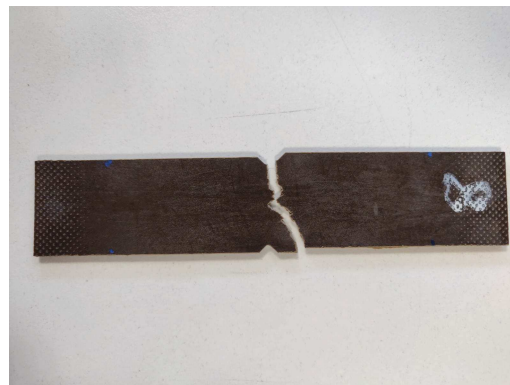
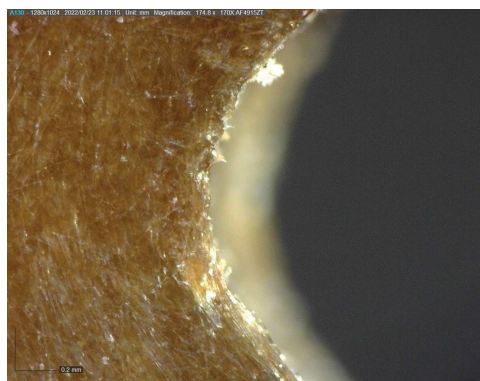


HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	746 μm	400 x	30.2 mm	---	ETD	200 μm
R1 7 fat						

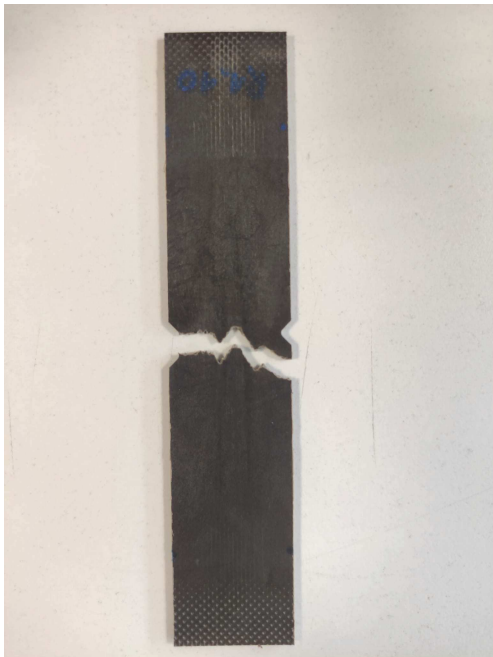


HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	373 μm	800 x	30.8 mm	---	ETD	100 μm
R1 7 fat						

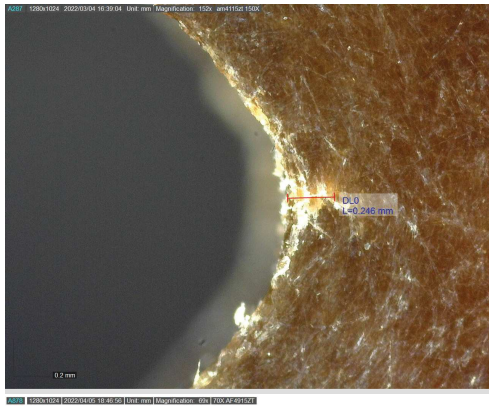
Nome Provino	<i>R1_8_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	1.98	<i>a</i> [mm]	1.99
<i>p</i> [mm]	1	<i>p</i> [mm]	1.02
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.17	<i>t</i> [mm]	1,84
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25	<i>a_i</i> [mm]	0.2
<i>N_i</i>	375000	<i>N_R</i>	401224
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	93.5	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.008989474	<i>F_{min}</i> [KN]	0.100449474
Note			



Nome Provino	<i>R1_10_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	2.05	<i>a</i> [mm]	2.03
<i>p</i> [mm]	0.91	<i>p</i> [mm]	0.9
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.25	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	37720 *	<i>N_R</i>	37720
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.013092105	<i>F_{min}</i> [KN]	0.100654605
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		



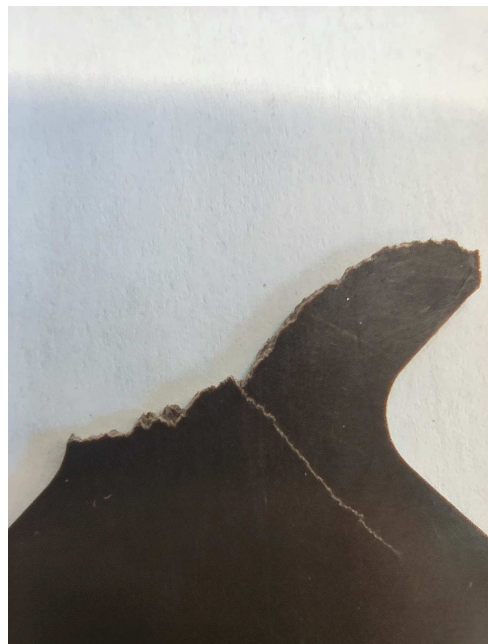
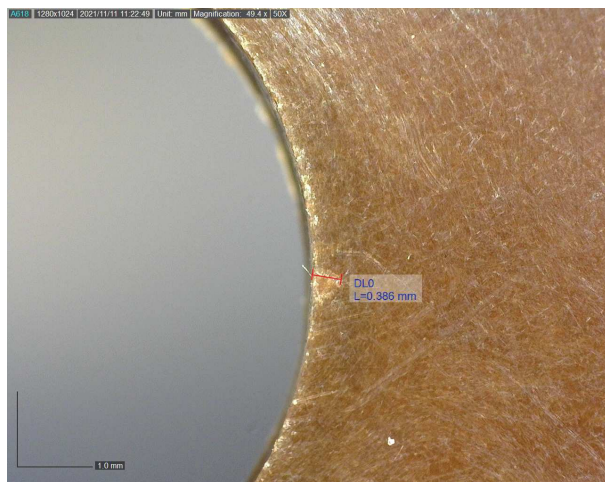
Nome Provino	<i>R1_11_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	2.05	<i>a</i> [mm]	1.92
<i>p</i> [mm]	0.99	<i>p</i> [mm]	0.88
<i>Sezione net.</i> [mm]	38.16	<i>t</i> [mm]	1,84
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25	<i>a_i</i> [mm]	0.25
<i>N_i</i>	671981	<i>N_R</i>	690002
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	97.4	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.008408421	<i>F_{min}</i> [KN]	0.100420421
Note			

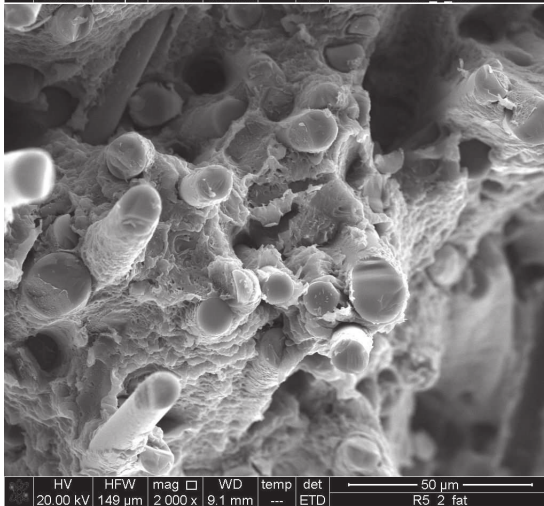
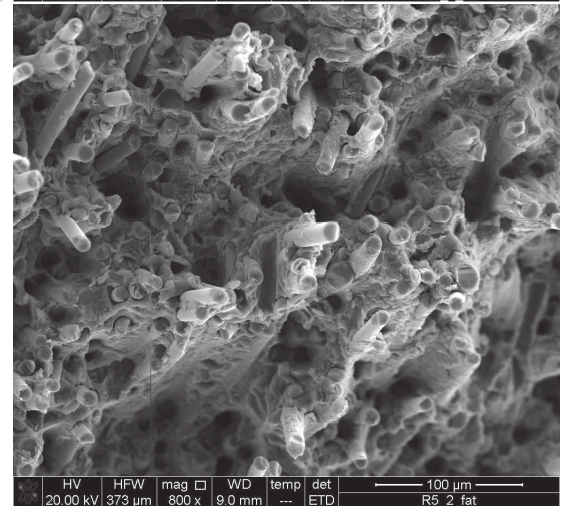
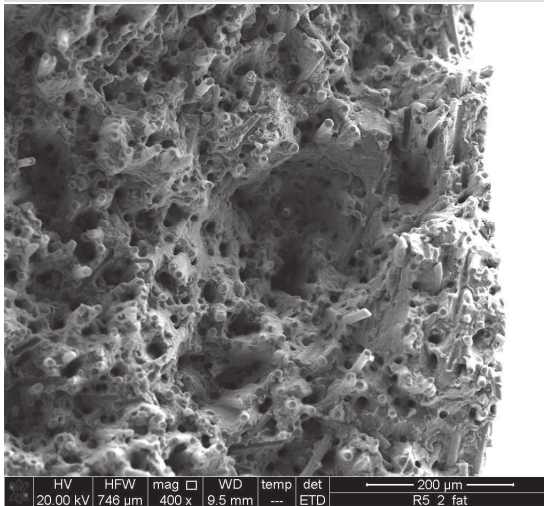
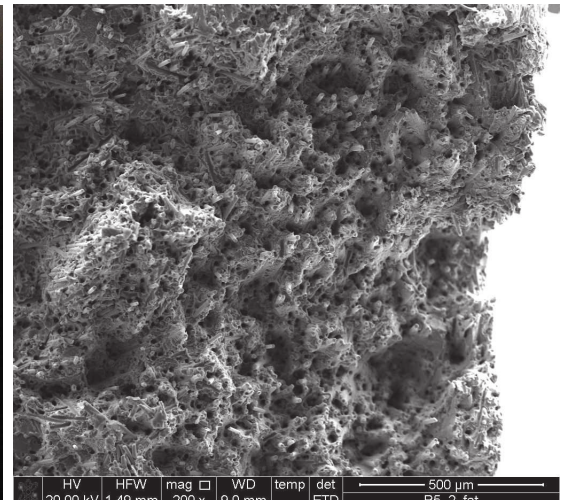
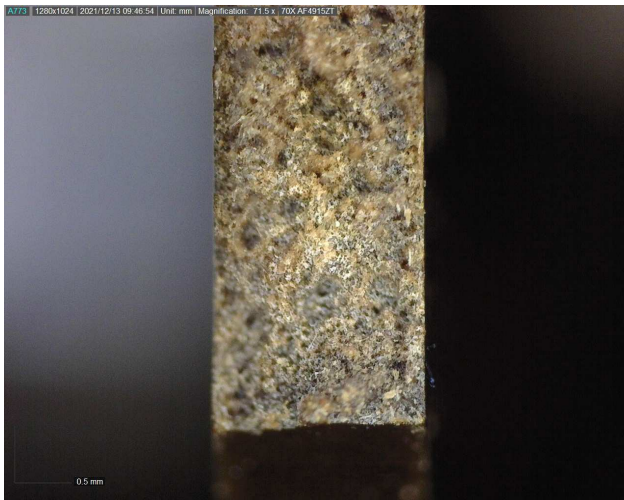


Nome Provino	<i>R5_1_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	8.39	<i>a</i> [mm]	8.84
<i>p</i> [mm]	8.39	<i>p</i> [mm]	8.84
<i>Sezione net.</i> [mm]	42.42	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	10
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	29.6	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	670924 *	<i>N_R</i>	670924
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.643236379	<i>F_{min}</i> [KN]	0.132161819
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		

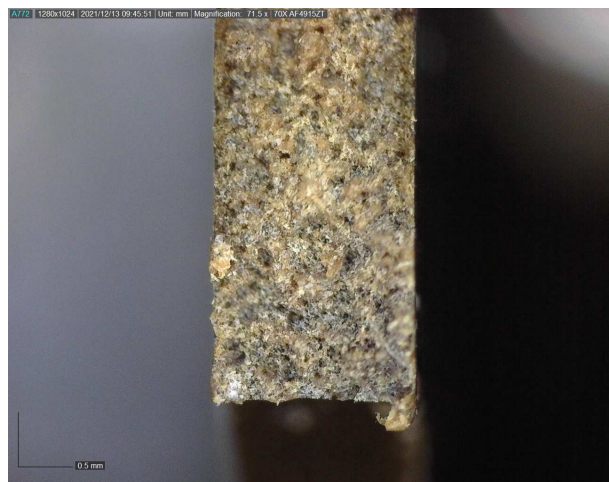


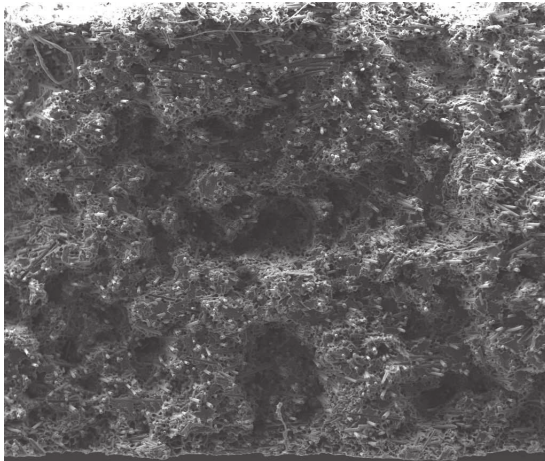
Nome Provino	<i>R5_2_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	8.46	<i>a</i> [mm]	8.67
<i>p</i> [mm]	8.46	<i>p</i> [mm]	8.67
<i>Sezione net.</i> [mm]	41.76	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	3
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	36.9	<i>a_i</i> [mm]	0.39
<i>N_i</i>	2000	<i>N_R</i>	5823
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	34.3	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	3.243809084	<i>F_{min}</i> [KN]	0.162191454
Note			



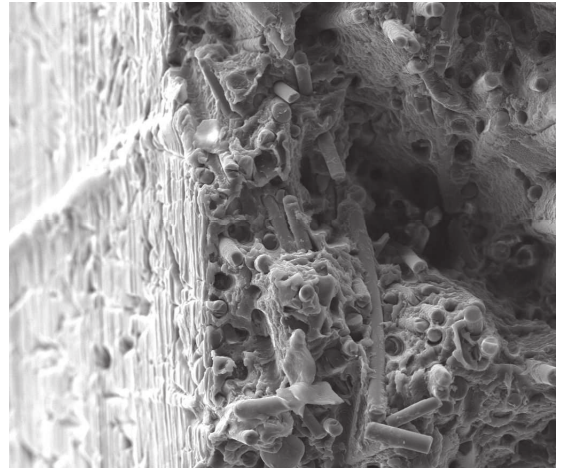


Nome Provino	<i>R5_3_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	8.31	<i>a</i> [mm]	8.54
<i>p</i> [mm]	8.31	<i>p</i> [mm]	8.54
<i>Sezione net.</i> [mm]	42.08	<i>t</i> [mm]	1,85
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	7
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	31.3	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	73639 *	<i>N_R</i>	73639
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.776156581	<i>F_{min}</i> [KN]	0.138807829
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		

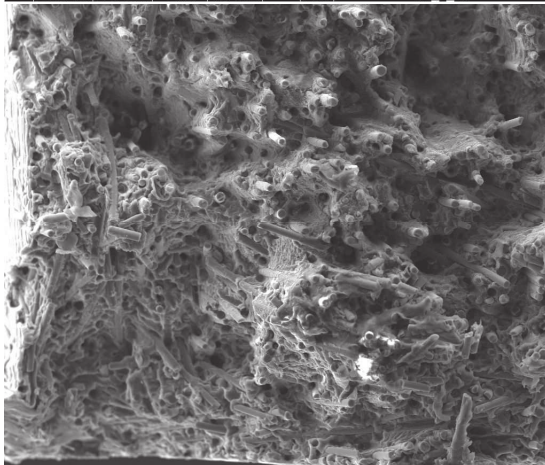




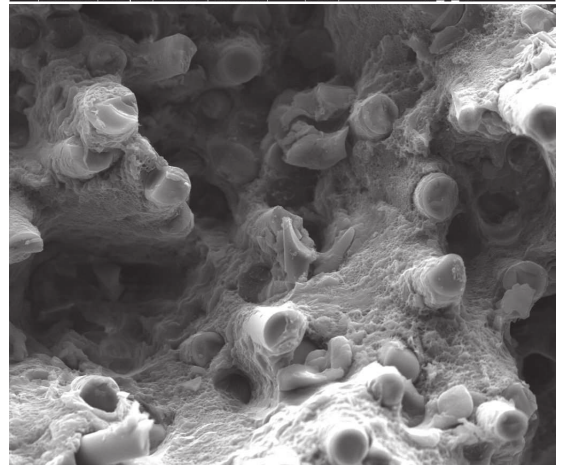
HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	2.13 mm	140 x	9.9 mm	---	ETD	500 μm
R5 3 fat						



HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	373 μm	800 x	10.1 mm	---	ETD	100 μm
R5 3 fat						



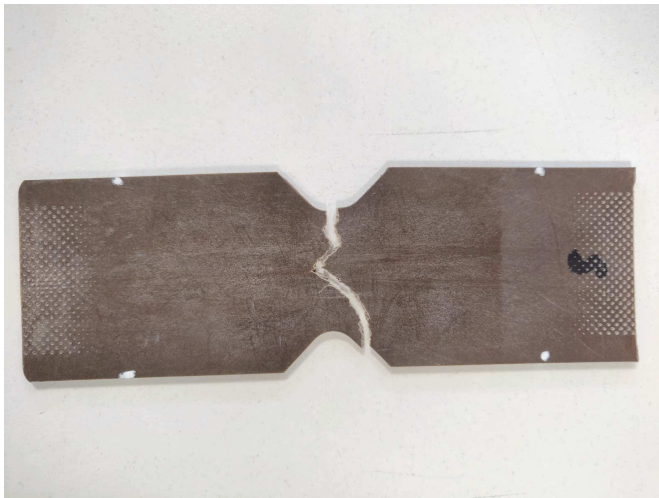
HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	746 μm	400 x	9.9 mm	---	ETD	200 μm
R5 3 fat						



HV	HFW	mag	WD	temp	det	Scale
20.00 kV	149 μm	2,000 x	10.1 mm	---	ETD	50 μm
R5 3 fat						

Nome Provino	<i>R5_4_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	7.76	<i>a</i> [mm]	7.95
<i>p</i> [mm]	7.76	<i>p</i> [mm]	7.95
<i>Sezione net.</i> [mm]	42.88	<i>t</i> [mm]	1,8
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	10
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	25.5	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	/	<i>N_R</i>	/
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	/	<i>Run out</i>	2995656
<i>F_{max}</i> [KN]	2.302054105	<i>F_{min}</i> [KN]	0.115102705
Note			

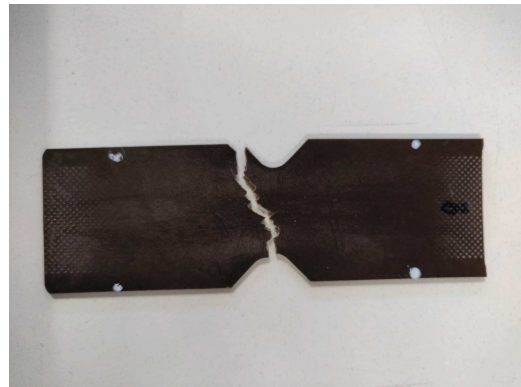
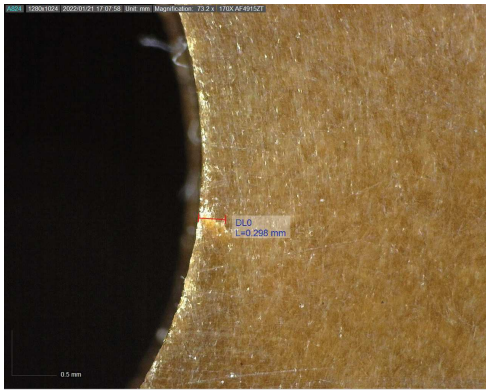
Nome Provino	<i>R5_5_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	7.92	<i>a</i> [mm]	8.05
<i>p</i> [mm]	7.92	<i>p</i> [mm]	8.05
<i>Sezione net.</i> [mm]	43.24	<i>t</i> [mm]	1,83
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	5
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	29	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	35027 *	<i>N_R</i>	35027
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.640204568	<i>F_{min}</i> [KN]	0.132010228
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		



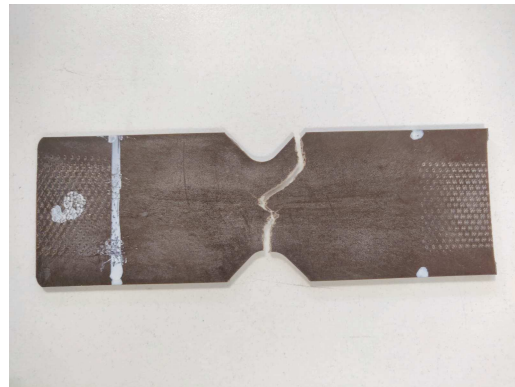
Nome Provino	<i>R5_6_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	7.9	<i>a</i> [mm]	7.99
<i>p</i> [mm]	7.9	<i>p</i> [mm]	7.99
<i>Sezione net.</i> [mm]	43.44	<i>t</i> [mm]	1,83
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	3
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	29	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	88587 *	<i>N_R</i>	88587
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.652159284	<i>F_{min}</i> [KN]	0.132607964
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		



Nome Provino	<i>R5_8_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	7.94	<i>a</i> [mm]	8.03
<i>p</i> [mm]	7.94	<i>p</i> [mm]	8.03
<i>Sezione net.</i> [mm]	43.39	<i>t</i> [mm]	1,84
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	3
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	29.6	<i>a_i</i> [mm]	0.3
<i>N_i</i>	40000	<i>N_R</i>	91582
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	43.7	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.703707621	<i>F_{min}</i> [KN]	0.135185381
Note			



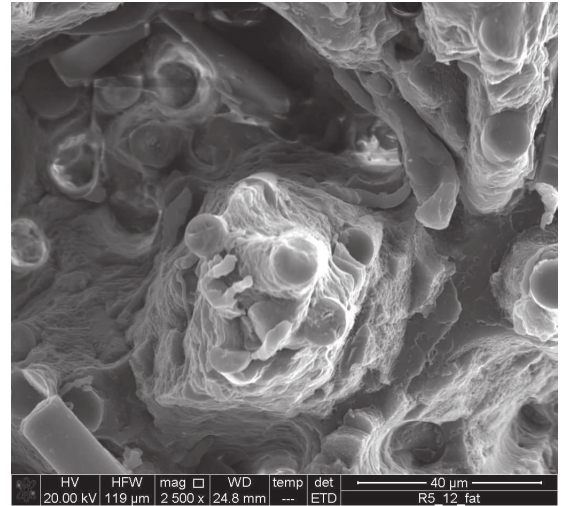
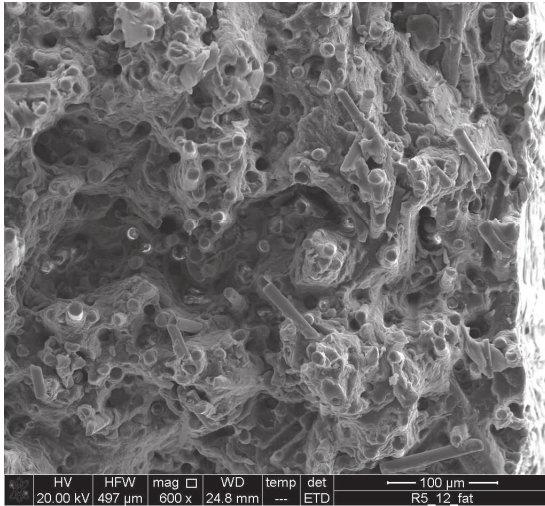
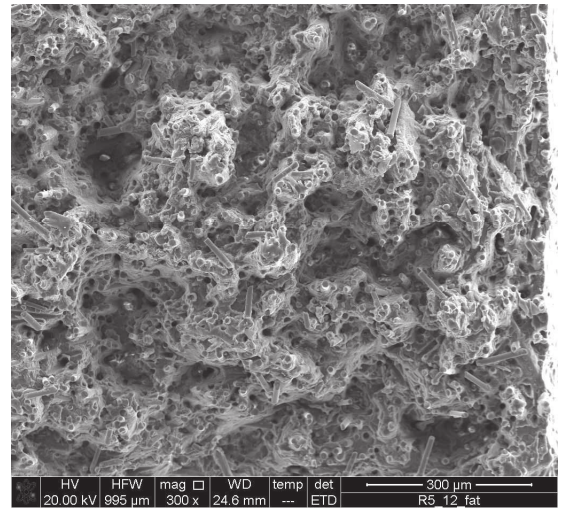
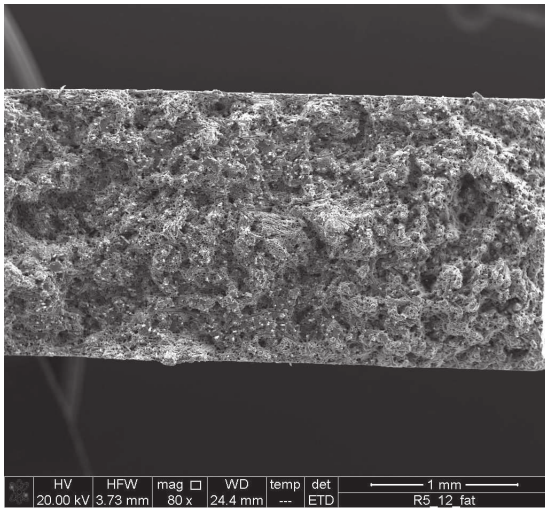
Nome Provino	<i>R5_9_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	8.08	<i>a</i> [mm]	7.99
<i>p</i> [mm]	8.08	<i>p</i> [mm]	7.99
<i>Sezione net.</i> [mm]	43.98	<i>t</i> [mm]	1,84
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	10
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	29.6	<i>a_i</i> [mm]	0.27
<i>N_i</i>	40000	<i>N_R</i>	113446
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	35.3	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.740743141	<i>F_{min}</i> [KN]	0.137037157
Note			



Nome Provino	<i>R5_11_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	7.99	<i>a</i> [mm]	7.94
<i>p</i> [mm]	7.99	<i>p</i> [mm]	7.94
<i>Sezione net.</i> [mm]	44, 15	<i>t</i> [mm]	1, 84
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	8
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	20	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	/	<i>N_R</i>	/
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	/	<i>Run out</i>	2521621
<i>F_{max}</i> [KN]	1.858826105	<i>F_{min}</i> [KN]	0.092941305
Note			

Nome Provino	<i>R5_12_fat</i>	Materiale	PPS-40GF
Tipo di prova	Fatica	Orientazione	0°
Dati geometrici			
lato sinistro		lato destro	
<i>a</i> [mm]	7.96	<i>a</i> [mm]	8.01
<i>p</i> [mm]	7.96	<i>p</i> [mm]	8.01
<i>Sezione net.</i> [mm]	44.08	<i>t</i> [mm]	1,84
Dati prove			
<i>R</i>	0.05	<i>f</i> [Hz]	5
$\sigma_{a,n}$ [MPa]	26	<i>a_i</i> [mm]	/
<i>N_i</i>	934726 *	<i>N_R</i>	934726
$\frac{N_i}{N_R}$ [%]	100	<i>Run out</i>	/
<i>F_{max}</i> [KN]	2.4130496	<i>F_{min}</i> [KN]	0.12065248
Note	* Innesco assunto coincidente con la rottura		







Codice Python

In questa sezione viene mostrato il codice Python relativo al programma costruito per calcolare il SED mediato a partire dai file di output Ansys delle tensioni, deformazioni, e volumi di elemento. Nell'immagine qui sotto viene mostrata la schermata principale. Per il funzionamento corretto del programma si consiglia di collocarlo e avviarlo in un disco esterno del PC.

SED calc from Ansys results

Choose STRESS file: ...

Choose STRAIN file: ...

Choose VOLUME file: ...

Calculation algorithm:

pre-set semi-auto auto

Write the cleaned files: clean only auto

Insert the n° of lines in 1 block (default 8):

Pre-set SETTINGS:

n° lines of header

n° lines between blocks

n° of blocks in a mega-block

n° of lines between mega-blocks

0%

Codice main:

```
# file_rename_threading.py
import webbrowser
import os
import subprocess
import os, sys, time
from PyQt5.QtWidgets import (QApplication, QMainWindow, QWidget,
    ↪ QLabel, QCheckBox, QProgressBar, QMessageBox, QLineEdit,
    ↪ QPushButton, QTextEdit, QComboBox, QFileDialog, QGridLayout)
from PyQt5.QtCore import pyqtSignal, QThread, QMutex
import re

from PyQt5.QtGui import QIcon, QPixmap

from PyQt5 import QtCore, QtGui, QtWidgets
from calcolo_SED_func import vol
from calcolo_SED_func import SED_mediated
style_sheet = """
    QProgressBar{
        background-color: #C0C6CA;
        color: #FFFFFF;
        border: 1px solid grey;
        padding: 3px;
        height: 15px;
        text-align: center;
    }
    QProgressBar::chunk{
        background: #538DB8;
        width: 5px;
    }

```

```

    margin: 0.5px
}
"""

# Create worker thread for running tasks like updating the progress
    ↪ bar,

# displaying information in the text edit widget

class SedCalc(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super(SedCalc,self).__init__()
        self.flag = False

    """
    Initialize the window and display its contents to the screen.
    """

    self.setMinimumSize(400, 200)
    self.setWindowTitle('SED calc from Ansys results')
    self.directory = ""

```

```

numeric_const_pattern = '[-+]? (?: (?: \d* \. \d+ ) | (?: \d+
    ↪ \.? ) )(?: [Ee] [+]? \d+ ) ?'
rx = re.compile(numeric_const_pattern, re.VERBOSE)
f_config=open('program_data/config.txt', 'r')

config=rx.findall(f_config.readline())
print(config)
"""
Set up the widgets and layouts for interface.
"""
#tens label
self.dir_label = QLabel("Choose STRESS file:")
self.dir_line_edit = QLineEdit()
self.dir_line_edit.setFixedWidth(450)
self.dir_button = QPushButton('...')

self.dir_button.setToolTip("Select file directory.")
self.dir_button.clicked.connect(self.setDirectory1)
self.dir_button.setFixedWidth(100)

#def label

self.dir_label2 = QLabel("Choose STRAIN file:")
self.dir_line_edit2 = QLineEdit()
self.dir_button2 = QPushButton('...')
self.dir_button2.setFixedWidth(100)

```

```

#vol label
self.dir_label3 = QLabel("Choose VOLUME file:")
self.dir_line_edit3 = QLineEdit()
self.dir_button3 = QPushButton('...')
self.dir_button3.setFixedWidth(100)
self.dir_button2.clicked.connect(self.setDirectory2)
self.dir_button3.clicked.connect(self.setDirectory3)

self.dir_button2.setToolTip("Select file directory.")
#dir_button2.clicked.connect(self.setDirectory2)

self.calc_button = QPushButton("Calculate")
self.stop = QPushButton("stop")
#self.stop.clicked.connect(self.open_window)

self.stop.clicked.connect(self.kill)
#self.stop.clicked.connect(self.sub_window.show)

self.calc_button.clicked.connect(self.calculate)

# Text edit is for displaying the file names as they are
  → updated.
self.display_files_edit = QTextEdit()
self.display_files_edit.setReadOnly(True)
self.progress_bar = QProgressBar()
self.progress_bar.setValue(0)
#radio button

```



```

self.radio1 = QtWidgets.QRadioButton()

if config[5]=="0":
    self.radio1_default=False
else:
    self.radio1_default=True
if config[6]=="0":
    self.radio2_default=False
else:
    self.radio2_default=True
if config[7]=="0":
    self.radio3_default=False
else:
    self.radio3_default=True

if config[8]=="0":
    self.radio4_default=False
else:
    self.radio4_default=True

if config[9]=="0":
    self.check_default=False
else:
    self.check_default=True

self.radio1.setChecked(self.radio1_default)
self.radio1.setFixedWidth(100)

self.radio1.setText("pre-set")

self.radio3 = QtWidgets.QRadioButton()
self.radio3.setGeometry(QtCore.QRect(180, 120, 95, 20))

```

```

self.radio3.setText("auto")
self.radio3.setChecked(self.radio3_default)

self.radio4 = QtWidgets.QRadioButton()
self.radio4.setGeometry(QtCore.QRect(180, 120, 95, 20))
self.radio4.setText("clean only auto")
self.radio4.setChecked(self.radio4_default)
self.label_write_file=QLabel("Write the cleaned files:")
self.check=QCheckBox("")
self.check.setChecked(self.check_default)

self.block_num=QLineEdit(config[0])
self.block_num.setFixedWidth(50)
self.block_label=QLabel("Insert the n° of lines in 1 block (
    ↪ default 8):")

#pre-set SETTINGS

self.sett=QLabel('Pre-set SETTINGS:')
self.sett1 = QLabel('n° lines of header')
self.sett2 = QLabel('n° lines between blocks')
self.sett3 = QLabel('n° of blocks in a mega-block')
self.sett4 = QLabel('n° of lines between mega-blocks')

self.nset1 = QLineEdit(config[1])
self.nset2 = QLineEdit(config[2])
self.nset3 = QLineEdit(config[3])
self.nset4 = QLineEdit(config[4])

self.nset1.setFixedWidth(50)
self.nset2.setFixedWidth(50)
self.nset3.setFixedWidth(50)
self.nset4.setFixedWidth(50)

```

```

self.info2 = info_preset()
self.button_info2=QPushButton("Know more about it!")
self.button_info2.clicked.connect(self.info2.show)

self.button_info=QPushButton("Know more about it!")
self.button_info.clicked.connect(self.info)
self.radio2 = QtWidgets.QRadioButton()
self.radio2.setGeometry(QRect(180, 120, 95, 20))
self.radio2.setText("semi-auto")
self.radio2.setChecked(self.radio2_default)
self.label_alg=QLabel("Calculation algorithm:")
# Set layout and widgets.
self.grid = QGridLayout()

self.grid.addWidget(self.dir_label, 0, 0)
self.grid.addWidget(self.dir_line_edit, 1, 0, 1, 2)
self.grid.addWidget(self.dir_button, 1, 2)

self.grid.addWidget(self.dir_label2, 2, 0)
self.grid.addWidget(self.dir_line_edit2, 3, 0, 1, 2)
self.grid.addWidget(self.dir_button2, 3, 2)

self.grid.addWidget(self.dir_label3, 4, 0)
self.grid.addWidget(self.dir_line_edit3, 5, 0, 1, 2)
self.grid.addWidget(self.dir_button3, 5, 2)

#adding radio buttons
self.grid.addWidget(self.label_alg,10,0)
self.grid.addWidget(self.radio1,11 ,0 )
self.grid.addWidget(self.radio2, 11, 1)
self.grid.addWidget(self.radio3, 11, 2)
self.grid.addWidget(self.button_info,10,1)
self.grid.addWidget(self.button_info2,15,1)
self.grid.addWidget(self.check,13,0)

```

```

self.grid.addWidget(self.label_write_file,12,0)
self.grid.addWidget(self.radio4, 12, 2)

self.grid.addWidget(self.block_num,14,1,1,1)
self.grid.addWidget(self.block_label,14,0)

#adding pre-set
self.grid.addWidget(self.sett, 15, 0)
self.grid.addWidget(self.sett1, 16, 0)
self.grid.addWidget(self.sett2, 17, 0)
self.grid.addWidget(self.sett3, 18, 0)
self.grid.addWidget(self.sett4, 19, 0)

self.grid.addWidget(self.nset1, 16, 1)
self.grid.addWidget(self.nset2, 17, 1)
self.grid.addWidget(self.nset3, 18, 1)
self.grid.addWidget(self.nset4, 19, 1)

self.save=QPushButton("save all settings")
self.save.clicked.connect(self.save_settings)
self.grid.addWidget(self.save,19,2)

self.grid.addWidget(self.calc_button, 20, 0)
self.grid.addWidget(self.stop,20,1)
self.grid.addWidget(self.display_files_edit, 21, 0, 1, 3)
self.grid.addWidget(self.progress_bar, 25, 0, 1, 3)

#self.layout = QGridLayout()
#self.layout.addWidget(self.but, 1, 2)
#self.layout.addWidget(self.but2, 2, 1)

```

```
widget = QWidget()
widget.setLayout(self.grid)
self.setCentralWidget(widget)
#self.setLayout(self.grid)
#rename_button.setEnabled(False)
```

```
def info(self):
```

```
    QMessageBox.information(self, "Choose algorithm information",
        "This program calculates the mediated SED (
        ↪ Strain Energy Density) from the
        ↪ principal stress, strain and volume
        ↪ files (grouped in element solutions)"
        "obtained from Ansys analysis (every numeric
        ↪ line of these files contains the
        ↪ nodal values, that are part of an
        ↪ element). All these algorithms,
        ↪ except for 'clear only auto' (that
        ↪ only generates the cleaned files, the
        ↪ user doesn't have to select all the 3
        ↪ files to run this algorithm, the user
        ↪ can select any type of text file here),
        ↪ calculate the mediated SED. The
        ↪ difference is in the way they clean
        ↪ the "
        "Ansys files (the Ansys files given in input,
        ↪ contain lines of text and lines of
        ↪ numbers, the cleaning operations
        ↪ consists in eliminating the lines
        ↪ containing text,"
        "so that the calculation of mediated SED,
        ↪ based on the cleaned files, can be
        ↪ done) and the way the stress, strain
        ↪ and volume values are recognized in a
```

```

    ↪ 'only number' line. \n "
"PRE-SET ALGORITHM \n"
"The Ansys files are structured in a
    ↪ schematic and repetible way. This
    ↪ algorithm takes advantage of it and
    ↪ cleans the files based on a pre-set
    ↪ configuration (the user can set some
    ↪ parameters in the section 'pre-set
    ↪ SETTING' below. "
"\n SEMI-AUTO ALGORITHM \n"
"The program eliminates the empty lines and
    ↪ those containing at least on letter
    ↪ from 'a' to 'z' and from 'A' to 'Z'
    ↪ except for 'e' and 'E' (the letters of
    ↪ the scientific notation). The numbers
    ↪ recognition is based on the schematic
    ↪ sctructure of the input Ansys files.
    ↪ "
"The 1° principal stress/strain is the
    ↪ converted number contained from the 8°
    ↪ to 22° character of the line of the
    ↪ sress/strain file, "
"the 2° principal stress/strain is the
    ↪ converted number contained from the 22
    ↪ ° to 35° character of the line of the
    ↪ sress/strain file, "
"the 3° principal stress/strain is the
    ↪ converted number contained from the 35
    ↪ ° to 48° character of the line of the
    ↪ sress/strain file, "
"the volume is the converted number
    ↪ contained from the 8° to 22° character
    ↪ of the line of the volume file "
"\n AUTO ALGORITHM \n"

```

```

        "The program eliminates the empty lines and
        ↪ those containing at least on letter
        ↪ from 'a' to 'z' and from 'A' to 'Z'
        ↪ except for 'e' and 'E' (the letters of
        ↪ the scientific notation). "
        "The numbers in a 'only numbers' line are
        ↪ automatically recognized. "
        "the 1° principal stress/strain is the
        ↪ number at the 2° column of the line, "
        "the 2° principal stress/strain is the
        ↪ number at the 3° column of the line, "
        "the 3° principal stress/strain is the
        ↪ number at the 4° column of the line, "
        "the volume is the number at the 2° column
        ↪ of the volume file"
    )

'''
def info2(self):
    QMessageBox.information(self, "Pre-set settings information",
        "In this section the user can set the
        ↪ parameters of the pre-set algorithm.
        ↪ The Ansys stress/strain file is
        ↪ structured as follows: \n \n"
        "-there is an initial header of text/empty
        ↪ lines that you can set in 'n° lines of
        ↪ header' \n \n -there is a block of
        ↪ numbers lines that you can set in '
        ↪ Insert n° of lines in 1 block' (this
        ↪ number corrisponds to the number of
        ↪ nodes for each element)\n \n"
        "-then there are others text/empty lines
        ↪ settable in 'n° of lines between
        ↪ blocks' between the blocks \n \n"
        "-every 'n° of blocks in a mega-block'

```

```

        ↪ blocks, the numbers of text/empty
        ↪ lines between 'mega-blocks' differs
        ↪ from those between blocks. A 'mega-
        ↪ block' consists in 'n° of blocks in a
        ↪ mega-block' times the lines of a block
        ↪ plus those between blocks.\n \n "
    "The user can set the n° of lines between
        ↪ mega-blocks in the section: "
    "'n° of lines between mega-blocks'."
    )

    """
def setDirectory1(self):
    """
    Choose the directory.
    """
    #rename_button.setEnabled(False)

    file_dialog = QFileDialog(self)
    #file_dialog.setFileMode(QFileDialog.Directory)

    self.directory1,_=file_dialog.getOpenFileName(self, "Open
        ↪ Directory")
    if self.directory1:
        self.dir_line_edit.setText(self.directory1)

    self.progress_bar.setRange(0, 100)

def setDirectory2(self):
    """
    Choose the directory.
    """
    #rename_button.setEnabled(False)

    file_dialog2 = QFileDialog(self)

```



```

#file_dialog.setFileMode(QFileDialog.Directory)

self.directory2,_=file_dialog2.getOpenFileName(self, "Open
    ↪ Directory")
if self.directory2:
    self.dir_line_edit2.setText(self.directory2)

self.progress_bar.setRange(0, 100)

def setDirectory3(self):
    """
    Choose the directory.
    """
    #rename_button.setEnabled(False)

    file_dialog3 = QFileDialog(self)
    #file_dialog.setFileMode(QFileDialog.Directory)

    self.directory3,_=file_dialog3.getOpenFileName(self, "Open
        ↪ Directory")
    if self.directory3:
        self.dir_line_edit3.setText(self.directory3)

    self.progress_bar.setRange(0, 100)

def calculate(self):
    try:
        self.blocklen=int(self.block_num.text())
        if self.check.isChecked():
            self.write_file=True
        else:
            self.write_file=False

```

```

if self.radio1.isChecked():

    try:
        if self.flag==False and self.directory1 and self.
            ↪ directory2 and self.directory3:
                self.worker = Worker1(self.directory1,self.
                    ↪ directory2,self.directory3,self.write_file,
                    ↪ self.blocklen,self.nset1.text(),self.nset2.
                    ↪ text(),self.nset3.text(),self.nset4.text())
                self.worker.updateValueSignal.connect(self.
                    ↪ updateProgressBar)
                self.worker.status.connect(self.updating_status)
                #self.worker.finished_signal.connect(self.finished)
                    ↪
                self.worker.started_signal.connect(self.
                    ↪ change_flag)
                self.worker.start()

    except:
        pass
if self.radio3.isChecked():

    try:
        if self.flag==False and self.directory1 and self.
            ↪ directory2 and self.directory3:
                self.worker = Worker3(self.directory1,self.
                    ↪ directory2,self.directory3,self.write_file,
                    ↪ self.blocklen)
                self.worker.updateValueSignal.connect(self.
                    ↪ updateProgressBar)
                self.worker.status.connect(self.updating_status)
                #self.worker.finished_signal.connect(self.finished)
                    ↪
                self.worker.started_signal.connect(self.

```

```

        ↪ change_flag)
        self.worker.start()
    except:
        pass
if self.radio2.isChecked():

    try:
        if self.flag==False and self.directory1 and self.
            ↪ directory2 and self.directory3:
            self.worker = Worker2(self.directory1,self.
                ↪ directory2,self.directory3,self.write_file,
                ↪ self.blocklen)
            self.worker.updateValueSignal.connect(self.
                ↪ updateProgressBar)
            self.worker.status.connect(self.updating_status)
            #self.worker.finished_signal.connect(self.finished)
            ↪
            self.worker.started_signal.connect(self.
                ↪ change_flag)
            self.worker.start()
    except:
        pass

if self.radio4.isChecked():

    try:
        if self.flag==False:

            self.worker = Worker4(self.dir_line_edit.text(),
                ↪ self.dir_line_edit2.text(),self.
                ↪ dir_line_edit3.text())

            self.worker.updateValueSignal.connect(self.

```

```

        ↪ updateProgressBar)
        self.worker.status.connect(self.updating_status)
        #self.worker.finished_signal.connect(self.finished)
        ↪
        self.worker.started_signal.connect(self.
            ↪ change_flag)

        self.worker.start()
    except:
        pass

except:
    pass

def change_flag(self, flag_val):
    if flag_val==1:
        self.flag=True
    if flag_val==0:
        self.flag=False
        #self.rename_button.setEnabled(False)
def kill(self):
    if self.flag==True:

        self.worker.stop()
        self.worker.updateValueSignal.connect(self.reset_prog)

        #self.rename_button.setEnabled(True)
        self.flag=False
        #self.progress_bar.setValue(0)
        self.display_files_edit.append('stopped by the user!')
def reset_prog(self, val):
    self.progress_bar.setValue(val)

```

```

def updateProgressBar(self, value):
    self.progress_bar.setValue(value)

def finished(self, val):

    self.display_files_edit.append(val)
    self.calc_button.setEnabled(True)

def updating_status(self, val):
    self.display_files_edit.append(val)
def save_settings(self):

    sets=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
    sets[0]=self.block_num.text()
    sets[1]=self.nset1.text()
    sets[2] = self.nset2.text()
    sets[3] = self.nset3.text()
    sets[4] = self.nset4.text()

    if self.radio1.isChecked():
        self.radio1_set="1"
    else:
        self.radio1_set="0"

    if self.radio2.isChecked():
        self.radio2_set="1"
    else:
        self.radio2_set="0"

    if self.radio3.isChecked():
        self.radio3_set="1"
    else:
        self.radio3_set="0"
    if self.radio4.isChecked():

```

```

        self.radio4_set="1"
else:
        self.radio4_set="0"

if self.check.isChecked():
        self.check_set="1"
else:
        self.check_set="0"

sets[5]=self.radio1_set
sets[6] = self.radio2_set
sets[7] = self.radio3_set
sets[8] = self.radio4_set
sets[9] = self.check_set

file = open("program_data/config.txt", "r")

lines = file.readlines()
file.close()
del lines[0]

filew=open("program_data/config.txt","w+")
filew.writelines(sets[0]+';'+sets[1]+';'+sets[2]+';'+sets[3]+';
    ↪ '+sets[4]+';'+sets[5]+';'+sets[6]+';'+sets[7]+';'+sets
    ↪ [8]+';'+sets[9])

print(sets)

class info_preset(QWidget):
    def __init__(self):
        super(info_preset, self).__init__()
        self.resize(400, 300)

```

```

self.setWindowTitle('Pre-set settings info')

# Label

label = QLabel(self)
pixmap = QPixmap('program_data/image.png')
label.setPixmap(pixmap)
self.resize(pixmap.width(), pixmap.height())

class Worker1(QThread):
    updateValueSignal = pyqtSignal(int)
    updateTextEditSignal = pyqtSignal(str, str)
    finished_signal = pyqtSignal(str)
    started_signal = pyqtSignal(int)

    status = pyqtSignal(str)

    def __init__(self, dir1, dir2, dir3, write, blen, nset1, nset2, nset3,
        ↪ nset4):
        super().__init__()
        self.dir1 = dir1
        self.dir2 = dir2
        self.dir3 = dir3
        self.nset1 = nset1
        self.nset2 = nset2
        self.nset3 = nset3
        self.nset4 = nset4

        self.write = write
        self.blen = blen

        self.is_running = True

```

```

def run(self):
    try:

        self.started_signal.emit(1)
        self.updateValueSignal.emit(0)
        self.status.emit('started')
        self.status.emit('calculating...')

        fdef = open(self.dir2, 'r')
        filenew = open('res.lis', 'w')
        file_write_def=open('STRESS_CLEAR.lis','w')
        file_write_tens = open('STRAIN_CLEAR.lis', 'w')
        ftens = open(self.dir1, 'r')
        print("started")
        lun = len(ftens.readlines())

        ftens.close()

        ftens2 = open(self.dir1, 'r')

        print(lun)

        tot = lun / ((int(self.nset2)+self.blen)*int(self.nset3)+
            ↪ int(self.nset4)-int(self.nset2))
        for _ in range(int(self.nset1)):
            l_tens = ftens2.readline()
            l_def = fdef.readline()
        i = 0
        while True:
            try:

                i += 1
                self.updateValueSignal.emit(int((i / tot) * 100))

```



```

for _ in range(int(self.nset3)):
    eps1sum = 0
    eps2sum = 0
    eps3sum = 0

    tens1sum = 0
    tens2sum = 0
    tens3sum = 0

    for _ in range(self.blen):
        l_tens = ftens2.readline()
        l_def = fdef.readline()

        eps1 = float(l_def[8:22])
        eps2 = float(l_def[22:35])
        eps3 = float(l_def[35:48])
        if self.write:
            file_write_def.writelines(l_def)
            file_write_tens.writelines(l_tens)

        tens1 = float(l_tens[8:22])
        tens2 = float(l_tens[22:35])
        tens3 = float(l_tens[35:48])

        eps1sum += eps1
        eps2sum += eps2
        eps3sum += eps3
        tens1sum += tens1
        tens2sum += tens2
        tens3sum += tens3

Eps1 = eps1sum / self.blen
Eps2 = eps2sum / self.blen

```

```

        Eps3 = eps3sum / self.blen

        Tens1 = tens1sum / self.blen
        Tens2 = tens2sum / self.blen
        Tens3 = tens3sum / self.blen

        Energy = 1 / 2 * (Eps1 * Tens1 + Eps2 * Tens2 +
            ↪ Eps3 * Tens3)

        filenew.writelines(str(Energy) + '\n')
        for _ in range(int(self.nset2)):
            l_tens = ftens2.readline()

            l_def = fdef.readline()
            for _ in range(int(self.nset4)-int(self.nset2)):
                l_tens = ftens2.readline()
                l_def = fdef.readline()
            except ValueError:
                break
    ftens2.close()
    fdef.close()
    filenew.close()
    file_write_def.close()
    file_write_tens.close()
    self.status.emit('cleaning volume file...')
    try:

        # pulizia volume
        fvol = open(self.dir3, 'r')
        fvol_clear = open('vol_clear.lis', 'w')

        lung = len(fvol.readlines())
        # print(lung)
        fvol.close()

```

```

fvol = open(self.dir3, 'r')
for i in range(lung):
    print(i, end='\r')
    l_vol = fvol.readline()

    if l_vol and l_vol.strip():
        if not (re.match('^(?=.*[a-df-zA-DF-Z])', l_vol)):

            fvol_clear.writelines(l_vol)

fvol.close()
fvol_clear.close()

vol_clear = open('vol_clear.lis', 'r')
sene = 0
voltot = 0
fe = open('res.lis', 'r')
l_vol_clear = vol_clear.readline()
self.status.emit('writing results file...')

while l_vol_clear != "":
    vol = float(l_vol_clear[8:22])
    l_voldec = float("{:}.5e}".format(vol))
    voltot += l_voldec
    e = float(fe.readline())
    sene += vol * e
    l_vol_clear = vol_clear.readline()

self.status.emit('Averaged SED: ' + str(sene / voltot) +
    ↪ '\n' + 'Volume: ' + str(voltot))

result = open('result_file.lis', 'w')
result.writelines('Averaged SED: ' + str(sene / voltot) +
    ↪ '\n' + 'Volume: ' + str(voltot))

```

```

        result.close()

        vol_clear.close()
        fe.close()
    except:
        self.status.emit('ERROR: Volume file , Stress file or
            ↪ Strain file not valid')

        self.updateValueSignal.emit(0) # Reset the value of the
            ↪ progress bar
        self.finished_signal.emit("finished")
        self.started_signal.emit(0)
        self.updateValueSignal.emit(100)
    except:
        self.finished_signal.emit("ERROR")

def stop(self):
    self.is_running = False
    self.terminate()

class Worker2(QThread):
    updateValueSignal = pyqtSignal(int)
    updateTextEditSignal = pyqtSignal(str, str)
    finished_signal = pyqtSignal(str)
    started_signal=pyqtSignal(int)

    status=pyqtSignal(str)

    def __init__(self,dir1,dir2,dir3,write,blen):
        super().__init__()
        self.dir1=dir1
        self.dir2=dir2
        self.dir3=dir3
        self.write=write

```

```

self.blen=blen

self.is_running = True

def run(self):
    try:
        self.started_signal.emit(1)
        self.updateValueSignal.emit(0)
        self.status.emit('started')
        self.status.emit('calculating...')
        file_write_def = open('STRESS_CLEAR.lis', 'w')
        file_write_tens = open('STRAIN_CLEAR.lis', 'w')

        numeric_const_pattern = '[-+]? (?: (?: \d* \. \d+ ) | (?: \
            ↪ d+ \.? ) )(?: [Ee] [+]? \d+ ) ?'
        rx = re.compile(numeric_const_pattern, re.VERBOSE)
        file = open(self.dir1, 'r')
        file_clear_mean = open('mean_clear_stress.lis', 'w')
        lun = len(file.readlines())
        print(lun)
        file.close()
        self.status.emit('cleaning stress file...')
        file = open(self.dir1, 'r')
        for i in range(lun):
            print(i, end='\r')
            line = file.readline()
            # l_def = fdef.readline()
            self.updateValueSignal.emit(int(i/lun*100))
            if line and line.strip():
                if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):

```

```

tens_def_1sum = 0
tens_def_2sum = 0
tens_def_3sum = 0

for _ in range(self.blen):

    if self.write:
        file_write_tens.writelines(line)

        tens_def_1sum += float(line[8:22])
        tens_def_2sum += float(line[22:35])
        tens_def_3sum += float(line[35:48])

        line = file.readline()

i += self.blen
# Energy = 1 / 2 * (tens1sum / 8 * def1sum / 8 +
    ↪ tens2sum / 8 * def2sum / 8 + tens3sum / 8 *
    ↪ def3sum / 8)
file_clear_mean.writelines(
    str(tens_def_1sum / self.blen) + ' ' + str(
        ↪ tens_def_2sum / self.blen) + ' ' + str(
        ↪ tens_def_3sum / self.blen) + '\n')
# defclear.writelines(str(def1sum) + ' ' + str(
    ↪ def2sum) + ' ' + str(def3sum) + '\n')
# fener.writelines(str(Energy) + '\n')
file.close()
file_clear_mean.close()

file = open(self.dir2, 'r')
file_clear_mean = open('mean_clear_strain.lis', 'w')
lun = len(file.readlines())
print(lun)
file.close()

```

```

self.status.emit('cleaning strain file...')
file = open(self.dir2, 'r')
for i in range(lun):
    print(i, end='\r')
    line = file.readline()
    # l_def = fdef.readline()
    self.updateValueSignal.emit(int(i / lun * 100))
    if line and line.strip():
        if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):
            tens_def_1sum = 0
            tens_def_2sum = 0
            tens_def_3sum = 0

            for _ in range(self.blen):

                if self.write:
                    file_write_def.writelines(line)

                tens_def_1sum += float(line[8:22])
                tens_def_2sum += float(line[22:35])
                tens_def_3sum += float(line[35:48])

                line = file.readline()

            i += self.blen
            # Energy = 1 / 2 * (tens1sum / 8 * def1sum / 8 +
                ↪ tens2sum / 8 * def2sum / 8 + tens3sum / 8 *
                ↪ def3sum / 8)
            file_clear_mean.writelines(
                str(tens_def_1sum / self.blen) + ' ' + str(
                    ↪ tens_def_2sum / self.blen) + ' ' + str(
                    ↪ tens_def_3sum / self.blen) + '\n')
            # defclear.writelines(str(def1sum) + ' ' + str(
                ↪ def2sum) + ' ' + str(def3sum) + '\n')

```

```

        # fener.writelines(str(Energy) + '\n')
    file.close()
    file_clear_mean.close()
    file_write_tens.close()
    file_write_def.close()

    volume,sedval=SED_mediated(self.dir1, self.dir2,self.dir3)
    self.status.emit('Averaged SED: '+str(sedval)+'\n'+ 'Volume:
        ↪ '+str(volume))

    result = open('result_file.lis', 'w')
    result.writelines('Averaged SED: ' + str(sedval) + '\n' + '
        ↪ Volume: ' + str(volume))
    result.close()

    self.updateValueSignal.emit(0) # Reset the value of the
        ↪ progress bar
    self.finished_signal.emit("finished")
    self.started_signal.emit(0)
    self.updateValueSignal.emit(100)
except:
    self.finished_signal.emit("ERROR")

def stop(self):
    self.is_running = False
    self.terminate()

class Worker3(QThread):
    updateValueSignal = pyqtSignal(int)
    updateTextEditSignal = pyqtSignal(str, str)
    finished_signal = pyqtSignal(str)
    started_signal=pyqtSignal(int)

```



```

status=pyqtSignal(str)

def __init__(self,dir1,dir2,dir3,write,blen):
    super().__init__()
    self.dir1=dir1
    self.dir2=dir2
    self.dir3=dir3
    self.write=write
    self.blen=blen

    self.is_running = True

def run(self):
    try:
        self.started_signal.emit(1)
        self.updateValueSignal.emit(0)
        self.status.emit('started')
        self.status.emit('calculating...')

        file_write_def = open('STRESS_CLEAR.lis', 'w')
        file_write_tens = open('STRAIN_CLEAR.lis', 'w')

        numeric_const_pattern = '[-+]? (?: (?: \d* \. \d+ ) | (?: \
            ↪ d+ \. ? ) ) (?: [Ee] [+ -]? \d+ ) ?'
        rx = re.compile(numeric_const_pattern, re.VERBOSE)
        file = open(self.dir1, 'r')
        file_clear_mean = open('mean_clear_stress.lis', 'w')
        lun = len(file.readlines())
        print(lun)
        file.close()
        self.status.emit('cleaning stress file...')

```

```

file = open(self.dir1, 'r')
for i in range(lun):
    print(i, end='\r')
    line = file.readline()
    # l_def = fdef.readline()
    self.updateValueSignal.emit(int(i/lun*100))
    if line and line.strip():
        if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):
            tens_def_1sum = 0
            tens_def_2sum = 0
            tens_def_3sum = 0

            for _ in range(self.blen):
                val = rx.findall(line)
                if self.write:
                    file_write_tens.writelines(line)

                tens_def_1sum += float(val[1])
                tens_def_2sum += float(val[2])
                tens_def_3sum += float(val[3])

            line = file.readline()

    i += self.blen
    # Energy = 1 / 2 * (tens1sum / 8 * def1sum / 8 +
    ↪ tens2sum / 8 * def2sum / 8 + tens3sum / 8 *
    ↪ def3sum / 8)
    file_clear_mean.writelines(
        str(tens_def_1sum / self.blen) + ' ' + str(
            ↪ tens_def_2sum / self.blen) + ' ' + str(
            ↪ tens_def_3sum / self.blen) + '\n')
    # defclear.writelines(str(def1sum) + ' ' + str(
        ↪ def2sum) + ' ' + str(def3sum) + '\n')

```

```

        # fener.writelines(str(Energy) + '\n')
file.close()
file_clear_mean.close()

file = open(self.dir2, 'r')
file_clear_mean = open('mean_clear_strain.lis', 'w')
lun = len(file.readlines())
print(lun)
file.close()
self.status.emit('cleaning strain file...')
file = open(self.dir2, 'r')
for i in range(lun):
    print(i, end='\r')
    line = file.readline()
    # l_def = fdef.readline()
    self.updateValueSignal.emit(int(i / lun * 100))
    if line and line.strip():
        if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):
            tens_def_1sum = 0
            tens_def_2sum = 0
            tens_def_3sum = 0

            for _ in range(self.blen):
                val = rx.findall(line)
                if self.write:
                    file_write_def.writelines(line)

                tens_def_1sum += float(val[1])
                tens_def_2sum += float(val[2])
                tens_def_3sum += float(val[3])

            line = file.readline()

    i += self.blen

```

```

# Energy = 1 / 2 * (tens1sum / 8 * def1sum / 8 +
    ↪ tens2sum / 8 * def2sum / 8 + tens3sum / 8 *
    ↪ def3sum / 8)
file_clear_mean.writelines(
    str(tens_def_1sum / self.blen) + ' ' + str(
        ↪ tens_def_2sum / self.blen) + ' ' + str(
        ↪ tens_def_3sum / self.blen) + '\n')
# defclear.writelines(str(def1sum) + ' ' + str(
    ↪ def2sum) + ' ' + str(def3sum) + '\n')
# fener.writelines(str(Energy) + '\n')
file.close()
file_clear_mean.close()
file_write_tens.close()
file_write_def.close()

volume,sedval=SED_mediated(self.dir1, self.dir2,self.dir3)
self.status.emit('Averaged SED: '+str(sedval)+'\n'+ 'Volume:
    ↪ '+str(volume))

result = open('result_file.lis', 'w')
result.writelines('Averaged SED: ' + str(sedval) + '\n' + '
    ↪ Volume: ' + str(volume))
result.close()

self.updateValueSignal.emit(0) # Reset the value of the
    ↪ progress bar
self.finished_signal.emit("finished")
self.started_signal.emit(0)
self.updateValueSignal.emit(100)

```

```

except:
    self.finished_signal.emit("ERROR")

def stop(self):
    self.is_running = False

    self.terminate()
    self.updateValueSignal.emit(0)

class Worker4(QThread):
    updateValueSignal = pyqtSignal(int)
    updateTextEditSignal = pyqtSignal(str, str)
    finished_signal = pyqtSignal(str)
    started_signal=pyqtSignal(int)

    status=pyqtSignal(str)

    def __init__(self,dir1,dir2,dir3):
        super().__init__()
        self.dir1=dir1
        self.dir2=dir2
        self.dir3=dir3

        self.is_running = True

    def run(self):

        self.started_signal.emit(1)
        self.updateValueSignal.emit(0)
        self.status.emit('started')
        self.status.emit('calculating...')

        file_write_def = open('STRAIN_CLEAR.lis', 'w')

```

```

file_write_tens = open('STRESS_CLEAR.lis', 'w')
file_write_vol = open('VOLUME_CLEAR.lis', 'w')

try:
    if self.dir1:

        numeric_const_pattern = '[-+]? (?: (?: \d* \. \d+ ) | (?:
            ↪ \d+ \. ? ) ) (?: [Ee] [+]? \d+ ) ?'

        file = open(self.dir1, 'r')

        lun = len(file.readlines())
        print(lun)
        file.close()
        self.status.emit('cleaning stress file...')
        file = open(self.dir1, 'r')
        for i in range(lun):
            print(i, end='\r')
            line = file.readline()
            # l_def = fdef.readline()
            self.updateValueSignal.emit(int(i/lun*100))
            if line and line.strip():
                if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):
                    file_write_tens.writelines(line)

        self.status.emit('Stress file cleaned')
        file.close()
        file_write_tens.close()

except:
    pass

try:
    if self.dir2:

```

```

file = open(self.dir2, 'r')

lun = len(file.readlines())
print(lun)
file.close()
self.status.emit('cleaning strain file...')
file = open(self.dir2, 'r')
for i in range(lun):
    print(i, end='\r')
    line = file.readline()
    # l_def = fdef.readline()
    self.updateValueSignal.emit(int(i / lun * 100))
    if line and line.strip():
        if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):
            file_write_def.writelines(line)

file.close()
file_write_def.close()
self.status.emit('Strain file cleaned')
except:
    pass

try:

if self.dir3:
    file = open(self.dir3, 'r')

    lun = len(file.readlines())
    print(lun)
    file.close()
    self.status.emit('cleaning volume file...')
    file = open(self.dir3, 'r')
    for i in range(lun):
        print(i, end='\r')

```

```

        line = file.readline()
        # l_def = fdef.readline()
        self.updateValueSignal.emit(int(i / lun * 100))
        if line and line.strip():
            if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):
                file_write_vol.writelines(line)

        file.close()
        file_write_vol.close()
        self.status.emit('Volume file cleaned')
except:
    pass

self.updateValueSignal.emit(0) # Reset the value of the
    ↪ progress bar
self.status.emit('finished')
self.started_signal.emit(0)
self.updateValueSignal.emit(100)

def stop(self):
    self.is_running = False

    self.terminate()
    self.updateValueSignal.emit(0)

if __name__ == '__main__':

    app = QApplication(sys.argv)
    app.setStyleSheet(style_sheet)
    window = SedCalc()
    window.show()

```



```
sys.exit(app.exec_())
```

Codice funzioni supporto:

```
import re
def clear_mean(filename):
    numeric_const_pattern = '[-+]? (?: (?: \d* \. \d+ ) | (?: \d+ \.?\d* ) )(?: [Ee] [+]? \d+ ) ?'
    rx = re.compile(numeric_const_pattern, re.VERBOSE)
    file = open(filename, 'r')
    file_clear_mean = open('mean_clear_'+filename, 'w')
    lun = len(file.readlines())
    print(lun)
    file.close()

    file = open(filename, 'r')
    for i in range(lun):
        print(i, end='\r')
        line = file.readline()
        #l_def = fdef.readline()

        if line and line.strip():
            if not (re.match('^(?=[a-df-zA-DF-Z])', line)):
                tens_def_1sum = 0
                tens_def_2sum = 0
                tens_def_3sum = 0

                for _ in range(8):
                    val = rx.findall(line)

                    tens_def_1sum += float(val[1])
                    tens_def_2sum += float(val[2])
                    tens_def_3sum += float(val[3])
```

```

        line = file.readline()

    i += 8
    #Energy = 1 / 2 * (tens1sum / 8 * def1sum / 8 + tens2sum
        ↪ / 8 * def2sum / 8 + tens3sum / 8 * def3sum / 8)
    file_clear_mean.writelines(str(tens_def_1sum/8) + ' ' +
        ↪ str(tens_def_2sum/8) + ' ' + str(tens_def_3sum/8)
        ↪ + '\n')
    # defclear.writelines(str(def1sum) + ' ' + str(def2sum) +
        ↪ ' ' + str(def3sum) + '\n')
    #fener.writelines(str(Energy) + '\n')
file.close()
file_clear_mean.close()
return lun

```

```

def vol(vol_file):
    numeric_const_pattern = '[-+]? (?: (?: \d* \. \d+ ) | (?: \d+ \.?
        ↪ ) )(?: [Ee] [+]? \d+ ) ?'
    rx = re.compile(numeric_const_pattern, re.VERBOSE)

    # pulizia volume
    fvol = open(vol_file, 'r')
    fvol_clear = open('vol_clear.lis', 'w')

    lung = len(fvol.readlines())
    #print(lung)
    fvol.close()
    fvol = open(vol_file, 'r')
    for i in range(lung):
        print(i, end='\r')
        l_vol = fvol.readline()

```

```

    if l_vol and l_vol.strip():
        if not (re.match('^(?=.*[a-df-zA-DF-Z])', l_vol)):
            vol_val=rx.findall(l_vol)
            fvol_clear.writelines(vol_val[1]+'\\n')

fvol.close()
fvol_clear.close()

def SED_mediated (tens_file, def_file, vol_file):
    numeric_const_pattern = '[+-]? (?: (?: \\d* \\.| \\d+ ) | (?: \\d+ \\.|
    ↪ ) )(?: [Ee] [+-]? \\d+ ) ?'
    rx = re.compile(numeric_const_pattern, re.VERBOSE)

    ftens = open('mean_clear_stress.lis', 'r')
    fdef = open('mean_clear_strain.lis', 'r')
    lung=len(ftens.readlines())
    ftens.close()
    ftens = open('mean_clear_stress.lis', 'r')
    vol(vol_file)
    fvol=open('vol_clear.lis','r')

    sene=0
    voltot=0
    for i in range(lung):
        l_tens = ftens.readline()
        l_def= fdef.readline()
        l_vol=fvol.readline()
        val_def= rx.findall(l_def)
        val_tens = rx.findall(l_tens)
        voltot+= float(l_vol)
        sene+= 1 / 2 * (float(val_tens[0]) * float(val_def[0]) + float

```

```
    ↪ (val_tens[1]) * float(val_def[1]) + float(val_tens[2]) *  
    ↪ float(val_def[2]))*float(l_vol)  
print(voltot,sene/voltot)  
  
fvol.close()  
ftens.close()  
fdef.close()  
return voltot,sene/voltot  
#end sed mediated()  
#SED_mediated('tens_big.lis','def_big.lis','vol_big.lis')
```

Bibliografia

- [1] B. Atzori, P. Lazzarin, and G. Meneghetti, “Fracture mechanics and notch sensitivity,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 26, no. 3, pp. 257–267, 2003.
- [2] B. Atzori, P. Lazzarin, and G. Meneghetti, “A unified treatment of the mode I fatigue limit of components containing notches or defects,” *International journal of fracture*, vol. 133, no. 1, pp. 61–87, 2005.
- [3] P. Lazzarin and F. Berto, “Some expressions for the strain energy in a finite volume surrounding the root of blunt v-notches,” *International Journal of fracture*, vol. 135, no. 1, pp. 161–185, 2005.
- [4] M. De Monte, M. Quaresimin, and P. Lazzarin, “Modelling of fatigue strength data for a short fibre reinforced polyamide 6.6 based on local strain energy density,” in *Proceedings of the 16th International Conference on Composite Materials*, 2007.
- [5] L. Baldi, “Analisi teorica e sperimentale dell’effetto d’intaglio in compositi rinforzati con fibra corta,” Tesi di laurea magistrale, Università degli studi di Padova, 2021.
- [6] M. Ricotta, M. Sorgato, and M. Zappalorto, “Tensile and compressive quasi-static behaviour of 40% short glass fibre-pps reinforced composites with and without geometrical variations,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 114, p. 102990, 2021.
- [7] Y. Rocchi, “Caratterizzazione statica e a fatica di un materiale composito a matrice polimerica rinforzato con fibre corte in presenza di intagli,” Tesi di laurea magistrale, Università degli studi di Padova, 2019.
- [8] P. G. Potti, B. Rao, and V. Srivastava, “Notched tensile strength for long-and short-fiber reinforced polyamide,” *Theoretical and applied fracture mechanics*, vol. 33, no. 2, pp. 145–152, 2000.

- [9] F. Gomez, G. Guinea, and M. Elices, "Failure criteria for linear elastic materials with u-notches," *International Journal of Fracture*, vol. 141, no. 1, pp. 99–113, 2006.
- [10] F. Gómez and M. Elices, "A fracture criterion for blunted v-notched samples," *International Journal of Fracture*, vol. 127, no. 3, pp. 239–264, 2004.
- [11] F. Gómez and M. Elices, "A fracture criterion for blunted v-notched samples," *International Journal of Fracture*, vol. 127, no. 3, pp. 239–264, 2004.
- [12] F. Gómez and M. Elices, "Fracture loads for ceramic samples with rounded notches," *Engineering fracture mechanics*, vol. 73, no. 7, pp. 880–894, 2006.
- [13] S. Hitchen, S. Ogin, P. Smith, and C. Soutis, "The effect of fibre length on fracture toughness and notched strength of short carbon fibre/epoxy composites," *Composites*, vol. 25, no. 6, pp. 407–413, 1994.
- [14] S. Toll and C.-G. Aronsson, "Notched strength of long-and short-fibre reinforced polyamide," *Composites science and technology*, vol. 45, no. 1, pp. 43–54, 1992.
- [15] Z. P. Bazant, I. M. Daniel, and Z. Li, "Size effect and fracture characteristics of composite laminates," 1996.
- [16] Z. P. Bažant, "Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal," *Journal of engineering mechanics*, vol. 110, no. 4, pp. 518–535, 1984.
- [17] J. W. Mar and K. Y. Lin, "Fracture of boron/aluminum composites with discontinuities," *Journal of Composite Materials*, vol. 11, no. 4, pp. 405–421, 1977.
- [18] S. C. Tan, "Laminated composites containing an elliptical opening. ii. experiment and model modification," *Journal of composite materials*, vol. 21, no. 10, pp. 949–968, 1987.
- [19] M. Zappalorto, "Mode i generalised stress intensity factors for rounded notches in orthotropic plates," *Theoretical and applied fracture mechanics*, vol. 101, pp. 356–364, 2019.
- [20] M. Zappalorto, "Universal equations for the mode i stress distribution in finite size orthotropic plates with blunt notches and holes," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 109, p. 102768, 2020.

- [21] M. El Haddad, T. Topper, and K. Smith, "Prediction of non propagating cracks," *Engineering fracture mechanics*, vol. 11, no. 3, pp. 573–584, 1979.
- [22] M. Williams, "Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension," 1952.
- [23] H. Neuber, *Kerbspannungslehre: Grundlagen für genaue Festigkeitsberechnung mit Berücksichtigung von Konstruktionsform und Werkstoff*. Springer-Verlag, 2013.
- [24] 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*, vol. 112, no. 3, pp. 275–298, 2001.
- [25] C. Sonsino and E. Moosbrugger, "Fatigue design of highly loaded short-glass-fibre reinforced polyamide parts in engine compartments," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, no. 7, pp. 1279–1288, 2008.
- [26] R. Lang, J. Manson, and R. Hertzberg, "Mechanisms of fatigue fracture in short glass fibre-reinforced polymers," *Journal of Materials Science*, vol. 22, no. 11, pp. 4015–4030, 1987.
- [27] M. Wyzgoski and G. Novak, "Fatigue fracture of nylon polymers," *Journal of Materials Science*, vol. 26, no. 23, pp. 6314–6324, 1991.
- [28] J. F. Mandell, F. J. McGarry, and C.-G. Li, "Fatigue crack growth and lifetime trends in injection molded reinforced thermoplastics," *High Modulus Fiber Composites in Ground Transportation and High Volume Applications. Edited by Wilson DW. ASTM STP*, vol. 873, pp. 36–50, 1985.