

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali (DTG)

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

Analisi della resistenza a fatica di compositi a fibra discontinua
per applicazioni automotive avanzate

Analysis of fatigue response of discontinuous fiber composites for
advanced automotive applications

Relatore

Marino Quaresimin

Piergiorgio Casale

Anno Accademico 2017/2018

Ringraziamenti

Ringrazio anzitutto il Professor Marino Quaresimin, senza il cui supporto e la cui guida questa tesi non esisterebbe.

Un ringraziamento va al mio relatore aziendale Stefan Klaus Nothdurfter, al mio tutor Gianpiero Cerrone, ad Automobili Lamborghini ed al mio team di lavoro, sempre presenti e senza cui non avrei potuto realizzare questo lavoro.

Un ringraziamento particolare va ai colleghi ed agli amici che mi hanno incoraggiato o che hanno speso parte del proprio tempo con me in questo percorso di studi.

Un grazie commosso va a mia madre Anna Rita, mio padre Cesare e mia sorella Giulia, per i sacrifici fatti ogni giorno per garantirmi un futuro dignitoso. A loro sarò eternamente grato e debitore.

Ringrazio la famiglia della mia fidanzata che da anni mi supporta dandomi man forte con estrema disponibilità e gentilezza.

Un ringraziamento speciale va ai miei nonni, che hanno costruito fin dalle basi la mia educazione. Un pensiero speciale va a te, nonno Peppe, che sei stato colonna portante del mio percorso fin dai primi passi ma che sfortunatamente non puoi guardarmi arrivare nel giorno del traguardo.

Infine, ma di immensa importanza, un ringraziamento enorme va a te, Giulia, che hai condiviso con me gli anni universitari, che sei sempre stata presente anche nei momenti più critici, che sei amica prima di tutto. Senza di te non avrei raggiunto questo traguardo, per cui te ne devo la maggior parte. Grazie

A voi e a tutte le persone che hanno contribuito e partecipato al raggiungimento di questo traguardo dedico il mio lavoro.

Indice

1. I materiali compositi e fatica	1
1.1 Introduzione	1
1.2 I materiali compositi	3
1.2.1 Sistemi e tipologie di rinforzo	4
1.2.2 Sistemi e tipologie di matrice	22
1.3 La fatica	36
1.3.1 Tipi di sollecitazione e rapporto di ciclo R	37
1.3.2 La curva di Woehler	39
1.3.3 Criteri di progettazione (cenni)	42
1.3.4 Parametri che influenzano la resistenza a fatica nei compositi	43
1.3.5 Meccanismi di danneggiamento a fatica	47
1.3.5.1 Materiali metallici	47
1.3.5.2 Compositi a fibra continua	51
2. Tecnologie di processo e materiale utilizzato	56
2.1 Compression Moulding	56
2.2 RTM	58
2.3 Manual prepreg lay-up e Autoclave	59
2.4 Confronto tra le tecnologie	61
2.5 HexMC M77 i2000 RA	62
3. Pianificazione, strumentazione e caratterizzazione	68
3.1 Working Plan: Test Matrix	68
3.1 BBA: Building Block Approach	69
3.3 DSC: Differential Scanning Calorimetry	70
3.4 DMA: Dynamic Mechanical Analysis	72
3.5 Test quasi statici	75

3.5.1 Prove di trazione	75
3.5.2 Prove di compressione (modulo e resistenza)	89
3.6 Test dinamici	93
3.6.1 Prove di fatica	93
4. Limite di fatica tramite analisi termografica	103
4.1 Analisi termoelastica TSA	103
4.2 Le termocamere	106
4.3 Modello termografico per la valutazione del limite di fatica	109
5. Risultati e discussione	113
5.1 Micrografia	113
5.2 Analisi DSC	113
5.3 Analisi DMA	115
5.4 Trazione	117
5.4.1 Trazione UNT (Unnotched)	117
5.4.2 Trazione OH (Open Hole)	123
5.5 Compressione	128
5.6 Osservazioni riassuntive su trazione e compressione	130
5.7 Fatica	132
5.7.1 Curva di Woehler	132
5.7.2 Analisi della rigidità durante i test dinamici	135
5.8 Osservazioni riassuntive Woehler e andamenti della rigidità nei test dinamici	146
5.9 Analisi dei test dinamici tramite termografia e limite di fatica	148
5.9.1 Metodo n provini	149
5.9.2 Metodo 1 provino	159
5.10 Osservazioni riassuntive sull'analisi termografica	162
5.11 Modalità di rottura	163
5.11.1 Trazione	163

5.11.2 Compressione	172
5.11.3 Fatica	173
6. Conclusioni e sviluppi futuri	181

1. Materiali compositi e fatica

1.1 Introduzione

Il seguente elaborato rappresenta la conclusione di un percorso di tesi svolto presso il Laboratorio di Ricerca e Sviluppo di ACLSD (Advanced Composite and Lightweight Structures Development) presso Automobili Lamborghini con sede a Sant'Agata Bolognese (BO). L'interesse verso gli argomenti trattati deriva dalla curiosità nata durante il percorso di studi di Laurea Magistrale nei riguardi dei materiali compositi, una categoria in continua evoluzione e sviluppo.

In particolare, Automobili Lamborghini S.p.A., nella sua storia si è impegnata sempre di più nella ricerca sui materiali compositi, fino a fondare nel 2007 una propria divisione di ricerca interna, l'ACLSD, dedicata alla ricerca di materiali innovativi e allo sviluppo di nuovi concetti e tecnologie applicate alla fibra di carbonio, in grado di massimizzare il rapporto prestazioni/peso delle parti e della vettura. Il dipartimento è costituito da due divisioni, Engineering e Manufacturing che seguono simultaneamente tutte le fasi di sviluppo del prodotto. Nell'ottica del continuo miglioramento delle prestazioni delle vetture, del lightweight design e della sicurezza, la divisione Engineering sviluppa e seleziona materiali, tecnologie e soluzioni innovative mirate all'utilizzo della fibra di carbonio per componenti impensabili fino ad oggi nel mondo dell'automotive estremo. Nel 2007 è stata inoltre istituita la collaborazione tra Lamborghini e Boeing, che ha consentito di trasferire la tecnologia utilizzata nel settore Aerospace al settore Automotive, con particolare attenzione all'approccio modulare BBA (Building Block Approach, che verrà poi trattato nel capitolo dedicato).

Un nuovo scenario per il futuro è stato aperto nel 2008, con lo sviluppo del Forged Composites, un materiale composito avanzato. Dopo un percorso di ricerca condotto a livello internazionale per oltre trent'anni, Lamborghini introduce il Forged Composite con l'obiettivo di dare un grande impulso all'innovazione tecnologica dei materiali compositi, elevandoli ad un livello superiore, mai raggiunto finora. Con il Forged Composite, Lamborghini conquista il podio dell'innovazione tecnologica nel mondo dell'automotive. Proprietà tecniche finora impensabili e un processo di stampaggio completamente nuovo sono gli elementi che fanno di questo materiale la punta di diamante dei materiali compositi.

Nel seguente lavoro di tesi, viene effettuato lo studio sperimentale riguardo il comportamento a fatica di compositi in fibra di carbonio discontinua e matrice epossidica (HexMC M77 i2000 RA). Le analisi vengono condotte attraverso metodologia standard e un modello termografico [1][2] allo scopo di generare un confronto. Inizialmente l'indagine sperimentale è stata realizzata con prove di micrografia, DSC e DMA per verificare l'omogeneità delle piastre, confermare la ripetibilità del processo di produzione e conoscere la temperatura di transizione vetrosa al fine di confrontare i risultati ottenuti con dei riferimenti a disposizione [8]. Successivamente sono stati eseguiti dei test statici di trazione/compressione con l'obiettivo di ricavare il modulo elastico e la resistenza a rottura necessari per l'analisi a fatica. E' stata inoltre discussa l'influenza di alcuni parametri dimensionali rispetto al modulo elastico (E) e resistenza a rottura (σ_r) oltre che l'effetto d'intaglio sul materiale per avere un confronto con i dati presenti in letteratura [3]. Le prove di

fatica sono state condotte su diversi provini al fine di ricavare la curva di Woehler come da metodologia standard. Dai dati ottenuti per ogni campione è stato possibile osservare una riduzione della rigidità. Le fasi più critiche si manifestano negli stadi iniziale e finale della vita a fatica. Inoltre, dopo la frattura è stata condotta un'ispezione micrografica in sezione allo scopo di ottenere dati riguardo le modalità di rottura che ha confermato quanto presente in letteratura [3][4], ossia che la frattura è un evento dominato dalle proprietà della matrice. Infine, tramite l'utilizzo di una termo-camera, è stato possibile applicare il modello sperimentale termografico che permette di stimare il limite di fatica riducendo altamente i tempi. I risultati sono stati confrontati con quelli ricavati tramite metodo standard per verificare l'effettiva applicabilità ed efficacia della termografia su compositi a fibra discontinua. Il tutto grazie alla strumentazione messa a disposizione dal laboratorio ACLSD di Automobili Lamborghini S.p.A.

1.2 I materiali compositi

Un materiale composito è la combinazione macroscopica di due o più fasi distinte, con un'interfaccia riconoscibile che le separa. I compositi vengono impiegati non solo per le loro proprietà strutturali ma anche per le particolari caratteristiche elettriche, termiche, ambientali. Sebbene il termine composito possa essere applicato a moltissime combinazioni di materiali, una definizione di uso più comune fa riferimento a materiali costituiti da una matrice continua che lega e dà forma ad un sistema di rinforzo che conferisce resistenza e rigidità. Le proprietà ottenute risultano, nel complesso, superiori a quella dei singoli costituenti. I compositi, quindi, presentano tipicamente una fase di rinforzo in forma di fibre o particelle più rigide e/o resistenti della fase matrice, continua. La presenza del rinforzo conferisce al composito anche caratteristiche fisiche diverse da quelle della sola matrice, e questo rappresenta un vantaggio in molteplici applicazioni; modifiche sostanziali nelle proprietà fisiche riguardano, ad esempio, la conducibilità termica ed elettrica, il coefficiente di espansione termica, il coefficiente di attrito, la resistenza ambientale, l'assorbimento di umidità ecc.

Un primo livello di classificazione dei compositi fa riferimento al tipo di matrice: si parla quindi di compositi a matrice ceramica (CMC – Ceramic Matrix Composites), a matrice metallica (MMC – Metal Matrix Composites) e polimerica (PMC - Polymer Matrix Composites). Tra quest'ultimi un'ulteriore distinzione viene fatta tra i compositi a matrice termoindurente, di più largo impiego nelle costruzioni di strutture aeronautiche/automobilistiche, e i compositi a matrice termoplastica.

Un secondo livello di classificazione fa riferimento alla forma del rinforzo. I rinforzi possono essere costituiti da particelle (polveri, microsfele, microfibre, whiskers, ecc.), da fibre discontinue, da fibre continue. Nei compositi con fibre, queste possono essere disposte lungo direzioni predefinite, organizzate in tessuti in uno o più strati o strutture tridimensionali.

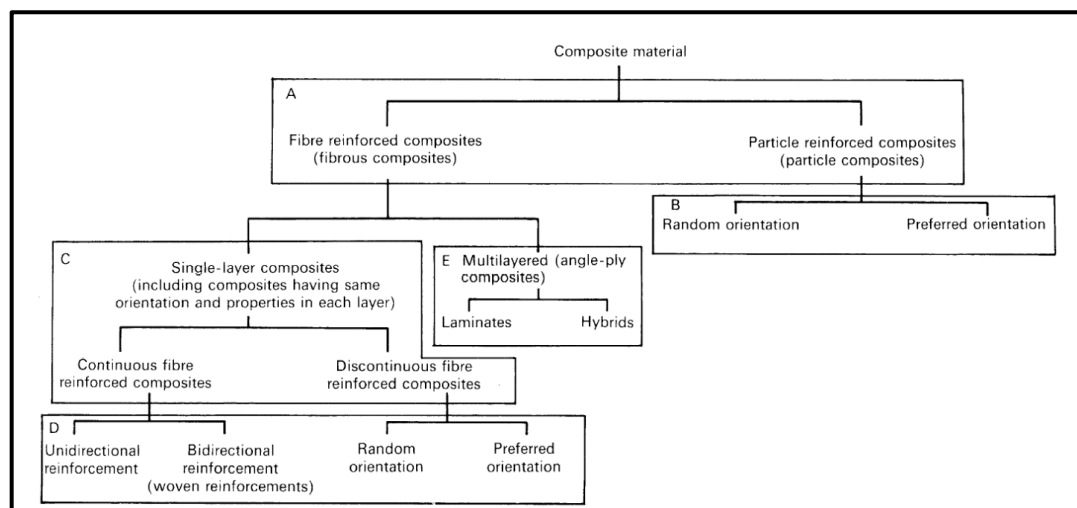


Figura 1.1 [9]: schema di classificazione di compositi.

Dal punto di vista strutturale, le caratteristiche meccaniche in generale sono il risultato di meccanismi di trasferimento degli sforzi tra matrice e rinforzo: perché ciascuna delle fasi dia il proprio contributo al comportamento meccanico è necessario che le sollecitazioni applicate vengano trasferite ad esse. Un efficace trasferimento degli sforzi richiede un'estesa superficie di contatto tra le fasi oltre che un'efficiente interfaccia. Una prima conseguenza di ciò è che le migliori caratteristiche di resistenza e rigidità possono essere ottenute con rinforzi fibrosi a fibra lunga, che rappresentano quindi i sistemi di rinforzo attualmente di più largo impiego nei compositi per applicazioni strutturali avanzate come quelle aerospaziali ed automobilistiche.

1.2.1 Sistemi e tipologie di rinforzo

Le prestazioni finali del composito sono primariamente governate dalle caratteristiche del rinforzo. I fattori determinanti da questo punto di vista sono:

- le proprietà meccaniche delle fibre, in particolare resistenza e rigidità;
- la geometria, in particolare la lunghezza delle fibre (continue o discontinue, lunghe o corte);
- l'architettura delle fibre, che possono essere disposte casualmente lungo le tre direzioni (random nello spazio), casualmente lungo due direzioni (random nel piano), continue ed allineate in una o più direzioni (unidirezionali, multiassiali), intrecciate a formare tessuti o preforme;
- la frazione volumetrica delle fibre;
- l'efficienza dell'adesione fibra-matrice.

I compositi ad alte prestazioni contengono quindi tipicamente fibre lunghe ad alta resistenza e/o rigidità, presenti con frazioni volumetriche a volte fino a oltre il 70%. Nelle applicazioni strutturali avanzate, di tipo aerospaziale o automotive, le fibre più comunemente utilizzate sono le fibre di carbonio e grafite, le fibre aramidiche, le fibre di vetro.

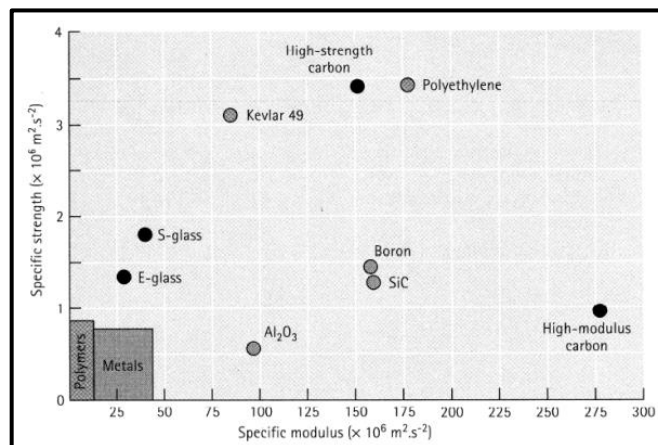


Figura 1.2 ^[9]: confronto delle proprietà meccaniche specifiche tra varie fibre di rinforzo.

Material	Density (Mg.m ⁻³)	Tensile Strength (MN.m ⁻²)	Modulus of Elasticity (GN.m ⁻²)	Melting Temperature (°C)	Specific Modulus (× 10 ⁶ m ² .s ⁻²)	Specific Strength (× 10 ⁶ m ² .s ⁻²)
Polymers:						
Kevlar	1.44	4 480	124	500	86	3.11
Nylon	1.14	825	2.8	249	2.46	0.72
Polyethylene	0.97	3 300	172	147	177	3.40
Metals:						
Be	1.83	1 275	303	1 277	166	0.70
Boron	2.36	3 450	379	2 030	161	1.46
W	19.40	4 000	407	3 410	21	0.21
Glass:						
E-glass	2.55	3 450	72.4	<1 725	28	1.35
S-glass	2.50	4 480	86.9	<1 725	35	1.79
Carbon:						
HS (high strength)	1.75	5 650	276	3 700	158	3.23
HM (high modulus)	1.90	1 860	531	3 700	279	0.98
Ceramics:						
Al ₂ O ₃	3.95	2 070	379	2 015	96	0.52
B ₄ C	2.36	2 275	483	2 450	205	0.96
SiC	3.00	3 930	483	2 700	161	1.31
ZrO ₂	4.84	2 070	345	2 677	71	0.43
Whiskers:						
Al ₂ O ₃	3.96	20 700	427	1 982	108	5.23
Cr	7.20	8 890	241	1 890	33	1.23
Graphite	1.66	20 700	703	3 700	423	12.47
SiC	3.18	20 700	483	2 700	152	12.47
Si ₃ N ₄	3.18	13 790	379		119	4.34

Figura 1.3 [9]: proprietà meccaniche e fisiche di alcune tipologie di fibre di rinforzo.

In generale, le principali tipologie di fibra sono:

- Fibra di vetro
- Fibre aramidiche o Kevlar
- Fibre di boro
- Fibre di carbonio

Interfaccia fibra-matrice

Si è accennato al fatto che affinché un sistema di rinforzo, fibre o particelle, contribuisca alla resistenza e/o alla rigidità del materiale è necessario un efficiente trasferimento degli sforzi dalla matrice al rinforzo e viceversa. Il rinforzo, quindi, deve risultare efficientemente legato alla matrice per permettere alla sollecitazione che agisce su questa di essere trasferita attraverso l'interfaccia. In molti casi, nella zona di interfaccia è presente una fase distinta, ad esempio a seguito di reazioni tra rinforzo e matrice, oppure a seguito dell'applicazione di appretti. Le caratteristiche dell'interfaccia sono specifiche del sistema matrice-rinforzo considerato.

I meccanismi di azione dell'adesione possono essere di origine fisica, chimica, organica. In ogni caso, perché esista adesione, è necessario che durante il processo matrice e rinforzo vengano portati a stretto contatto. In una qualche fase del processo di impregnazione o formatura del composito la matrice assume uno stato liquido più o meno viscoso, in cui è in grado di fluire. Un concetto chiave in questo contesto è quello di bagnabilità. La bagnabilità definisce la capacità di un liquido di spandersi sulla superficie. Una buona bagnabilità garantisce che la matrice liquida fluisca sul rinforzo ricoprendo ogni asperità e rugosità della superficie. Poiché ci sia una buona bagnabilità è necessario che la matrice fluida abbia bassa viscosità in modo da fluire in tempi brevi. Inoltre, condizione termodinamica necessaria è che il processo di bagnatura comporti una riduzione dell'energia del sistema. Lo spandimento di un liquido su di un solido richiede la sostituzione di

un'interfaccia solido-aria con un'interfaccia solido-liquido più un'interfaccia liquido-aria. Perché questo avvenga spontaneamente è necessario che l'energia specifica di interfaccia (o tensione superficiale) solido-aria γ_{SA} sia maggiore della somma delle energie specifiche delle nuove interfacce solido-liquido γ_{SL} e liquido-aria γ_{LA} :

$$\gamma_{SA} > \gamma_{SL} + \gamma_{LA}$$

Una immediata conseguenza di questa relazione è che superfici ad alta tensione superficiale vengono facilmente bagnate da matrici a bassa tensione superficiale. Una volta che la matrice bagna il rinforzo può avvenire il legame tra le due fasi.

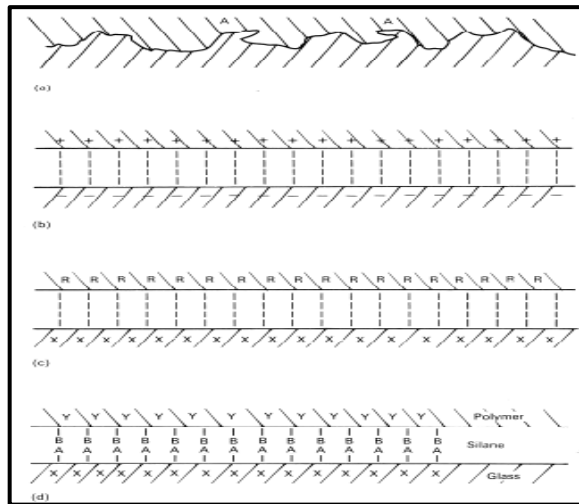


Figura 1.4 ^[9]: principali meccanismi di adesione. (a) adesione meccanica, (b) adesione fisica, (c) adesione chimica, (d) compatibilizzanti e promotori di adesione.

L'adesione meccanica (*interlocking*) è legata alla possibilità per la matrice di penetrare nelle asperità del rinforzo ed è quindi tanto più efficace quanto più è rugosa la superficie, ma la sola adesione meccanica non è in grado di garantire un'efficiente trasmissione degli sforzi.

L'adesione fisica è il risultato di interazioni elettrostatiche, e/o legami secondari (ad es. Van der Waals) tra matrice e rinforzo. Pur essendo interazioni deboli sono sufficienti a garantire un'ottima adesione.

L'adesione chimica che deriva dalla formazione di legami chimici primari tra matrice e rinforzo permette di ottenere una efficiente trasmissione degli sforzi, ma, poiché si formino legami all'interfaccia, è necessario che la superficie solida possieda gruppi chimici reattivi, compatibili con la matrice.

Compatibilizzanti e promotori di adesione sono generalmente costituiti da molecole in grado, da un lato, di formare legami forti con i gruppi reattivi sulla superficie del rinforzo, dall'altro di interagire per reazione o interdiffusione con la matrice.

La fibra di vetro

Le fibre di vetro costituiscono il rinforzo più ampiamente impiegato per i compositi a matrice polimerica. I principali vantaggi di queste fibre sono il costo contenuto, l'alta resistenza meccanica e chimica, le ottime caratteristiche di isolamento termico e elettrico. Gli svantaggi sono invece il modulo elastico relativamente basso, la densità superiore a molti altri tipi di rinforzo e la relativamente bassa resistenza a fatica. I tipi di fibra più comunemente impiegati nei compositi a matrice polimerica sono le fibre di vetro E e vetro S. Come per i normali vetri, il costituente principale delle fibre è la silice. Altri ossidi, come ad esempio l'allumina vengono aggiunti per modificare la struttura e la lavorabilità del fuso. Il processo di produzione, illustrato in Fig.1.5, consiste nella fusione dei costituenti all'interno di grandi forni operanti a temperature superiori a 1300°C. Il fuso viene poi estruso e filato ad alta velocità attraverso delle filiere in platino (*bushing*), ed i filamenti vengono raggruppati in fasci (*strand*) di poche centinaia di fibre. Gli strand possono poi essere raggruppati ulteriormente in fasci di dimensioni maggiori (*roving*). Le fibre vengono rivestite con appretti (*sizing*) all'uscita del bushing. I sizing, che possono variare in base all'applicazione finale, hanno la funzione primaria di proteggere le fibre durante le lavorazioni, favorire la bagnabilità e l'adesione da parte delle matrici polimeriche.

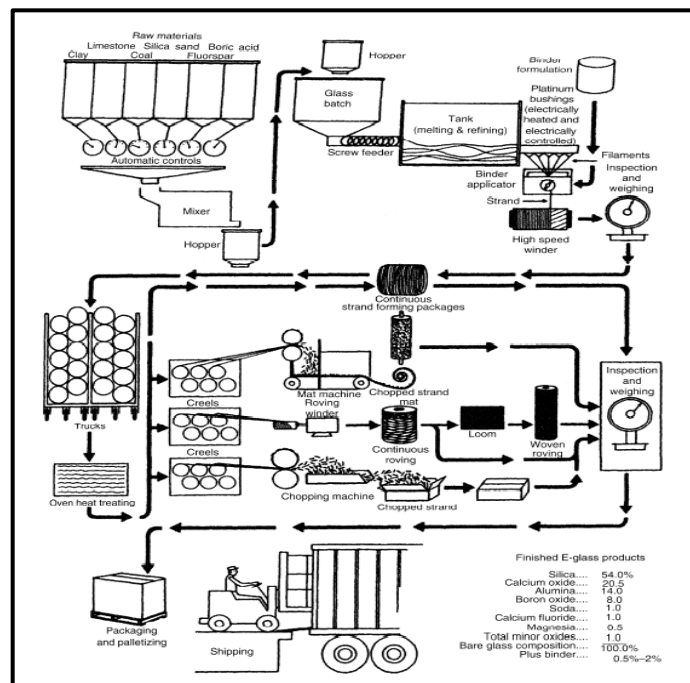


Figura 1.5 [9]: schematizzazione del processo di produzione della fibra di vetro.

In Fig 1.6 sono illustrati alcuni esempi di composito in fibra di vetro.



Figura 1.6 ^[12]: esempi di composito in fibra di vetro. Da sinistra: lana di vetro, vetroresina, fibrocemento (eternit).

Per quanto riguarda le applicazioni, componenti in composito rinforzato con fibra di vetro si possono trovare nel settore aerospace, automotive e nautico.

Le fibre aramidiche

Le fibre aramidiche sono fibre poliammidiche aromatiche altamente cristalline. Rispetto a tutte le altre fibre di rinforzo possiedono la minor densità e la maggior resistenza specifica. Tra le più interessanti per il settore aerospace ed automotive spiccano il Kevlar, nei suoi diversi gradi (49, 29, HM, 149, 129) ed il Nomex. I valori assoluti di resistenza longitudinale sono confrontabili con quelli delle fibre di vetro e carbonio, ma la densità è nettamente inferiore. Le proprietà di queste fibre dipendono essenzialmente dalla loro particolare struttura molecolare, costituita da lunghe catene polimeriche particolarmente rigide ed orientabili, tra le quali sono presenti legami idrogeno che contribuiscono alla resistenza e rigidità della microstruttura.

	Density ρ (Mg/m ³)	Young's Modulus, (GPa) E_f	Tensile Strength, (MPa) $\hat{\sigma}_{TF}$	E_f/ρ	$\hat{\sigma}_{TF}/\rho$
ARAMID					
Kevlar 29	1.44	59	2640	41.0	1833
Kevlar 49	1.45	130	2900	89.7	2000
Kevlar 149	1.47	146	2410	99.3	1639
Technora HM50	1.39	74	2990	53.2	2151
Twaron	1.44	80	2800	55.6	1944
Twaron HM	1.45	115	3150	79.3	2172

Figura 1.7 ^[9]: caratteristiche meccaniche di alcune fibre aramidiche commerciali.

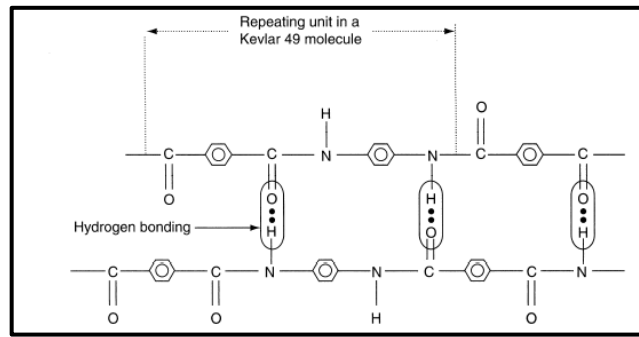


Figura 1.8 ^[9]: schematizzazione della struttura molecolare del Kevlar 49.

Il processo di produzione consiste nell'estrusione di una soluzione di polimero in acido solforico. Il solvente acido viene rimosso con il passaggio attraverso un bagno di coagulazione e i fili raggiungono lo stato altamente orientato a seguito di stiro a freddo. La Fig. 1.9 mostra lo schema di due processi di produzione di fibre aramidiche. La struttura finale del materiale è costituita da molecole associate in lunghe fibrille, le quali sono a loro volta legate a formare fili continui aventi diametri dell'ordine di 10-20 μm .

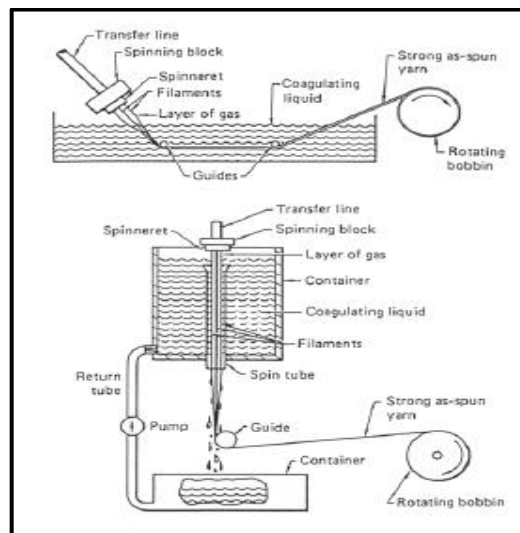


Figura 1.9 ^[9]: schema di due apparati di produzione di fibre aramidiche.

Un carattere distintivo delle fibre organiche ad alto modulo, tra cui le fibre aramidiche, è quindi l'orientazione molecolare molto spinta che introduce una estrema anisotropia delle proprietà meccaniche. Le proprietà di resistenza e rigidità migliori vengono raggiunte in direzione longitudinale, mentre in direzione trasversale la resistenza risulta solo il 20% di quest'ultima.

Altre caratteristiche importanti concernono la buona stabilità delle fibre anche ad alte temperature, la resistenza meccanica che si riduce sensibilmente con l'aumento della temperatura ed una riduzione di resistenza con la prolungata esposizione alla luce solare.

Tra le maggiori applicazioni delle fibre aramidiche ed in particolare del Kevlar vi è la protezione balistica alla persona (giubbotti antiproiettile, caschi) ed alle cose (protezione balistica di veicoli militari, barriere antiproiettile).

La fibra di boro

Le fibre di boro vengono prodotte singolarmente mediante deposizione chimica CVD a temperatura tra 1100-1300°C di boro su substrato rappresentato da un filamento di tungsteno o carbonio. Il boro, generato dalla decomposizione di BCl_3 in presenza di idrogeno, si deposita sul substrato, formando un rivestimento compatto. La diffusione e reazione del boro con il tungsteno porta alla modifica ed eventualmente scomparsa del substrato. Per ridurre la sensibilità ai difetti possono essere impiegati dei trattamenti termici o applicati dei rivestimenti protettivi, migliorando la resistenza ed aumentando la compatibilità con le matrici, in particolare con quelle metalliche. Le fibre di boro hanno un modulo elastico elevato (380-420 GPa) e grande diametro (100-200 μm); queste caratteristiche conferiscono alla fibra di boro una superiore resistenza a carichi di compressione rispetto alla fibra di carbonio. Trovano quindi applicazione in componenti in composito soggetti a carichi compressivi, anche in matrice metallica (ad esempio alluminio). Queste fibre possiedono inoltre un'ottima resistenza termica e chimica ma l'alta densità ed il costo ne limitano l'impiego.

Resistenza a trazione (MPa)	3450
Modulo elastico (MPa)	400 000
Modulo di taglio (MPa)	165 600
Coeff. di dilatazione lineare ($10^{-6}/\text{K}$)	5,3
Densità (g/cm^3)	2,39-2,61

Figura 1.10 ^[9]: *caratteristiche meccaniche e fisiche delle fibre di boro.*

La fibra di carbonio

La fibra di carbonio nasce con l'obiettivo di migliorare la fibra di vetro soprattutto in termini di modulo elastico. Esse sono composte da anelli di grafite allineati lungo una direzione preferenziale. L'allineamento risulta estremamente importante in quanto gli anelli di grafite, avendo forma esagonale, formano degli strati con struttura a nido d'ape estremamente resistenti, mentre i legami tra gli strati sono di Van Der Waals e quindi deboli. E' stato necessario mettere a punto un processo produttivo in grado di garantire l'allineamento degli anelli lungo la direzione principale della fibra.

Le fibre di carbonio e grafite vengono prodotte a partire da precursori, tipicamente polimerici, che vengono sottoposti a processo di pirolisi e conversione parziale (fibre di carbonio) o totale (fibre di grafite) in carbonio. I materiali precursori sono costituiti principalmente da fibre di poliacrilonitrile (PAN), cellulosa (Rayon) o pece (Pitch), ottenuta dai processi di distillazione del petrolio. Tra queste, le fibre da pece riscuotono grande interesse per via del basso costo della materia prima ed elevato modulo elastico posseduto.

Il processo produttivo parte da fibre polimeriche o di pece ottenute per filatura da fuso. Le fibre (PAN e Rayon) vengono sottoposte ad un primo trattamento termico di stabilizzazione e parziale ossidazione mediante riscaldamento in presenza di aria a circa 250°C. Le fibre vengono poi pirolizzate ad alta temperatura fino a 1000°C e successivamente fino ad oltre 1300-1500°C, in ambiente inerte (azoto), per la carbonizzazione del materiale. Nel caso di fibre ad alto modulo il trattamento termico viene spinto a temperature superiori a 1800-2000°C, a volte oltre 3000°C, con grafitizzazione quasi completa. Le Fig. 1.11 e 1.12 mostrano rispettivamente lo schema di processo per la produzione di fibre da precursore PAN e lo schema di conversione in grafite (il processo di pirolisi, carbonizzazione e grafitizzazione comporta l'eliminazione parziale o completa degli elementi O, N, H presenti nella fibra precursore, lasciando una struttura costituita da nastri di grafite orientati lungo la fibra).

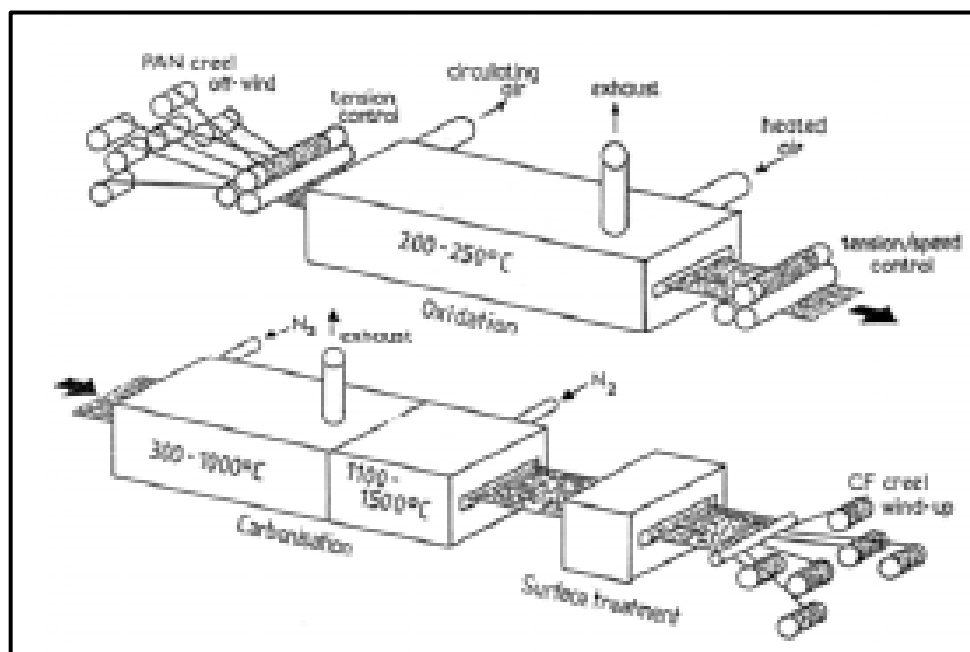


Figura 1.11 ^[9]: rappresentazioni schematiche del processo produttivo per fibre ex-PAN.

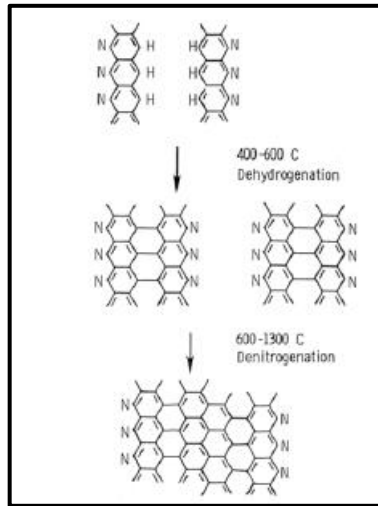


Figura 1.12 ^[9]: schema di conversione nelle fibre da PAN in grafite.

Fibre di carbonio ad alta resistenza sono ottenute a temperature inferiori e contengono zone grafittiche orientate all'interno di una matrice continua di carbonio amorfo con la presenza residua di altri elementi. Fibre ad alto modulo, di grafite, sono ottenute a temperature superiori e sono costituite da nastri grafittici continui, marcatamente orientati lungo la direzione della fibra; il materiale è costituito quasi completamente da carbonio. Un ulteriore aumento della temperatura determina una maggiore regolarità e orientamento dei piani di grafite. Le Fig. 1.13 e 1.14 mostrano la variazione del modulo elastico delle fibre in funzione della massima temperatura di trattamento.

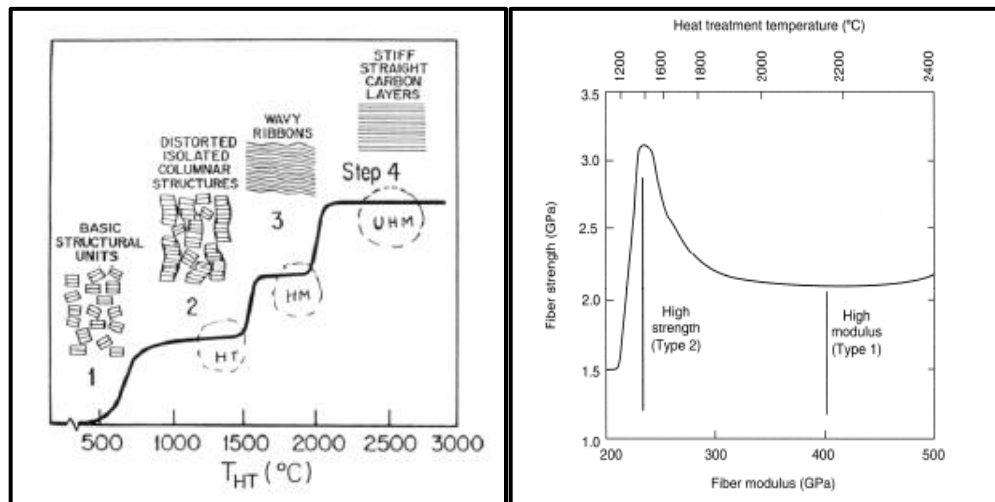


Figura 1.13 ^[9] e 1.14 ^[9]: variazione del modulo elastico e della resistenza delle fibre in funzione della massima temperatura di trattamento.

In generale, l'aumento del modulo elastico è accompagnato da riduzione della resistenza, della deformabilità e della tenacità.

La formazione di fibre ad alto modulo ex-pitch è possibile grazie alle caratteristiche liquido cristalline della pece ad alto peso molecolare. A seguito di riscaldamento a temperatura superiore a 400°C, avviene la polimerizzazione di molecole con aumento del peso molecolare fino a circa 1000 g/mol. In queste condizioni il materiale è costituito da un liquido ad alta viscosità, le cui molecole possono essere orientate in una struttura ordinata (mesofase) mediante estrusione e filatura (*melt spinning*).

	alta resistenza	alto modulo	ultra alto modulo
T grafitiz. (°C)	1300	1800	2500
diametro (µm)	5.5-8	5.5-8	8.5
densità (g/cm ³)	1.8	1.8	1.96
σ traz. (GPa)	3.1-4.6	2.4-2.6	1.9
modulo traz. long. (GPa)	230-260	360-390	520
modulo traz. trasv. (GPa)	14-16	-	-
allungamento (%)	1.3-1.8	0.6-0.7	0.4
contenuto C (%)	92-95	99+	99+
coeff. dilat. long.	-1 *10 ⁻⁶	-	-
coeff. dilat. trasv.	9 *10 ⁻⁶	-	-

densità grafite = 2.26 g/cm³

Figura 1.15 [9]: caratteristiche delle fibre ex-PAN in funzione della temperatura di carbonizzazione/grafitizzazione.

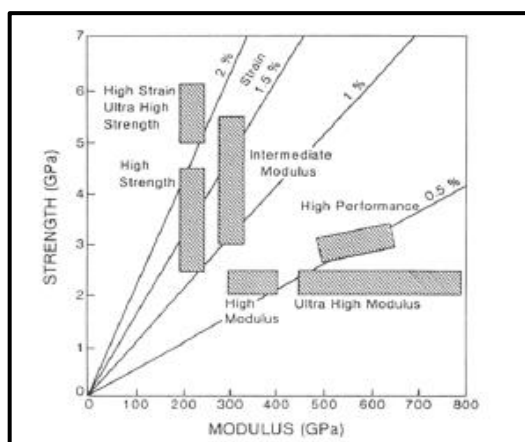


Figura 1.16 [9]: diagramma dell'andamento della resistenza, parametrizzato in funzione della deformazione percentuale, rispetto al modulo elastico. Si confrontano le diverse tipologie di fibra.

Il processo di pirolisi ed eliminazione di elementi come H, O, N, provoca la contrazione della sezione della fibra rispetto all'originaria polimerica. La fibra finale risulta contenere numerosi vuoti e difetti. La presenza di vuoti è evidenziata dal fatto che la densità delle fibre di carbonio/grafite, pari a 1,7-2 g/cm³, è molto inferiore a quella della grafite, pari a 2,6 g/cm³.

Le tabelle seguenti risaltano le caratteristiche meccaniche delle fibre per impieghi aeronautici ottenute da PAN e da pitch.

Property	Commercial, standard modulus	Aerospace		
		Standard modulus	Intermediate modulus	High modulus
Tensile modulus, GPa (10^6 psi)	228 (33)	220–241 (32–35)	290–297 (42–43)	345–448 (50–65)
Tensile strength, MPa (ksi)	380 (550)	3450–4830 (500–700)	3450–6200 (600–900)	3450–5520 (600–800)
Elongation at break, %	1.6	1.5–2.2	1.3–2.0	0.7–1.0
Electrical resistivity, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1650	1650	1450	900
Thermal conductivity, W/m \cdot K (Btu/ft \cdot h \cdot $^\circ$ F)	20 (11.6)	20 (11.6)	20 (11.6)	50–80 (29–46)
Coefficient of thermal expansion, axial direction, 10^{-6} K	-0.4	-0.4	-0.55	-0.75
Density, g/cm ³ (lb/in. ³)	1.8 (0.065)	1.8 (0.065)	1.8 (0.065)	1.9 (0.069)
Carbon content, %	95	95	95	+99
Filament diameter, μm	6–8	6–8	5–6	5–8
Manufacturers	Zoltek, Fortafil, SGL	BPAmoco, Hexcel, Mitsubishi Rayon, Toho, Toray, Tenax, Soficar, Formosa		

Figura 1.17^[9]: proprietà meccaniche delle fibre carbonio/grafite per impieghi aeronautici ottenute da PAN.

Property	Low modulus	High modulus	Ultra-high modulus
Tensile modulus, GPa (10^6 psi)	170–241 (25–35)	380–620 (55–90)	690–965 (100–140)
Tensile strength, MPa (ksi)	1380–3100 (200–450)	1900–2750 (275–400)	2410 (350)
Elongation at break, %	0.9	0.5	0.4–0.27
Electrical resistivity, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1300	900	220–130
Thermal conductivity, W/m \cdot K (Btu/ft \cdot h \cdot $^\circ$ F)	400–1100 (230–635)
Coefficient of thermal expansion in axial direction, 10^{-6} K	...	-0.9	-1.6
Density, g/cm ³ (lb/in. ³)	1.9 (0.069)	2.0 (0.072)	2.2 (0.079)
Carbon content, %	+97	+99	+99
Filament diameter, μm	11	11	10
Manufacturers	BPAmoco, Mitsubishi Kasei		BPAmoco

Figura 1.18^[9]: proprietà meccaniche delle fibre di carbonio/grafite per impieghi aeronautici ottenute da pitch.

Le fibre di carbonio, come la maggior parte dei rinforzi fibrosi per compositi, presentano comportamento fragile con cedimento in campo elastico, senza evidenza di plasticità. La rottura avviene quando la sollecitazione raggiunge un valore critico per la propagazione di un difetto nel

materiale. La resistenza della fibra è quindi governata dalla presenza degli inevitabili difetti lungo essa: la rottura avverrà in corrispondenza del difetto più severo e debole.

Per ciò che concerne le proprietà della fibra di carbonio, essa dimostra elevata inerzia chimica. La sua particolare struttura a strati concentrici legati debolmente tra loro le rende scarsamente resistenti a compressione. Le fibre presentano spesso sezione non circolare ma irregolare e ciò favorisce un miglior contatto con la matrice. Esse vengono spesso sottoposte a trattamenti superficiali, già in fase produttiva, come l'ossidazione parziale che introduce gruppi chimici in grado di aumentare la reattività della superficie. Queste fibre sono, inoltre, conduttive termicamente ed elettricamente e, in particolare, la conducibilità elettrica dipende dal grado di cristallinità raggiunto in fase produttiva. È importante sapere che, rispetto alla maggior parte dei metalli, il carbonio è catodico, per cui il contatto con fibre può attivare corrosione galvanica in metalli meno nobili: il contatto diretto, il collegamento mediante rivettatura, bullonatura, di compositi in fibra di carbonio con strutture in lega di alluminio determina un forte aumento della velocità di corrosione del metallo. Tali accoppiamenti richiedono opportune soluzioni di isolamento tra i diversi materiali. L'esposizione ad ambiente umido non ha alcun effetto sul materiale della fibra, ma nei compositi determina degradazione dell'interfaccia fibra matrice con conseguente riduzione delle prestazioni. La resistenza a fatica è praticamente pari alla resistenza statica: la rottura delle fibre avviene al raggiungimento del carico ultimo, indipendentemente dalla storia di sollecitazione. Tale proprietà ha riscontro anche nelle ottime caratteristiche di resistenza a fatica nei compositi quando il cedimento è dominato dalla resistenza delle fibre.

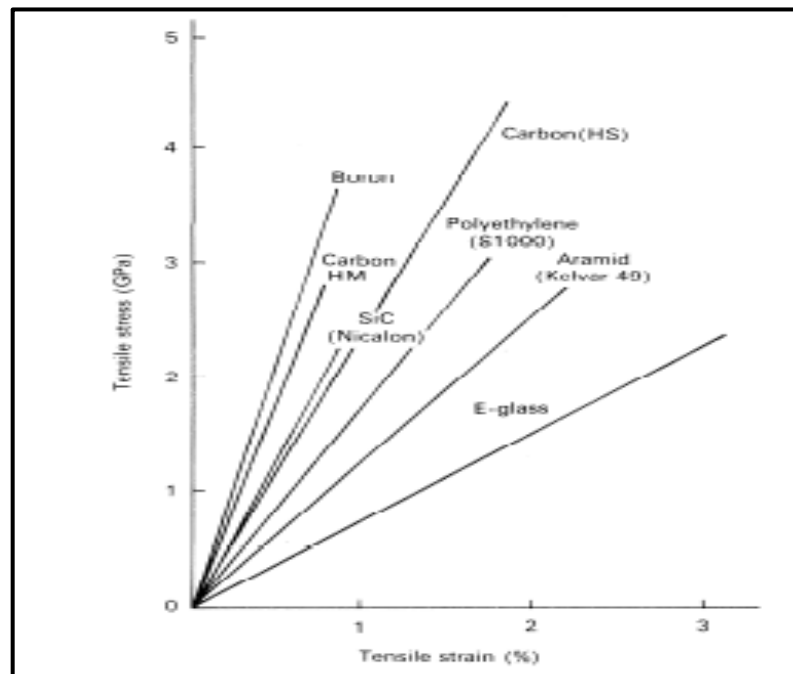


Figura 1.19^[9]: tipiche curve sforzo-deformazione di alcune fibre di rinforzo.

Disposizione delle fibre: tessuti e mat

Per poter esercitare al meglio la loro azione di rinforzo, le fibre si presentano nei compositi con disposizioni definite. La geometria e la disposizione delle fibre nei compositi sono dettate da un lato da esigenze strutturali, che generalmente suggeriscono fibre continue, allineate secondo le direzioni di maggiore sollecitazione, dall' altro da esigenze tecnologiche di formabilità, che spesso impongono vincoli sulle architetture impiegabili. La formatura dei laminati compositi, ad esempio, richiede spesso la sovrapposizione di più strati di fibre o tessuti secondo sequenze di lay-up su stampi di geometria a volte complessa, con curvature singole o doppie diversamente accentuate. E' quindi importante che i diversi strati siano in grado di seguire la forma del componente da realizzare, mantenendo gli allineamenti delle fibre previsti e riducendo al minimo eventuali discontinuità.

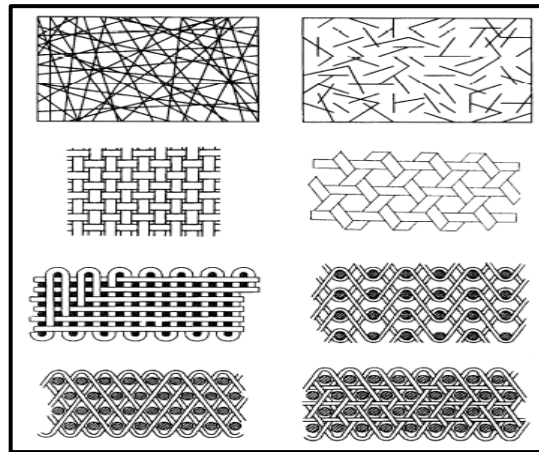


Figura 1.20 ^[9]: alcune tipologie di architetture di rinforzo.

Le principali forme di fibre o tessuti impiegati sono:

- Gli *strand* o *chopped strand* sono fasci costituiti da poche centinaia di fili continui o tagliati (*chopped*).
- I *roving* sono formati di fasci di fili ottenuti associando più fasci (*strand*) sottili. Le fibre sono essenzialmente parallele, avvolte in rocchetti. I *roving* possono venire tagliati in fasci discontinui impiegati per produrre *mat* o in diversi processi;
- Gli *yarn* sono costituiti da uno o più *strand* attorcigliati tra loro per migliorare la maneggiabilità e la lavorabilità (tessitura, taglio);
- I *mat* sono costituiti da fibre casualmente disposte nel piano (*Fig. 1.21*). Le fibre sono tipicamente organizzate in fasci (*strand*) di poche centinaia di fibre e alcuni centimetri di lunghezza (*chopped strand mat*). In alcuni casi sono invece continue (*continuous strand mat*).

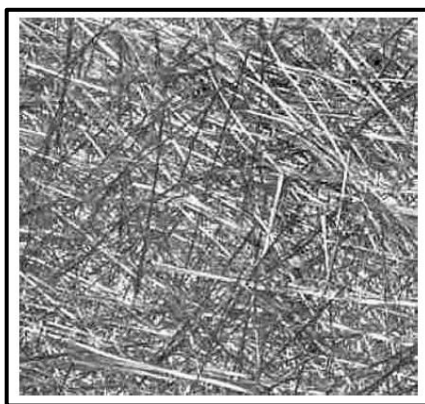


Figura 1.21 ^[9]: *esempio di mat. Fibre casualmente distribuite nel piano.*

Le fibre e fasci sono normalmente legati tra loro mediante sostanze adesive (*binder*) o punti di agugliatura o cucitura (*stitch*) che consentono facile maneggiamento del mat durante la lavorazione; il binder è generalmente solubile nella matrice polimerica. I mat consentono facile formabilità poiché sono in grado di seguire e accomodare curvature complesse, anche relativamente accentuate. Presentano e conferiscono proprietà meccaniche sostanzialmente uniformi nel piano. Inoltre le caratteristiche di resistenza e rigidità in direzioni specifiche sono sensibilmente inferiori rispetto a quelle ottenute con altri sistemi (ad esempio i tessuti) con maggiore grado di ordine delle fibre. Questo è dovuto, da un lato al disallineamento della maggior parte delle fibre rispetto alle direzioni di sollecitazione prevalente, dall'altro al minore contenuto di fibra nel composito finale, consentito dalla disposizione delle fibre; raramente nei mat vengono raggiunti contenuti volumetrici di fibra superiori a 35-40%.

I nastri unidirezionali (UD) sono costituiti da fibre quasi perfettamente allineate e quindi consentono di realizzare compositi con il massimo delle prestazioni nella direzione delle fibre, mentre nelle altre direzioni le caratteristiche di resistenza/rigidità risultano molto limitate. La sovrapposizione di strati UD diversamente orientati permette di modulare le prestazioni del laminato alla direzione di sollecitazione del componente e quindi all'esigenza strutturale. In ogni caso, la drappabilità, cioè la capacità di deformarsi per seguire superfici curve, è per i sistemi UD molto bassa. Essi si prestano principalmente alla produzione di componenti piani o con deboli curvature. Tuttavia, il perfetto allineamento consente un elevato impaccamento delle fibre e la possibilità di ottenere compositi ad alto contenuto di fibra, anche superiore 70% in volume. I laminati ottenuti da sovrapposizione di lamine UD vengono codificati in base alla sequenza di lay-up in cui ciascuna lamina è identificata dal valore dell'angolo di orientazione rispetto alla direzione principale. Ad esempio, la sequenza $[+45/-45/0_4/90_2]_s$ indica un laminato simmetrico (s) derivante dalla sovrapposizione di due strati a + e -45°, 4 strati a 0°, 2 strati a 90°, ripetuta in modo simmetrico (2 strati a 90°, 4 strati a 0°, 2 strati a + e -45°) per un totale di 16 lamine.

L'esigenza di avere facile drappabilità e allo stesso tempo di garantire la direzione delle fibre desiderata impone l'impiego di tessuti (*woven fabric*) in cui fasci di fibre (*tow*) vengono intrecciati lungo due direzioni ortogonale, di trama e ordito. I fasci sono formati da un numero di fibre variabile (ad esempio 1K equivale ad un fascio di 1000 fibre, 3K ad un fascio di 3000 e così via). Come negli UD, l'attenzione alla sequenza di lay-up secondo esigenze strutturali consente di modulare le prestazioni nelle diverse direzioni. I tessuti sono caratterizzati da diversi stili di tessitura (*weave*) che conferiscono diversa capacità di conformarsi su superfici complesse con curvature ridotte:

- *Plain weave*: ogni filo di ordito passa alternativamente sopra e sotto i fili di trama. Il tessuto ha buona stabilità, cioè mantiene uniforme la distanza tra i fili se deformato, ma possiede una drappabilità limitata;
- *Twill weave*: uno più fili di trama si intrecciano con due o più fili di ordito in modo regolare, dando un effetto visivo di ordine diagonale. Possiede migliore drappabilità e facilità di impregnazione rispetto al plain weave, con simile stabilità;
- *n-Satin weave*: è simile al Twill, ma con intrecci più distanziati. Il numero n di fibre tra le intersezioni è solitamente 4,5 o 8. Conferisce ottima drappabilità e bagnabilità, ma riduce la stabilità. Presenta asimmetria da considerare durante laminazione di più strati.
- Altri stili di tessitura impiegati sono il *Basket weave*, simile al plain, ma con gruppi di due o più fili di trama e ordito che si intrecciano alternativamente, il *Crowfoot satin*, il *Leno* e *Mock-Leno*.

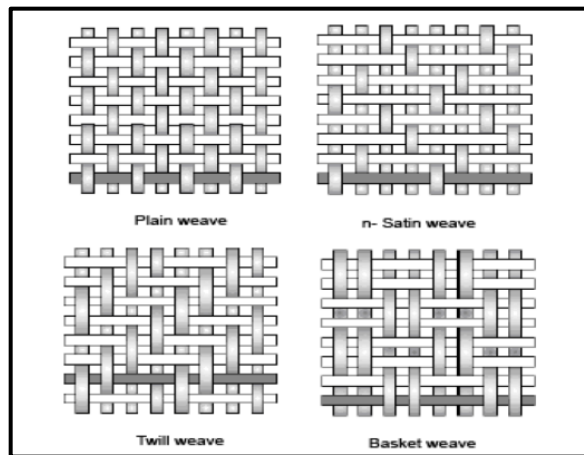


Figura 1.22 ^[9]: alcuni stili di tessitura.

Si osserva che la tessitura introduce necessariamente una componente di disallineamento (*crimp*) delle fibre fuori dal piano del tessuto.

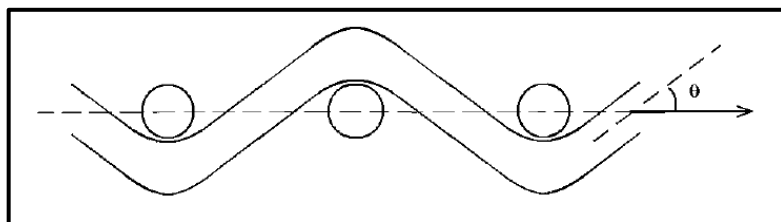


Figura 1.23 ^[9]: rappresentazione schematica del disallineamento da tessitura.

Tale disallineamento si conserva nel composito riducendone la resistenza a trazione e favorendo il cedimento interlaminare. I diversi stili di tessitura, quindi, influiscono anche sulle caratteristiche meccaniche del laminato. Solitamente un intreccio più fitto tra trama e ordito comporta una maggiore riduzione delle prestazioni meccaniche.

Sistemi costituiti da sovrapposizione di due o più lamine UD diversamente orientate vengono definiti *non-crimp*. I diversi strati sono legati in fase di produzione mediante punti di cucitura (*stitch*) con fili resistenti o fibre solubili nelle matrici polimeriche di impregnazione. Questi permettono di ottenere laminati con buone prestazioni in diverse direzioni, con una minore necessità di handling.

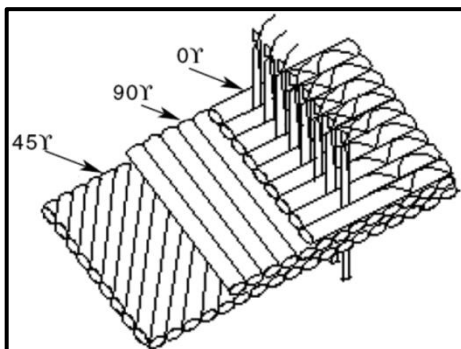


Figura 1.24 ^[9]: esempio di tessuto multiassiale non-crimp.

L'impiego di fibre di due o più materiali diversi, ad esempio carbonio e kevlar, o carbonio e vetro, all'interno dello stesso tessuto ha portato alla realizzazione di tessuti ibridi, che consentono di estendere ulteriormente il range di proprietà meccaniche o fisiche, oltre che di ottenere effetti estetici particolari.

I tessuti vengono classificati in base alla grammatura, cioè al peso del tessuto per metro quadro. I tessuti più comuni hanno grammature variabili tra meno di 150 g/m^2 a 2000 g/m^2 e oltre. Le tecniche di tessitura consentono di intrecciare fili (*braiding*) per produrre sistemi relativamente complessi. Tecniche di sovrapposizione e cucitura di tessuti piani o di intreccio diretto di roving, permettono di assemblare il sistema di rinforzo in preforme compatte costituite da fibre diversamente orientate nello spazio (preforme 3D). Tale disposizione delle fibre permette di

migliorare quelle prestazioni che nei laminati stratificati sono tipicamente governate dalle caratteristiche della matrice, come ad esempio la resistenza a delaminazione. L'assemblaggio di preforme e la loro impregnazione in processi a stampo chiuso consente inoltre un perfetto controllo della disposizione e del contenuto di rinforzo per l'ottenimento di componenti net-shape anche di geometria complessa. Il contenuto, l'orientamento, la stabilità della disposizione della fibra influenzano anche la permeabilità della preforma, cioè la capacità di venire impregnata da parte della resina fluida in fase di processo. Risulta possibile quindi calibrare le caratteristiche meccaniche e di processabilità nelle diverse direzioni.

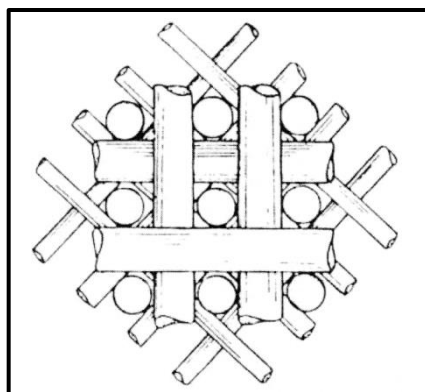


Figura 1.25 ^[9]: disposizione delle fibre lungo generiche direzioni per l'ottimizzazione delle prestazioni del materiale.

La produzione di preimpregnati (prepreg)

La produzione di laminati compositi multistrato mediante la sovrapposizione di strati costituiti da nastri o tessuti preimpregnati consente un buon controllo della distribuzione/orientamento delle fibre, del contenuto di resina e degli spessori finali in quanto viene fortemente limitato il flusso di resina tra le fibre, rispetto a processi che fanno uso di fibre o tessuti secchi. L'impregnazione dei tessuti viene effettuata a monte della formatura finale partendo da resine a bassa viscosità e utilizzando attrezzature e processi specificatamente dedicati. Il sistema resina più indurente viene infiltrato tra le fibre in presenza di solvente (processo in soluzione) o direttamente allo stato liquido (*hot-melt*).

Nel processo in soluzione, più tradizionale, le fibre o i tessuti vengono alimentati ad un bagno di resina con solvente (30-40% di acetone o alcool nel caso delle epossidiche), che ha lo scopo di ridurre la viscosità e favorire la bagnatura del rinforzo. Il tessuto impregnato continua tra una serie di rulli che rimuovono l'eccesso di resina regolandone il contenuto. Il tessuto saturo passa all'interno di un forno (orizzontale o verticale) per l'eliminazione della maggior parte del solvente. La temperatura del forno e la velocità di passaggio controllano la quantità di solvente eliminato e il grado di avanzamento della reticolazione della resina, che non deve essere completa. Una volta che

la resina è quasi esente da solvente (nelle epoxy rimane circa il 2% di solvente) ed è parzialmente reticolata, il prepreg viene avvolto in rotoli con film di separazione generalmente in polietilene o carta siliconata, che evita l'adesione tra i diversi strati e che deve essere rimosso prima della laminazione. In questo stato di reticolazione (*B-Stage*) il preimpregnato ha buona appiccicosità (*tack*) e capacità di incollaggio tra gli strati e può essere ritagliato e impiegato nella laminazione di multistrati.

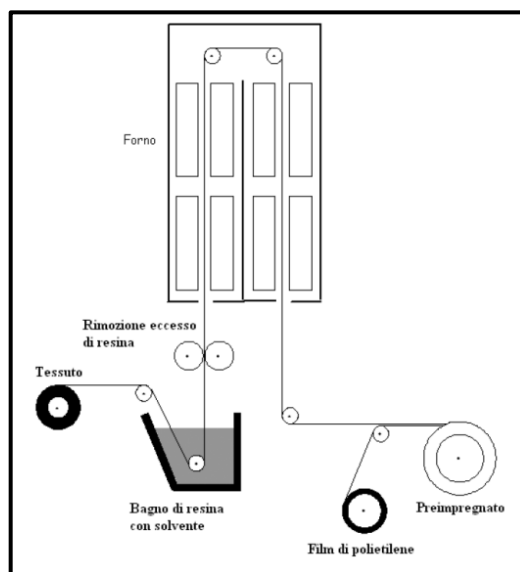


Figura 1.26 ^[9]: rappresentazione schematica di un tipico metodo per l'operazione di impregnazione con solvente.

A causa di problemi dovuti alla volatilità dei solventi e alla loro permanenza nella resina che può interferire in fase di processo sono stati sviluppati dei processi di impregnazione hot-melt che stanno progressivamente sostituendo quelli in soluzione.

Inizialmente impiegati solamente per l'impregnazione di fili continui (*tow* e *roving*) o di nastri UD, attualmente vengono anche impiegati per l'impregnazione di tessuti. Le fibre o i tessuti secchi provenienti da rotoli di raccolta vengono convogliati tra due film continui di resina supportati su carta siliconata o film di polietilene. Le fibre o i tessuti interposti tra i due film protettivi vengono trainate da un sistema di rulli di compattazione riscaldati che impongono pressione e che regolano lo spessore del preimpregnato. La compattazione garantisce l'infiltrazione della resina e la bagnatura delle fibre. Anche in questo caso la reticolazione parziale della resina viene controllata. A valle della compattazione il nastro passa generalmente attraverso rulli di raffreddamento prima della rimozione della carta di supporto e del taglio di regolazione della larghezza. Al termine della linea uno dei due nastri di supporto viene asportato prima dell'avvolgimento di raccolta; in alcuni casi, entrambi i nastri di carta vengono asportati e sostituiti con un film di polietilene. La maggiore difficoltà di infiltrazione rispetto al metodo in soluzione è stata superata adeguando le formulazioni e

impiegando lunghe linee di compattazione. Laminati ottenuti da preimpregnati hot-melt presentano minore contenuto di sostanze volatili e vuoti intrappolati.

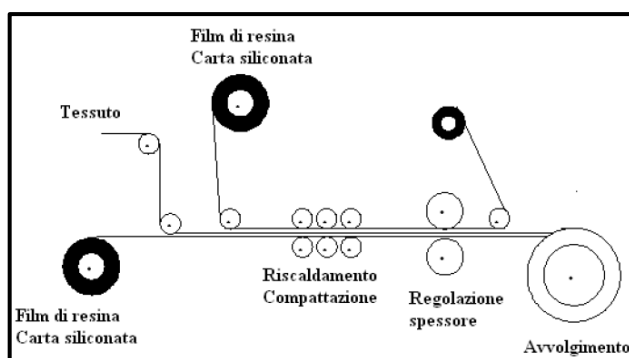


Figura 1.27 ^[9]: *rappresentazione schematica di una linea di impregnazione hot melt.*

La maggior parte dei preimpregnati con resine termoindurenti deve essere conservata in cella refrigerata sia durante l'immagazzinamento che il trasporto per evitare il procedere della reticolazione e la conseguente riduzione della lavorabilità nella produzione dei laminati. La temperatura di conservazione richiesta è spesso inferiore a $-15/-20$ °C. La vita del materiale fuori freezer è quindi limitata e il preimpregnato viene riscaldato alla temperatura di laminazione (in genere temperatura ambiente) poco prima dell'impiego; il materiale non utilizzato deve essere riposto in freezer entro tempi ridotti. Per applicazioni avanzate, se il tempo di conservazione (sia a freddo che fuori frigo) supera limiti prestabiliti o non è controllato, il materiale deve essere ricertificato o rigettato, con aggravio dei costi.

1.2.2 Sistemi e tipologie di matrici

Nei materiali compositi, le fibre, che come già accennato hanno il compito principale di sopportare le sollecitazioni meccaniche, sono inglobate in una matrice continua che le lega insieme e che permette di ottenere un materiale formabile e utilizzabile per la realizzazione di componenti finiti. Le matrici possono essere di diversa natura, metallica, ceramica, polimerica e conferiscono al materiale finale caratteristiche meccaniche, fisiche, chimiche fortemente differenziate.

Nel composito, la matrice deve rispondere a diverse funzioni: lega insieme le fibre, trasferisce e distribuisce il carico sulle fibre, protegge le fibre dall'ambiente. Il materiale ideale da cui deriva la matrice deve essere inizialmente un liquido a bassa viscosità che può essere convertito in breve tempo in un solido resistente e tenace aderente alle fibre di rinforzo. Le proprietà meccaniche della matrice possono influire in modo determinante sulle modalità e sull'efficienza con cui le fibre possono operare. Essa permette una distribuzione più omogenea della sollecitazione su tutte le fibre che risulteranno soggette ad una stessa deformazione. Il trasferimento degli sforzi tra fibre e matrice avviene prevalentemente tramite sforzi di taglio: perché questo sia possibile è necessaria una buona adesione ed una matrice con buona resistenza e modulo elastico.

In direzione normale alle fibre, le proprietà della matrice e dell'interfaccia controllano le proprietà fisiche e meccaniche del composito e, poiché la matrice è generalmente il costituente più debole e cedevole, le sollecitazioni in direzione trasversale alle fibre vengono per quanto possibile evitate con una opportuna distribuzione ed orientazione del sistema di rinforzo. Ciò nonostante in molte situazioni la matrice deve essere comunque in grado di rispondere ad importanti componenti di sforzo normali alla direzione delle fibre e/o taglio e può risultare l'elemento critico per il comportamento meccanico del materiale nel suo complesso.

Le fibre di rinforzo impiegate sono generalmente fragili e danno un contributo limitato all'assorbimento di energia in occasione di danni da impatto, soprattutto quando questi comportano delaminazioni e separazioni tra le fibre. Le matrici polimeriche, in particolari quelle termoplastiche, presentano spesso buona tenacità e possono quindi contribuire in modo non trascurabile alla tenacità complessiva del composito.

Oltre alle caratteristiche meccaniche, la possibilità di utilizzo di una matrice polimerica è legata alla sua processabilità definita in termini di possibilità di ottenere i componenti con forme, dimensioni e caratteristiche volute in tempi accettabili. La matrice, allo stato liquido o in soluzione, deve essere in grado di infiltrarsi tra fibre e tessuti minimizzando la formazione di bolle e difetti e deve inoltre consentire una facile formatura del laminato permettendo di riprodurre e seguire la geometria dello stampo. Questo richiede che durante la fase di impregnazione e formatura la resina abbia bassa viscosità e buona capacità di bagnatura delle fibre. Successivamente, deve poter essere solidificata in tempi brevi per conferire al manufatto le caratteristiche meccaniche finali. Le resine termoindurenti vengono solidificate a seguito di un processo di cura durante il quale avviene la reticolazione, attivata per via termica o chimica (mediante catalizzatori). Il tempo necessario al raggiungimento della reazione può variare da pochi secondi a decine di ore in funzione della resina e delle condizioni di processo. Tempi di indurimento troppo brevi possono rendere difficile l'impregnazione e/o la formatura del componente, mentre tempi eccessivi possono rendere economicamente scomodo il processo tecnologico.

Alcuni tra i più importanti processi di formatura di compositi avanzati richiedono l'impiego di semilavorati costituiti da tessuti impregnati con resine liquide o parzialmente reticolate in proporzioni definite, i *preimpregnati* (o *prepreg*). La sovrapposizione, il consolidamento e la completa reticolazione dei prepreg portano alla formazione del laminato composito finale.

La stabilità termica e il comportamento meccanico alle alte temperature della matrice rappresentano spesso fattori limitanti per l'impiego dei compositi a matrice polimerica (PMC). Le resine termoindurenti sono caratterizzate da una struttura polimerica reticolata, in cui le lunghe catene macromolecolari sono legate a formare un reticolo tridimensionale continuo. La particolare natura di un reticolo polimerico non consente la formazione di strutture cristalline così come avviene nei materiali metallici, ma il materiale mantiene una struttura amorfa, vetrosa. A seguito di

riscaldamento, quindi, il materiale non mostra un punto di fusione, che caratterizza i materiali cristallini, ma raggiunge una temperatura (T_g : *temperatura di transizione vetrosa*) in cui avviene il rammollimento e la riduzione drastica della rigidità. Mentre a temperature inferiori a T_g la resina reticolata si presenta come un materiale rigido, resistente, poco deformabile (e spesso fragile), a temperature superiori a T_g il materiale modifica marcatamente il suo comportamento assumendo le proprietà tipiche di una gomma, con rigidità molto ridotta (generalmente di due/tre ordini di grandezza rispetto al materiale vetroso) e alta deformabilità. La temperatura di transizione vetrosa quindi indica una caratteristica fisica fondamentale del materiale in quanto indica il limite di temperatura per il suo impiego. La massima temperatura di esercizio di un composito è limitata alla temperatura di transizione vetrosa della resina. Il superamento della T_g non implica necessariamente il degrado chimico del materiale, che normalmente avviene a temperature sensibilmente superiori a T_g , ma certamente determina l'incapacità del materiale a rispondere alle sue funzioni strutturali. La temperatura di transizione vetrosa della resina dipende sia dalla struttura e composizione chimica che dalle modalità di reticolazione, ed il suo valore può essere sperimentalmente determinato mediante misure di analisi termica (ad esempio DSC -calorimetria differenziale a scansione- o DMA/DMTA – analisi dinamico meccanica).

Matrici polimeriche	T_g (T_m) (°C)	Max temperatura di servizio (°C)
<i>Termoindurenti</i>		
Epossidica DGEBA	180	125
Epossidica TGDDM	240-260	190
Bismaleimmide	230-320	232
Polimmide acetilen-terminata (ACTP)	320	280
Polimmide PMR-15	340	316
<i>Termoplastiche</i>		
Polietere-eterochetone (PEEK)	143 (334)	250
Polifenilensolfuro (PPS)	89 (285)	240
Polisufone	185	160
Polietere-immide (PEI)	217	180
Poliammide-immide (PAI)	280	230
Polimmide K-III	250	225
Polimmide LARC-TPI	265	300

Figura 1.28 ^[9]: T_g e temperatura massima di esercizio di alcune matrici polimeriche.

In generale, quindi, tra le matrici polimeriche si distinguono le matrici termoindurenti e le matrici termoplastiche.

Le resine termoplastiche sono polimeri lineari o ramificati che possono essere fusi fornendo loro un'appropriata quantità di calore; durante la fase di plastificazione non subiscono alcuna variazione a livello chimico. Possono essere trattate e ri-trattate in qualsiasi forma utilizzando tecniche quali stampaggio ad iniezione ed estrusione. Tramite il calore si ottiene la fusione di questi polimeri che,

successivamente, a contatto con le pareti dello stampo, solidificano per raffreddamento. Il processo di fusione/lavorazione del materiale può essere ripetuto senza apportare variazioni significative alle prestazioni della resina. Generalmente i polimeri termoplastici non cristallizzano facilmente, a seguito di un raffreddamento, poiché le catene polimeriche sono molto aggrovigliate. Anche quelli che cristallizzano non formano mai dei materiali perfettamente cristallini, bensì semicristallini caratterizzati da zone cristalline e zone amorfe. Le regioni cristalline di questi materiali sono caratterizzate dalla loro temperatura di fusione ($T_m = \text{melting temperature}$).

Le resine termoindurenti sono materiali molto rigidi costituiti da polimeri reticolati nei quali il moto delle catene polimeriche è fortemente limitato dall'elevato numero di reticolazioni esistenti. Durante la fase di trasformazione subiscono una modificazione chimica irreversibile. Le resine di questo tipo, sotto l'azione del calore nella fase iniziale, fondono (diventano plastiche) e, successivamente, sempre per effetto del calore, solidificano. Le resine termoindurenti sono intrattabili una volta formate e degradano invece di fondere a seguito dell'applicazione di calore. Contrariamente alle resine termoplastiche, quindi, non presentano la possibilità di subire numerosi processi di formatura durante il loro utilizzo.

Le resine termoindurenti

Resine epossidiche

Le resine epoxy rappresentano la classe di matrici termoindurenti di maggiore interesse e utilizzo per applicazioni automotive/aerospaziali. La combinazione di caratteristiche meccaniche, temperatura di transizione vetrosa, inerzia chimica, capacità di impregnazione delle fibre e di formazione di laminati ha reso i compositi epossidica/carbonio i principali concorrenti rispetto alle leghe di alluminio per la costruzione di componenti automotive/aeronautici.

Il materiale di partenza per una matrice epossidica è costituito da una resina liquida a peso molecolare relativamente basso le cui catene polimeriche sono dotate di gruppi reattivi epossidici posizionati agli estremi delle catene (terminali). Uno dei più comuni materiali di base per le epossidiche è il diglicidil etere del bisfenolo A (DGEBA), dotato di due gruppi epossidici terminali; la struttura molecolare di una generica molecola con due gruppi epossidici terminali, caratterizzati da due atomi di carbonio e un atomo di ossigeno legati ad anello e del DGEBA è mostrata in *Figura 1.29*. La reticolazione e l'indurimento della resina avvengono a seguito di aggiunta di un agente reticolante costituito da molecole dotate di tre o più gruppi reattivi (funzionali) in grado reagire con i gruppi epossidici a formare una maglia continua tridimensionale. I reticolanti comunemente impiegati sono costituiti da ammine o anidridi polifunzionali e consentono di raggiungere temperature di transizione vetrosa di 160/180 °C (a cui corrispondono temperature di utilizzo inferiori a 150 °C). Sebbene la maggior parte dei sistemi di resina non presenti particolari problemi di pericolosità per il loro utilizzo, va segnalato che diversi componenti, in particolare reticolanti,

possono rappresentare un pericolo per la salute degli operatori a seguito di possibili reazioni allergiche al contatto o tossicità.

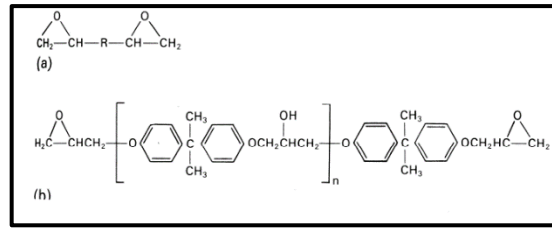


Figura 1.29 ^[9]: (a) struttura molecolare di una generica molecola con due gruppi epossidici terminali; (b) DGEBA.

La reazione di reticolazione viene generalmente attivata a seguito di riscaldamento o, a bassa temperatura, in presenza di opportuni catalizzatori e il suo completamento richiede tempi relativamente lunghi, dell'ordine di alcune ore. La resina liquida può contenere altri additivi come solventi, per ridurre la viscosità, flessibilizzanti o tenacizzanti per migliorare la deformabilità e la tenacità della matrice indurita;

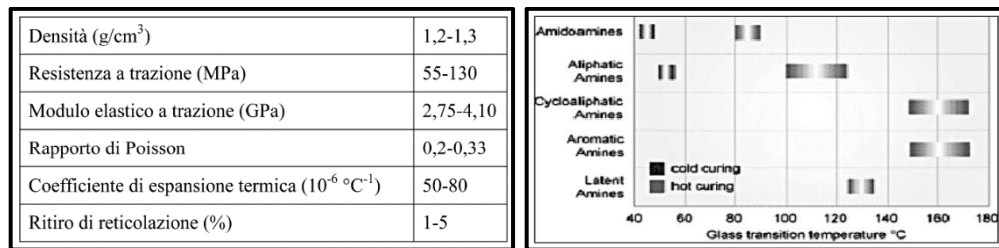


Figura 1.30 ^[9]: caratteristiche meccaniche e termiche di resine epoxy DGEBA (sx); valori di T_g ottenuti con resine DGEBA e diversi agenti reticolanti (dx).

Matrici epossidiche con prestazioni superiori sia in termini di resistenza meccanica che di T_g , normalmente utilizzate per la produzione di laminati di interesse aerospaziale, sono ottenute a partire da polimeri epossidici polifunzionali, spesso tetrafunzionali, cioè dotati di quattro anelli epossidici terminali. Le resine tetrafunzionali più comuni sono costituite da TGDDM (tetra glicidil diammino difenil metano) con reticolante DDS (diammino difenil sulfone).

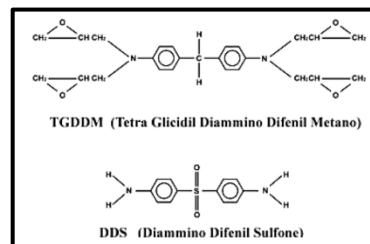


Figura 1.31 ^[9]: struttura molecolare delle resine tetrafunzionali TGDDM e DDS.

La scelta del sistema di resina più reticolante ed additivi influisce sulle caratteristiche meccaniche, termiche (in particolare la T_g) e fisiche in generale della matrice ottenuta. La progressiva reazione tra i gruppi epossidici e i gruppi reattivi del reticolante porta alla formazione di un reticolo polimerico tridimensionale in cui la densità di reticolazione e le dimensioni delle maglie influiscono marcatamente sulla mobilità e sulla deformabilità della struttura: quanto maggiore è la densità dei punti di reticolazione, tanto maggiori sono la T_g , la rigidità meccanica, la resistenza chimica.

Anche se l'assorbimento di umidità nelle epossidiche è molto limitato, l'esposizione ad ambiente umido può comportare delle criticità. La diffusione di umidità all'interfaccia matrice/fibra, in particolare per quelle di vetro, determina la degradazione del legame e dell'efficienza nel trasferimento degli sforzi. Inoltre l'assorbimento di umidità ha un effetto plasticizzante e comporta una riduzione della T_g della matrice, a saturazione, fino a 20/40°C.

Proprietà	epoxy 1 TGDDM	Epon HPT 1072 (Shell Chem.)	Taetix 742 (Dow Chem.)
T_g (°C)	262	261	>310
Resistenza a flessione a 25 °C (MPa)	140,7	111,7	124,1
Resistenza a flessione a 93 °C, dopo immersione in acqua, 2 settimane/93 °C (% rispetto a 25 °C)	55	65	-
Modulo elastico a flessione (GPa)	3,85	3,38	2,97
Modulo elastico a flessione a 93 °C, dopo immersione in acqua, 2 settimane/93 °C (% rispetto a 25 °C)	64,5	87,3	-
Deformazione a rottura, flessione (%)	4,7	3,8	-
Energia di frattura, G_{IC} (kJ/m ²)	0,09	0,068	0,09
Assorbimento di umidità (%)	5,8	2,6	3,6

Figura 1.32 ^[9]: *caratteristiche di resine epoxy polifunzionali per applicazioni avanzate reticolate.*

L'alta capacità di adesione nei confronti di diversi materiali (metallici, ceramici, molti polimeri), unita alla bassa viscosità delle resine non reticolate e alla capacità di impregnazione di fibre e tessuti rende le epossidiche ottimali per ottenere laminati compositi di alta qualità. Inoltre, rispetto ad altri sistemi di resina, esse hanno il vantaggio di non contenere sostanze volatili ed avere una ridotta percentuale di ritiro durante reticolazione, a cui consegue un'ottima stabilità dimensionale anche in fase di processo.

Reticolazione delle resine epossidiche

Il processo di indurimento delle resine termoindurenti avviene a partire dalla formazione di un reticolo molecolare generato da legami tra le molecole di un prepolimero (polimero inizialmente a peso molecolare limitato). In un tipico processo di indurimento, la miscela resina più indurente viene scaldata e mantenuta alla temperatura di cura fino a reticolazione avvenuta. Durante il processo i gruppi reattivi del reticolante e della resina si legano determinando la formazione del reticolo e del progressivo aumento del peso molecolare del materiale. La T_g , inizialmente bassa, aumenta al crescere del peso molecolare e della densità di reticolazione. Allo stesso tempo, la

viscosità della resina, inizialmente liquida, aumenta fino a che essa non si trasforma in un solido rigido, vetroso.

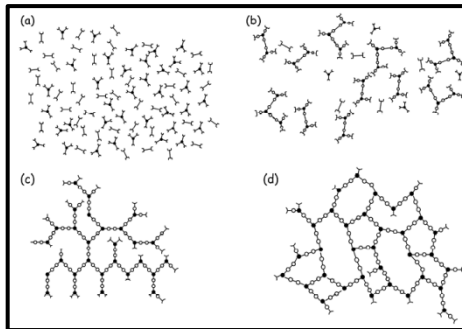


Figura 1.33 ^[9]: rappresentazione schematica bidimensionale della cura di una resina termoindurente.

Nel procedere della reazione si possono distinguere due trasformazioni principali, la gelificazione e la vetrificazione.

Nella prima parte del processo la reazione determina l'aumento del peso molecolare, della viscosità, della T_g del polimero, che rimane tuttavia costituito da molecole distinte. Successivamente tutte le molecole si legano a formare un incipiente reticolo; ciò avviene in corrispondenza di un grado di avanzamento della reazione relativamente basso: il materiale gelifica. In questa condizione il sistema risulta costituito da un'unica molecola (di peso molecolare pari al peso del sistema resina). Il momento della gelificazione costituisce un limite all'ulteriore lavorabilità del materiale; ciò implica che i flussi nello stampo, bagnatura fibre, infiltrazione di tessuti devono avvenire prima della gelificazione.

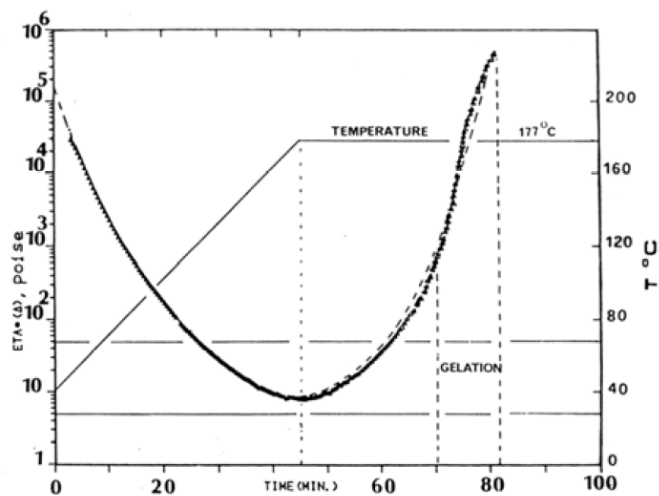


Figura 1.34 ^[9]: andamento della viscosità di una resina epossidica durante il processo di cura.

Nel momento della gelificazione la reazione non è ancora completa e sono presenti numerosi gruppi funzionali che, con l'avanzare del tempo, continuano la reazione aumentando la densità di reticolazione e, di conseguenza, la T_g del materiale. Quando la T_g del sistema reagente raggiunge e supera la temperatura a cui sta avvenendo la reazione (ad esempio 177°C per il sistema in *Figura 1.34*) il materiale vetrifica: il sistema indurisce assumendo le caratteristiche di resistenza e rigidità della resina indurita. La vetrificazione coincide con il momento in cui il materiale ha terminato, o quasi, la reticolazione e può essere estratto dallo stampo.

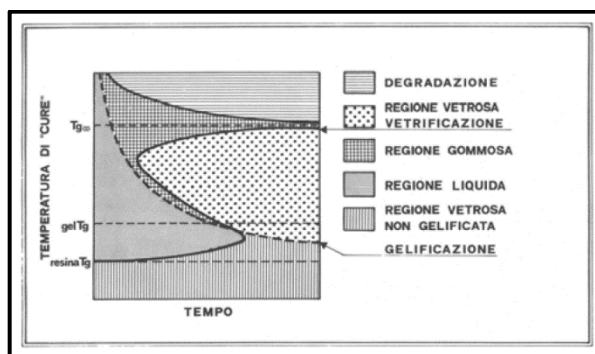


Figura 1.35 ^[9]: diagramma TTT per una generica resina, ad esempio epoxy.

In *Figura 1.35* si può seguire, nel diagramma TTT, la trasformazione della resina per diversi livelli di temperatura. Al di sotto della T_g resina, la resina a basso peso molecolare non reticolata si trova allo stato vetroso: a causa della bassa temperatura e della scarsa mobilità delle molecole, la velocità di reazione è praticamente nulla e non avvengono trasformazioni. Riscaldando e mantenendo la resina poco al di sopra della sua T_g (T_g resina), il materiale si trova allo stato liquido e, data la mobilità molecolare, la reazione può procedere anche se lentamente, determinando un aumento progressivo del peso molecolare della T_g . Quando quest'ultima raggiunge la temperatura di mantenimento del sistema, la resina vetrifica e diventa un solido anche se non reticolato. Al di sopra di T_g gel, la resina liquida reagisce nel tempo, aumentando la sua viscosità e la sua T_g , fino a raggiungere lo stato di gelo (linea tratteggiata) in cui assume le caratteristiche di deformabilità ed elasticità tipiche di un elastomero. Oltre il tempo di gelo, grazie all'elevata mobilità molecolare, la reazione continua in modo relativamente rapido aumentando la densità di reticolazione fino a che la T_g del sistema reticolato eguaglia la temperatura di reazione (in corrispondenza della linea continua): il sistema vetrifica diventando un solido rigido e resistente. Dopo la vetrificazione, quindi, il mantenimento alla temperatura consente solo un limitato e lento incremento della temperatura di transizione vetroso: ne consegue che per ottenere una matrice completamente reticolata, con elevata T_g è necessario effettuare la reticolazione ad una temperatura corrispondente. La curva di vetrificazione mostra la presenza di un ginocchio che corrisponde a un tempo minimo di vetrificazione: i comuni processi di cura avvengono in prossimità di questo ginocchio al fine di minimizzare i tempi di processo (è osservabile anche che il ginocchio si trova generalmente poco al

di sotto del valore limite di T_g ($T_{g\infty}$) del sistema ideale completamente reticolato. In pratica, quindi, la reticolazione ad una temperatura corrispondente al ginocchio consente di portare a reticolazione quasi completa il sistema nei tempi più ridotti ottenendo nello stesso tempo una T_g di poco inferiore al massimo. Infine va considerato che ad un'elevata densità di reticolazione corrisponde un'elevata temperatura di transizione vetrosa, ottima resistenza e rigidità, e, se necessario un ulteriore incremento della reticolazione, il materiale può essere sottoposto ad un successivo ciclo di riscaldamento e mantenimento a temperatura superiore (post-cura).

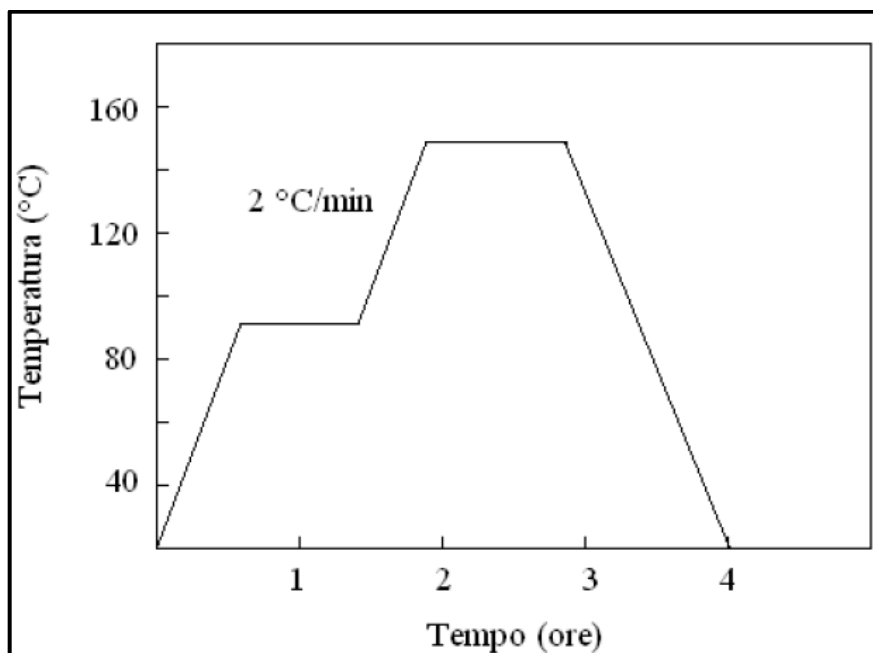


Figura 1.36 ^[9]: diagramma di un ciclo di cura birampa per un laminato in matrice epossidica.

Le resine poliesteri e vinilesteri

Le resine poliesteri insature rappresentano le matrici per compositi di più largo impiego quando sono richieste prestazioni non particolarmente elevate e costi contenuti. Vengono utilizzate principalmente con fibre di vetro e per laminati impiegati a temperature relativamente basse. Compositi poliestere/vetro sono impiegati per la realizzazione di piccole imbarcazioni, componenti di veicoli (carenature, spoiler, elementi di carrozzeria), articoli sportivi, ecc.

Il materiale di partenza delle poliesteri termoindurenti è costituito da un polimero insaturo contenente doppi legami reattivi $C=C$ (insaturazioni) in catena. Il reticolante è generalmente stirene che, data l'elevata volatilità, emette un caratteristico odore e può risultare dannoso per la salute degli operatori a seguito di continua esposizione. La reazione viene avviata con opportuni catalizzatori (ad esempio perossidi organici): il vantaggio delle poliesteri risiede nel fatto che la reazione può

avvenire a temperatura ambiente con tempi di vetrificazione che possono essere controllati in funzione del contenuto di attivatori e permette di ottenere T_g anche superiori a 80-100°C.

	Ortoftalica	Isoftalica	Vinilestere
Durezza Barcol	-	40	35
Resistenza a trazione (MPa)	55	75	80
Modulo a trazione (GPa)	3,45	3,38	3,59
Deformazione a rottura (%)	2,1	3,3	4,0
Resistenza a flessione (MPa)	80	130	140
Modulo a flessione (GPa)	3,45	3,59	3,72
Resistenza a compressione (MPa)		120	
Temperatura di inflessione sotto carico - HDT (°C)	80	90	100

Figura 1.37 ^[9]: *caratteristiche meccaniche di resine poliesteri e vinilestere.*

Le poliesteri hanno diversi svantaggi rispetto alle epossidiche. Oltre alle inferiori caratteristiche meccaniche, la ridotta resistenza agli agenti aggressivi alcalini, il superiore assorbimento di umidità, l'elevato ritiro rendono queste matrici di limitato interesse per applicazioni automotive.

Le resine vinilesteri consentono di integrare alcuni dei vantaggi delle resine epossidiche, come l'ottima resistenza meccanica e chimica, con quelli delle resine poliesteri, come la bassa viscosità e la facile reticolazione. Le vinilesteri presentano alta tenacità e deformabilità, unite ad una temperatura di transizione vetrosa confrontabile con quella delle comuni matrici epoxy. Rispetto a quest'ultime, tuttavia, il ritiro volumetrico delle vinilesteri è piuttosto elevato (dell'ordine del 5-10%). L'impiego di formulazioni miste epossi-vinilestere ha consentito di estendere notevolmente la gamma di materiali e caratteristiche disponibili.

Le resine polimmidiche e cianatoestere

Le resine bismaleimmidi (BMI) fanno parte della classe delle polimmidi termoindurenti, materiali polimerici estremamente resistenti alle alte temperature. Matrici BMI reticolate presentano elevata rigidità delle catene polimeriche e alta densità di reticolazione: questo conferisce ottima resistenza meccanica, stabilità termica e temperature di transizione vetrosa superiori a 300°C. Per contro le resine BMI sono molto fragili e i compositi realizzati con esse sono facilmente soggetti a microcracking, a volte anche in fase di produzione. La combinazione con agenti tenacizzanti a base di polimmidi termoplastiche o con modificanti consente di ridurre tali effetti mantenendo elevate caratteristiche di stabilità termica.

Resina Bismaleimmidica	
Densità (g/cm ³)	1,27
Temperatura di transizione vetrosa (°C)	316
Assorbimento di umidità (%)	4,3
Energia di frattura, G _{IC} (KJ/m ²)	0,067
Coefficiente di espansione termica lineare (°C ⁻¹)	4,9 x 10 ⁻⁵
Resistenza a trazione (MPa)	72
Modulo a trazione (GPa)	4,0
Deformazione a trazione (%)	2,2

Figura 1.38 ^[9]: caratteristiche di una resina BMI.

Anche se la bassa viscosità di queste resine non reticolate facilita la processabilità (resine BMI vengono impiegate anche in processi RTM), l'indurimento di questi materiali necessita di lunghi cicli di reticolazione e a temperature elevate. La completa reticolazione richiede in genere cicli di cura di parecchie ore (8-16 ore) a temperature di 190-200°C seguita da post-cura (ulteriori 8-16 ore) a temperature superiori di 230-250°C: questo limita un più esteso impiego delle BMI che trovano principalmente impiego in componenti sottoposti a stress termici su velivoli civili e militari. Caratteristiche di stabilità termica ancora superiori sono stati raggiunti con altri sistemi polimmidici termoindurenti o termoplastici. Tuttavia, soprattutto a causa dei livelli di tossicità, della durata dei cicli di reticolazione e al costo, non tutti questi sistemi hanno raggiunto livelli commerciali.

Materiale	T _g (°C)	T cure/postcure (°C)	Max temp. impiego (°C)
Avimid-RB	348	360/-	250
PMR-15	395	316/370	316
LARC RP-46	395	316/370	300
AFR 700B	455	390/416	316
Superimide 800	385	316/400	316
PMR II 30	390	316/370	316
VCAP II 50	362	316/343	275
BTDA/DMBz/NE	420	316/316	275
3FDA/p-PDA/NE	385	370/370	316

Figura 1.39 ^[9]: temperature caratteristiche di alcune matrici polimmidiche termoindurenti.

	Dicianato bisfenolo A	Ortometil dicianato	Arocy L.10	XC366,X U378	Fenoltriazina	XU7178 0.2L	XU7178 0.7L CSR
Resistenza a trazione (MPa)	88	73	87	76	48	70	-
Modulo a trazione (GPa)	3,17	2,97	2,90	3,16	3,11	3,2	-
Allungamento a rottura (%)	3,2	2,5	3,8	3,5	1,9	2,7	-
Resistenza a flessione (MPa)	174	161	162	119	79	124	102
Modulo a flessione (GPa)	3,11	2,9	2,9	3,31	3,59	3,31	2,36
Deformazione a rottura, flessione (%)	7,7	6,6	8,0	3,7	2,1	4,0	7,5
Energia di frattura - G_{IC} (J/m ²)	140	175	190	210	60	70	490
T _g (°C)	289	252	258	182	320	265	254
Coeff. dilatazione termica (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	64	71	64	70	62	66	66
Temp. degradazione (°C)	411	403	408	390	412	405	-
Assorbimento umidità, saturazione a 100 °C (%)	2,5	1,3	2,4	0,6	3,8	1,2	-
Resistenza a idrolisi in vapore 1 bar, 120 °C (ore)	200	>600	-	-	-	>600	-

Figura 1.40 [9]: proprietà di alcune matrici termoindurenti cianatoestere commerciali.

Le resine fenoliche

Le resine fenoliche vengono ampiamente utilizzate come adesivi, rivestimenti, masse da stampaggio, matrici per compositi. La reticolazione di queste resine conduce generalmente a sistemi densamente reticolati, con buona stabilità dimensionale, resistenza e rigidità, ma con alta fragilità. Il prepolimero, solitamente rigido, viene impiegato in soluzione per la produzione di laminati e la resina risultante presenta diverse difficoltà di processo legate alla facile formazione di vuoti o porosità e all'alta pressione richiesta in fase di indurimento. Matrici fenoliche presentano T_g solitamente inferiori ai 200°C anche se alcune formulazioni possono raggiungere temperature di servizio superiori a 250°C. Uno dei maggiori vantaggi delle resine fenoliche è la resistenza all'ossidazione e alla degradazione termica che avviene con una lenta reazione endotermica e con formazione di residui incombusti (*char*); compositi fenolica/vetro e fenolica/grafite vengono impiegati nei sistemi di protezione termica e sistemi ablativi (ad esempio in prossimità degli ugelli di lanciatori e propulsori). Questa caratteristica, unita alla bassa tossicità dei fumi (prevalentemente costituiti da H₂O e CO₂) a seguito di degradazione termica, ha rinnovato l'interesse in queste matrici in diverse applicazioni aeronautiche e industriali.

Densità (g/cm ³)	1,25 - 1,35
Resistenza a trazione (MPa)	48 - 62
Resistenza a flessione (MPa)	75 - 110
Modulo elastico a flessione (GPa)	7,5 - 9,0
Allungamento a rottura (%)	1,5 - 2
Coefficiente di espansione termica (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	28 - 40
Temperatura di inflessione – HDT (°C)	74 - 80
Assorbimento di umidità, 24 ore (%)	0,1 - 0,7

Figura 1.41 [9]: caratteristiche meccaniche e fisiche di resine fenoliche

Le resine termoplastiche (ad alte prestazioni)

Questi polimeri si distinguono dai tradizionali termoplastici per le prestazioni eccezionali in una o più proprietà caratteristiche, in genere mantenute fino a temperature elevate. La loro scelta in alcune applicazioni specifiche è spesso obbligata, anche se associata a costi rilevanti.

Tutti i polimeri di questa categoria sono formati da molecole dotate di anelli benzenici (aromatici) in catena legati con diversi gruppi funzionali o atomi. La loro natura fortemente aromatica conferisce alta resistenza meccanica e tenacità, stabilità termica e chimica, bassa infiammabilità. Molti di questi polimeri termoplastici vengono caricati con fibre corte o impiegati come matrici in compositi a fibra lunga, solitamente a base di fibre di vetro o carbonio; in questa forma sono competitivi con i compositi a matrice termoindurente in applicazioni avanzate quali quelle aerospaziali, elettroniche, sportive, biomediche. I polimeri per alte prestazioni vengono distinti in base al tipo di molecola che costituisce la catena polimerica principale.

Nei polifenileni la catena molecolare è costituita da anelli benzenici uniti da un atomo di ossigeno come nel polifenil etero (PPE), più comunemente denominato polifenilossido (PPO), o di zolfo come nel polifenilensolfuro (PPS). Sono dotati di ottima stabilità termica e resistenza alla fiamma.

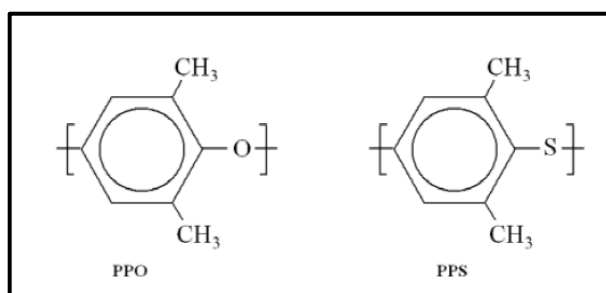


Figura 1.42 ^[9]: *struttura molecolare di PPO e PPS.*

PPS è un materiale termoplastico, semicristallino, con temperatura di fusione di 285°C con ottima stabilità termica, chimica e dimensionale; queste caratteristiche possono essere ulteriormente migliorate a seguito di trattamento termico e reticolazione successiva lo stampaggio. E' resistente praticamente a tutti i solventi, fluidi idraulici e combustibili di interesse automobilistico ed aeronautico fino a 200°C. Viene impiegato per la produzione di componenti meccanici e idraulici quali valvole, pompe, rivestimenti protettivi in campo motoristico, ecc. Inoltre viene utilizzato come matrice in compositi rinforzati con fibre di vetro o carbonio.

PPO ha un bassissimo assorbimento di umidità e ottima resistenza ai solventi. Miscele di PPO e polistirene rappresentano un raro caso di polimeri con perfetta miscibilità e trovano applicazioni in componenti automobilistici di elevata tenacità e stabilità termica/dimensionale.

PEEK

I poliarilchetoni, tra i quali il polietere-etero-chetone (PEEK) è il principale costituente, sono costituiti da sequenze di anelli benzenici uniti da atomi di ossigeno (gruppi eteri) e gruppi chetonici (=CO) (Figura 1.43).

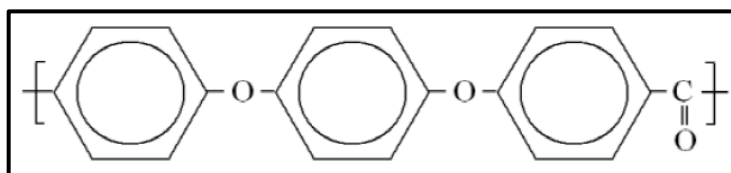


Figura 1.43 ^[9]: struttura molecolare di PEEK.

PEEK è un polimero semicristallino, con T_g di 143°C e temperatura di fusione superiore a 340°C (e superiore nelle zone ad alto grado di cristallinità). E' estremamente stabile chimicamente, insolubile in quasi tutti i solventi, resistente agli acidi e al fuoco. Grazie alla cristallinità relativamente elevata (> 30%) mantiene ottime doti di resistenza e rigidità anche a temperature ben superiori la T_g. Può essere formato con le comuni tecnologie per i termoplastici, ma l'elevata temperatura di fusione richiede attrezzature di lavorazione in grado di operare a temperature non comuni. Il PEEK viene utilizzato come matrice termoplastica di compositi per alte prestazioni di interesse aerospaziale ed elicotteristico in alternativa a compositi a matrice termoindurente. L'interesse del settore aerospaziale per questo materiale sin dalla sua iniziale disponibilità sul mercato ha contribuito alla sua diffusione anche per applicazioni avanzate diverse. Viene impiegato per la produzione di componenti motoristici, pompe, tubazioni, rivestimenti destinati ad operare in condizioni estreme per temperatura e/o presenza di agenti aggressivi.

Polimero	T _g (°C)	T _m (°C)	Applicazioni principali
PA 66	57	265	Ingranaggi, fili, film, cuscinetti, boccole, isolanti
POM	-	160/175	Ingranaggi, boccole, guide, supporti e componenti meccanici
PET	65	265	Contenitori alimentari, film, tessuti, rinforzi per pneumatici, boccole e guide, cuscinetti e ingranaggi, componenti meccanici ed elettrici
PC	150	-	Trasparenti, caschi, protezioni antiurto, schermi e diffusori ottici, CD, coperture edili
PMMA	105	-	Trasparenti, lenti, coperture edili

PTFE	-	320	Rivestimenti antiaderenti e antiattrito, cuscinetti e boccole, tubazioni, guarnizioni, isolanti elettrici/termici
PPS	85	285	Componenti meccanici ed elettrici, pompe e valvole, compositi, rivestimenti
PEEK	143	343	Compositi, componenti meccanici, elettronici, biomedici, rivestimenti
PES	220	-	Componenti meccanici ed elettrici, tubazioni, compositi, rivestimenti
PEI	220	-	Film, rivestimenti, compositi, componenti meccanici
PBI	413	-	Fibre, film, rivestimenti, componenti meccanici
LCP	-	280/320	Fibre, film, compositi, componenti meccanici, biomedici, elettronici

Figura 1.44 ^[9]: caratteristiche termiche e applicazioni di alcuni polimeri termoplastici di interesse ingegneristico.

1.3 La fatica

Molto spesso gli organi meccanici sono sottoposti a sollecitazioni che variano nel tempo in modo ciclico, cioè a sequenze di carico in cui sono distinguibili una successione di valori massimi (picchi) e minimi (valli) alternati.

Per descrivere l'insieme delle sollecitazioni che si ripetono nel tempo si usa il termine "fatica", dal verbo *fatigare*, ossia stancare. Storicamente, il primo ricercatore ad affrontare in modo sistematico il tema della fatica fu un ingegnere tedesco, il Wohler. Egli notò, essendo nel campo delle ferrovie dello stato, come alcune componenti dei treni manifestassero delle rotture nel tempo con sollecitazioni in esercizio molto inferiori rispetto a quelle statiche a cui erano stati sottoposti in laboratorio. Il fenomeno della fatica risulta estremamente importante nel mondo dei materiali in quanto il loro cedimento può manifestarsi anche per sollecitazioni inferiori ai valori di snervamento, se ripetute nel tempo.

Similmente a quanto avviene nei materiali metallici, l'applicazione di carichi variabili ciclicamente ad un composito può dare luogo a rottura anche quando la massima sollecitazione risulta inferiore alla resistenza statica del materiale. Sollecitazioni a fatica sono presenti in svariate applicazioni dei compositi, dal campo aeronautico a quello automobilistico a quello navale ecc. Questo fenomeno, nonostante i notevoli progressi fatti, è responsabile di circa il 90% di tutte le rotture in esercizio. Le rotture per fatica risultano essere molto insidiose in quanto possono avvenire anche dopo brevi tempi di esercizio senza alcun segno premonitore. Nei compositi, similmente a quanto avviene per i materiali metallici, la rottura per fatica è una rottura progressiva che si manifesta con formazione e propagazione di difetti. Il fenomeno è bensì molto più complesso in quanto, a differenza dei metalli, può coinvolgere uno o più dei seguenti processi di danneggiamento:

- Scollamento fibra/matrice (*debonding*);
- Fessurazione della matrice;
- Rottura della fibra;
- Scollamento delle lamine (delaminazione).

Al contrario di quanto avviene per i materiali isotropi in cui la formazione di un difetto è solitamente seguita da una crescita relativamente veloce e con legge esponenziale, in un composito il danneggiamento per fatica può iniziare molto prima del cedimento e la formazione di cricche può in alcuni casi non comportare la rottura dell'elemento: ad esempio la cricca originatasi nella matrice di una lamina può arrestarsi incontrando una fibra oppure incontrando l'interfaccia con un'altra lamina diversamente orientata.

Di solito, al fine di evitare qualsiasi forma di danneggiamento, nella progettazione a fatica si fa in modo che il carico applicato sia sempre inferiore al minimo carico che comporta danneggiamento del materiale (approccio conservativo, vita infinita). Dove invece è tollerato un certo livello di

danneggiamento a fatica bisogna considerare il fatto che questo meccanismo comporta una riduzione della rigidità e della deformazione limite.

In generale, il fenomeno della fatica nei compositi è piuttosto complesso e non ancora perfettamente compreso, soprattutto nei compositi a fibra discontinua, come il materiale considerato in questo progetto di tesi.

1.3.1 Tipi di sollecitazione e rapporto di ciclo R

La condizione necessaria per cui si verifichi rottura a fatica è l'esistenza di una sollecitazione periodica. L'andamento di questa sollecitazione può essere ricondotta a uno dei seguenti casi fondamentali:

- Sollecitazione alterno-simmetrica;
- Sollecitazione alterno-asimmetrica;
- Sollecitazione pulsante dall'origine;
- Sollecitazione pulsante.

In questi casi è ipotizzabile un andamento sinusoidale degli sforzi nel tempo che costituisce una semplice idealizzazione del fenomeno di fatica: di solito possono risultare molto più complessi, soprattutto nel caso di sollecitazioni dovute a vibrazioni.

I casi fondamentali di andamento delle sollecitazioni possono essere ricondotte ad una legge matematica sinusoidale, e per ogni istante t la tensione può essere espressa dalla relazione:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t$$

ossia ogni ciclo può essere rappresentato come sovrapposizione di una tensione alternata pura di semiampiezza σ_a (ampiezza di tensione) e pulsazione ω , e una tensione statica σ_m (tensione media).

Per qualsiasi tipo di ciclo si possono distinguere un valore massimo della tensione σ_{max} ed un valore minimo σ_{min} , espressi rispettivamente da:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \quad ; \quad \sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

Da queste relazioni si ricava che:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad ; \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Il comportamento a fatica non dipende soltanto dall'ampiezza della sollecitazione alternata σ_a , ma anche dalla tensione media σ_m che spesso è diversa da zero. A questo proposito viene introdotto un altro parametro R , definito come il rapporto di tensione tra il valore minimo ed il valore massimo durante i cicli analizzati. Si ha quindi che:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$$

Il rapporto di tensione può variare da +1 quando $\sigma_a=0$ (sollecitazione statica pura) a -1 quando $\sigma_m=0$ (sollecitazione simmetrica pura).

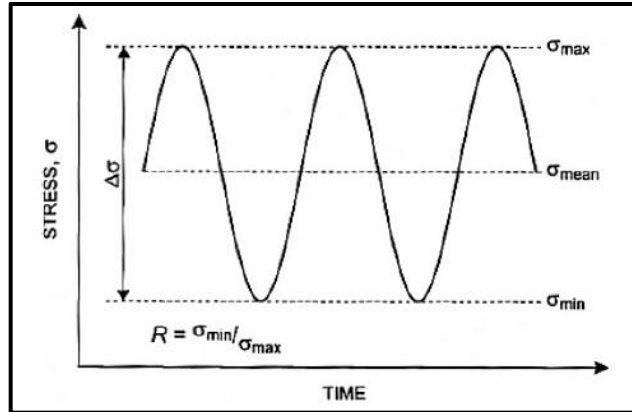


Figura 1.45 [12]: definizione del rapporto di ciclo R in una sollecitazione ciclica ad ampiezza costante.

Tipo Ciclo	Diagramma	Rapporto R	Tensioni	
			$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	σ_a, σ_m
alterno simmetrico		$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1$	$\sigma_{max} > 0$ $\sigma_{min} < 0$ $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$	$\sigma_m = 0$ $\sigma_a = \sigma_{max}/2$
alterno asimmetrico		$-1 < \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} < 0$	$\sigma_{max} > 0$ $\sigma_{min} < 0$	
pulsante		$0 < \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} < 1$	$\sigma_{max} > 0$ $\sigma_{min} > 0$	$\sigma_m \neq 0$ $\sigma_a < \sigma_m$
pulsante dallo zero		$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0$	$\sigma_{max} > 0$ $\sigma_{min} = 0$	$\sigma_m > 0$ $\pm \sigma_a = \sigma_m$
		$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -\infty$	$\sigma_{max} = 0$ $\sigma_{min} < 0$	$\sigma_m < 0$ $\pm \sigma_a = \sigma_m$

Figura 1.46 [12]: casi fondamentali di sollecitazione e relative condizioni.

1.3.2 La curva di Woehler

La curva di Woehler è uno strumento molto utile per la valutazione della vita a fatica che riassume una serie di test sperimentali condotti sui materiali. Generalmente, a livello sperimentale si tratta di testare un numero sufficientemente alto di campioni a diversi livelli di carico applicato, che sempre si riferisce ad una sollecitazione ciclica definita da tensione alternata e media (e quindi da tensione massima e minima), al fine di investigare il numero di cicli a rottura. Tendenzialmente, man mano che la tensione massima diminuisce, il numero di cicli per cui il provino resiste aumenta, fino a che si giunge ad un valore di tensione a partire dal quale non si verifica più rottura. La sollecitazione

$$\sigma_D = \sigma_m + \sigma_a$$

viene assunta come limite di rottura a fatica.

Inserendo in un grafico i valori delle tensioni applicate σ_a ed i relativi N_i , rispettivamente su ordinate ed ascisse, ed interpolando i punti ricavati si genera una curva che prende il nome di curva di Woehler.

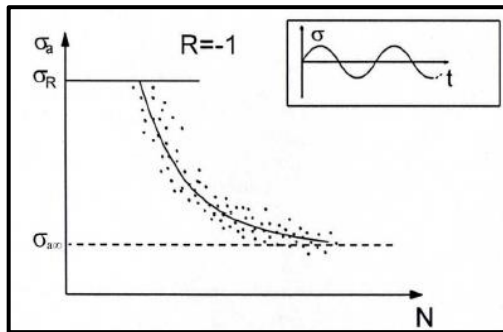


Figura 1.47 [12]: diagramma di Woehler in coordinate non logaritmiche.

L'interpolazione dei punti $\sigma_i - N_i$, non può sempre avvenire in modo agevole in quanto, in alcuni casi, la dispersione di dati non permette di individuare con precisione una singola curva. In queste situazioni se ne disegnano due o più, per cui, per un singolo valore di σ_a si individua un campo di variazione di N compreso tra N_{\max} e N_{\min} in cui può avvenire rottura.

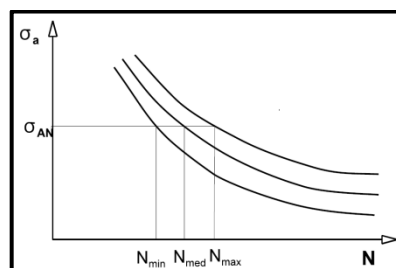


Figura 1.48 [12]: curve a diversa probabilità.

Convenzionalmente il diagramma di Woehler viene ricavato in scala semilogaritmica o doppio logaritmica in cui il limite superiore è determinato dal valore della tensione di rottura σ_r , mentre soltanto per alcuni materiali il limite inferiore è determinato da un asintoto orizzontale in corrispondenza di una certa σ_a denominato limite di vita a fatica infinita (di solito $2 \cdot 10^6$ cicli).

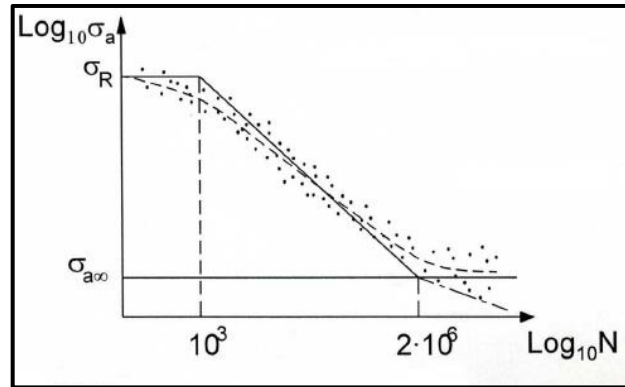


Figura 1.49 [12]: diagramma di Woehler in scala doppio logaritmica.

Osservando la curva di Woehler si nota che, rimanendo sempre al di sotto della tensione di rottura σ_r , il materiale arriva a rottura in un tempo via via inferiore (in termini di cicli) all'aumentare della tensione massima σ_{max} (e quindi anche dell'ampiezza di carico σ_a).

Esiste una formulazione matematica per la curva che interpola i dati sperimentali, che è stata individuata nell'espressione:

$$N \cdot \sigma_a^k = costante$$

Essa corrisponde ad una retta in scala doppio logaritmica di pendenza k : infatti schematizzando la curva e prendendo come riferimento un punto A sulla retta di coordinate note (N_A, σ_A) , si ottiene:

$$N \cdot \sigma_a^k = N_A \cdot \sigma_A^k = costante$$

passando ai logaritmi,

$$\log_{10}(N \cdot \sigma_a^k) = \log_{10}(N_A \cdot \sigma_A^k)$$

$$\log_{10}N + k \log_{10}\sigma_a = cost'$$

$$\log_{10}N_A + k \log_{10}\sigma_A = cost''$$

Imponendo $N=10^3$ cicli e $\sigma=\sigma_r$, si ottiene il valore di k uguagliando le due equazioni precedenti:

$$k = \frac{\log_{10} \frac{N_A}{10^3}}{\log_{10} \frac{\sigma_r}{\sigma_A}}$$

Il valore di k , essendo indicativo della pendenza della retta tra il punto di rottura statica ed il limite di fatica a 2×10^6 cicli, è molto importante per il calcolo della vita residua di un componente meccanico sottoposto a sforzi ciclici. Più è alto il valore di k più la pendenza sarà bassa, quindi il limite di fatica verrà raggiunto ad un numero di cicli più elevato e di conseguenza si allungherà il tempo necessario al materiale per arrivare a rottura.

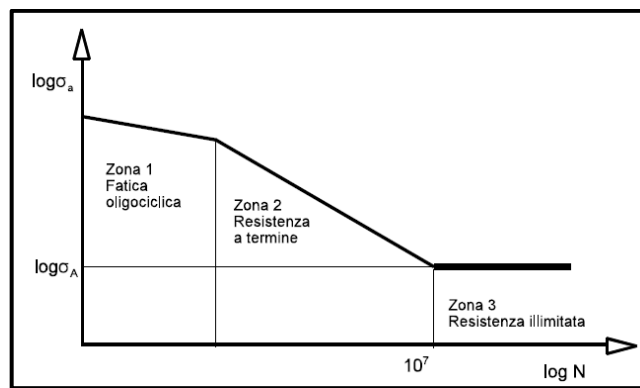


Figura 1.50 [12]: tipica divisione in zone della curva di Woehler.

In Figura 1.50 si può notare come nel diagramma logaritmico siano distinguibili tre zone:

- *Fatica oligociclica*: zona indicativa dei fenomeni di fatica a basso numero di cicli, che si manifestano per tensioni relativamente vicine a quelle di snervamento e che producono nel provino deformazioni plastiche alle quali esso resiste per un numero di cicli relativamente basso;
- *Resistenza a termine*: zona indicativa dei fenomeni di fatica per livelli di tensione che provocano la rottura del provino dopo un numero N di cicli relativamente alto;
- *Resistenza illimitata o vita infinita*: zona indicativa di fenomeni di fatica per livelli di tensione che non producono la rottura del pezzo neppure dopo un numero molto alto di cicli fissato convenzionalmente.

Per questi diagrammi è evidente come lo sforzo necessario per la rottura del componente diminuisca all'aumentare del numero di cicli: tuttavia è importante sottolineare una sostanziale differenza tra il comportamento delle leghe di tipo ferroso e leghe non ferrose. Per le leghe non ferrose l'andamento della curva è sempre decrescente all'aumentare dei cicli, mentre nelle leghe ferrose la curva converge verso un asintoto da un certo valore del numero di cicli in poi (Figura 1.51).

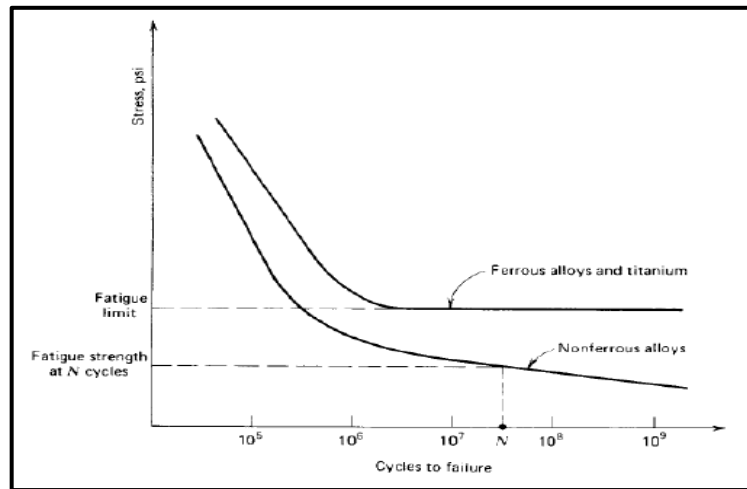


Figura 1.51 ^[12]: differenza tipica tra curve di Woehler per una lega ferrosa ed una lega non ferrosa.

1.3.3 Criteri di progettazione (cenni)

Nel dimensionare un componente meccanico, tenendo conto della fatica, è necessario individuare il numero di cicli a cui esso sarà sottoposto durante la sua vita; successivamente viene operato il calcolo, decidendo se le tensioni ammissibili sul pezzo dovranno essere tali da non portare mai a rottura, o se invece potranno determinarne la rottura dopo un numero N di cicli (in quanto il pezzo o sarà sostituito prima o non sarà mai sottoposto ad un numero di cicli N superiore a quello corrispondente alla rottura). In generale i principali criteri di progettazione sono:

- “*Infinite life*”: basato sull’esistenza del limite di fatica;
- “*Safe life*”: il componente deve restare privo di cricche per un tempo definito;
- “*Damage tolerant*”:
 - “*Fail safe*”: si accetta che un singolo componente ceda, senza che ceda l’intera struttura;
 - “*Slow crack growth*”: si accetta che la cricca esista e cresca durante la vita del componente, ma che non arrivi mai fino alla sua rottura;
- “*Retirement for cause*”: si considerano delle ispezioni periodiche, con riparazione o sostituzione delle componenti criccate, in modo da raggiungere la vita a fatica desiderata.

1.3.4 Parametri che influenzano la resistenza a fatica nei compositi

La resistenza a fatica dipende da diversi fattori legati alla struttura del materiale, al tipo di sollecitazione e alle condizioni ambientali. Note le caratteristiche delle fibre, la resistenza a fatica di un composito dipende da:

- Materiale della matrice;
- Orientamento delle fibre e sequenza di lay-up;
- Percentuale volumetrica di fibre;
- Adesione fibra-matrice;
- Tipo di sollecitazione;
- Tensione media;
- Frequenza di applicazione del carico;
- Condizioni ambientali (umidità, corrosione, ecc.);
- Effetti di intaglio.

Materiali della matrice

La migliore resistenza a fatica, per quanto riguarda le proprietà della matrice, si ottiene con materiali che di per sé hanno elevata resistenza a fatica e, allo stesso tempo, buona adesione con le fibre. Vari studi condotti su compositi in fibre di vetro (E) hanno dimostrato come la miglior resistenza a fatica si ottenga con matrice epossidica (*Figura 1.52*).

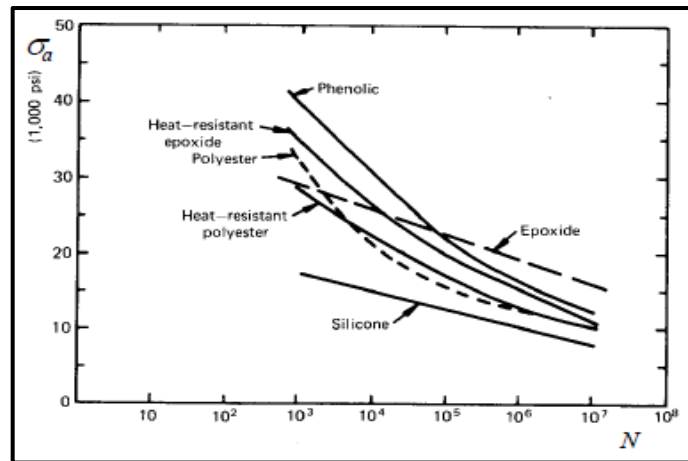


Figura 1.52 ^[13]: influenza del materiale della matrice sulla resistenza a fatica di compositi in fibra di vetro.

L'ottima resistenza a fatica delle matrici epossidiche deriva dalla loro resistenza alla degradazione, dalla loro intrinseca durezza e dal basso ritiro dopo la cura. Il basso tasso di ritiro dopo la cura

implica una minore presenza di tensioni residue, le quali rappresentano punti di innesco della frattura e quindi danno luogo a diminuzione della resistenza a fatica del composito.

Orientamento delle fibre e sequenza di lay-up

L'orientamento delle fibre sulla resistenza a fatica di un composito ha un effetto piuttosto complesso. Anche se la migliore resistenza statica per un composito si ha in direzione delle fibre, nel caso di sollecitazioni cicliche la resistenza massima non si ottiene in compositi con lamine tutte allineate al carico. In queste condizioni si verificano facilmente cedimenti a causa della bassa resistenza trasversale del laminato: si formano facilmente cricche in direzione parallela alle fibre che danneggiano irreversibilmente il materiale. Per evitare danneggiamenti precoci i risultati migliori si ottengono disponendo alcune lamine a 90° (laminati *cross-ply*), oppure alcune lamine con angoli di $\pm 5-10^\circ$ (Figura 1.53).

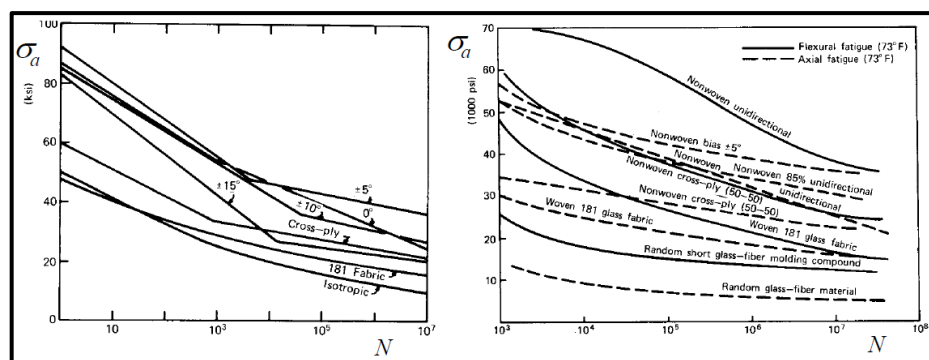


Figura 1.53 [13]: influenza dell'orientamento delle fibre sulla resistenza a fatica.

Dalla Figura 1.53 è possibile notare che non conviene utilizzare fabric che manifestano una resistenza ben inferiore di laminati equivalenti cross-ply: questo deriva dal fatto che nei cross-ply le fibre sono ben dritte e parallele mentre nei fabric presentano una pieghettature che provocano una diminuzione della resistenza.

Anche la sequenza di lay-up influenza significativamente la resistenza a fatica, soprattutto in termini di tensioni interlaminari. Fermo restando numero e orientamento delle lamine, in alcune sequenze di lay-up si possono avere basse tensioni tangenziali interlaminari e/o tensioni normali di compressione mentre per altre sequenze si possono avere elevate tensioni tangenziali e/o tensioni normali di trazione che facilitano fenomeni di delaminazione a partire dai contorni liberi con formazione di cricche che si propagano più o meno velocemente verso l'interno.

Percentuale volumetrica di fibre

A livello sperimentale risulta che, per la quasi totalità dei materiali compositi, la resistenza a fatica aumenta con la percentuale di fibre presenti. A differenza dei materiali metallici come l'acciaio, in

cui la resistenza a fatica decresce con l'aumentare della resistenza statica, per i compositi la resistenza a fatica aumenta con quella statica. La Figura 1.54 a-b mostra, a titolo di esempio, l'andamento della resistenza a fatica assiale (a) ed a flessione rotante (b) con la percentuale di fibre di compositi in fibra di vetro.

In generale, come accennato, la resistenza a fatica nei compositi aumenta all'aumentare della resistenza statica ma da osservazioni sperimentali è stato dimostrato come, in particolare per compositi epoxy/vetro, la resistenza a fatica non aumenti al crescere della percentuale di fibre oltre il 70% circa.

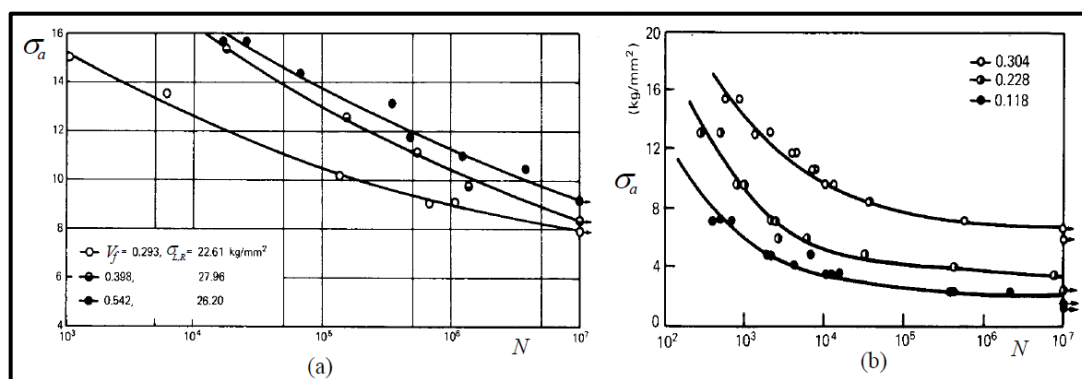


Figura 1.54 [13]: influenza della percentuale di fibre sulla resistenza a fatica assiale (a) e flessione rotante (b).

Adesione fibra-matrice

La resistenza a fatica risulta essere influenzata fortemente dall'efficienza dell'adesione fibra-matrice, soprattutto quando la formazione di cricche dà luogo a fenomeni più o meno diffusi di debonding. Dagli studi condotti su trattamenti superficiali effettuati sulle fibre per ottenere una migliore adesione con la matrice è stato dimostrato come questo parametro sia rilevante in termini di vita a fatica. Bisogna considerare anche le condizioni ambientali in cui avviene la sollecitazione a fatica: ad esempio, da studi effettuati, è stato mostrato come nei compositi rinforzati in fibra di vetro senza trattamento superficiale la resistenza sia superiore in ambiente asciutto rispetto a quelli in cui le fibre sono trattate, i quali, però, esibiscono una riduzione della resistenza inferiore in ambiente umido (in altre parole, il trattamento superficiale risulta rilevante solo in ambiente umido).

Tipo di sollecitazione

La resistenza a fatica risulta essere influenzata dal tipo di sollecitazione agente. In generale per i compositi, a differenza dei materiali metallici, non esistono relazioni che legano le resistenze a sollecitazioni diverse. Ad esempio, la resistenza a trazione ed a taglio risultano essere praticamente indipendenti (per alcuni compositi come epoxy/vetro il rapporto di fatica, inteso come rapporto fra

la resistenza a fatica e la resistenza statica, per sollecitazioni di taglio è superiore a quello per sollecitazioni di trazione. Questo risultato non è generale e, ad esempio si inverte nel caso di compositi rinforzati con fibre di boro o grafite).

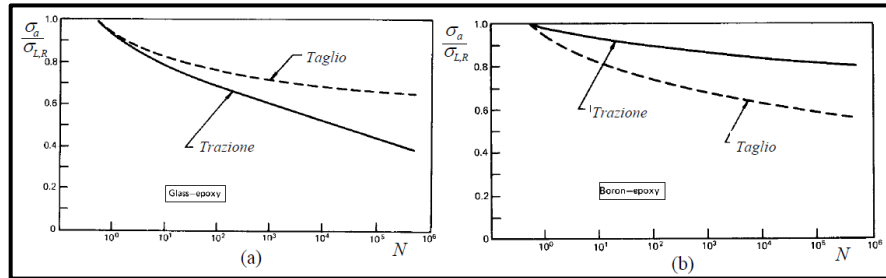


Figura 1.55 [13]: influenza del tipo di sollecitazione in compositi in fibra di vetro (a) e fibra di boro (b).

I risultati ottenuti per un materiale non sono generalizzabili neanche a materiali simili, in quanto essi sono legati alle proprietà del materiale, dell'interfaccia ecc. Contrariamente ai materiali metallici in cui il danno è progressivo secondo una legge esponenziale, nei compositi risulta sempre progressivo ma caratterizzato da diversi momenti e velocità. Ad esempio, su compositi vetro/epoxy per diversi tipi di sollecitazione ciclica il danneggiamento porta a perdite di rigidità fino al 30% anche solo dopo il 5% della prova.

Tensione media

L'influenza della tensione media viene analizzata tramite curve di fatica ricavate a tensione media costante. A temperatura ambiente e in presenza di cicli trazione-trazione ($R > 0$) i risultati sperimentali mostrano la validità di una legge analoga a quella per i materiali metallici:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_l} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1$$

Come per i materiali metallici questa legge risulta valida sia per resistenza a vita infinita che a termine.

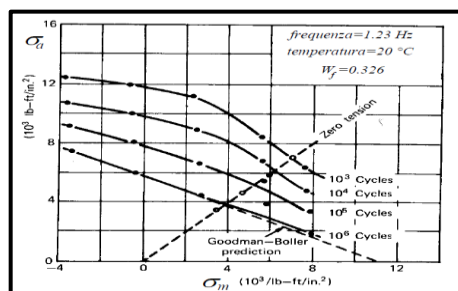


Figura 1.56 [13]: influenza della tensione media sulla resistenza a fatica di compositi.

La validità di questa legge non è però generale. Infatti, contrariamente a quanto avviene nei metalli, nei compositi in fibra di carbonio la presenza di tensione medie negative determina una drastica diminuzione della resistenza a fatica. La presenza di una componente di tensione media di compressione dà origine a progressivo danneggiamento della matrice con conseguenti fenomeni di buckling e splitting delle fibre. In questi casi è meglio disporre di dati sperimentali.

Frequenza di applicazione del carico

A differenza dei materiali metallici, nei compositi un aumento della frequenza di applicazione del carico produce sempre un aumento della temperatura ed una diminuzione della resistenza a fatica. Tuttavia, gli effetti della frequenza di applicazione del carico sono in genere piuttosto modesti in relazione al fatto che nei compositi la resistenza a fatica è strettamente legata alla resistenza delle fibre ed è poco sensibile a limitati innalzamenti di temperatura.

Condizioni ambientali

Tra i vari fattori ambientali che possono influenzare la vita a fatica di un composito ci sono soprattutto temperatura, la cui crescita determina un decadimento della resistenza, ed umidità. L'influenza di fattori ambientali risulta significativa nei compositi rinforzati in fibra di vetro, mentre relativamente bassa per quelli rinforzati in carbonio, Kevlar e fibra di boro. Lo studio degli effetti dell'ambiente sulla vita a fatica dei compositi è comunque ancora ai primi stadi.

Effetti di intaglio

L'effetto di intagli sui materiali compositi sembra essere praticamente opposto a quello sui materiali tradizionali. In generale, nei materiali metallici un intaglio produce limitati effetti sulla resistenza statica ma significative riduzioni della resistenza a fatica, mentre nei materiali compositi (che manifestano generalmente un comportamento fragile) l'effetto si inverte.

1.3.5 Meccanismi di danneggiamento a fatica

In questo paragrafo si cerca di affrontare, in modo generale, i diversi meccanismi di danno che si verificano nei materiali metallici e compositi per evidenziarne le differenze. Sui meccanismi di danno dei compositi c'è da notare che per quelli a fibra continua la conoscenza a disposizione è più ampia anche se non completa rispetto a quelli a fibra discontinua, in cui i meccanismi di danno sono un argomento per cui non ci sono leggi definitive ed in piena fase di studio.

1.3.5.1 Materiali metallici

Per i metalli il meccanismo di danno a fatica è noto dall'inizio del XX secolo ed è stato compreso tramite osservazioni al microscopio. L'innescò della rottura per fatica deriva sempre dalla

formazione di una microfrattura che si può formare fin dai primissimi cicli di vita, se l'ampiezza dell'oscillazione è maggiore del limite di fatica.

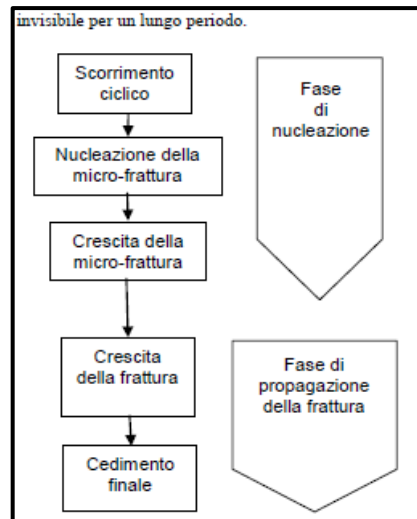


Figura 1.57 ^[9]: fasi e sottofasi nella vita a fatica di un elemento strutturale metallico.

Inizialmente la microfrattura rimane praticamente invisibile per poi evolvere successivamente in una frattura visibile che riduce notevolmente la sezione resistente dell'elemento strutturale o del provino. La vita a fatica può dunque dividersi in due grandi fasi: una prima fase di nucleazione, più lunga, in cui si ha formazione di microfratture, ed una seconda fase di propagazione della frattura, più breve.

Per ciò che riguarda la prima fase di nucleazione della frattura l'elemento dominante nei metalli risulta lo scorrimento ciclico all'interno di bande di scorrimento. Si tratta di fenomeni di micro-plasticità che possono aver luogo in alcuni grani della struttura cristallina del metallo. Questi fenomeni irreversibili avvengono in zone deboli della microstruttura (disomogeneità) o in presenza di elevati valori dello stato di sforzo.

Materiale	$E_{max}[111]$ (MPa)	$E_{max}[000]$ (MPa)	Rapporto (max/min)
α -Fe	284500	132400	2.15
Al	75500	62800	1.2
Cu	190300	66700	2.85

Figura 1.58 ^[9]: variazione del modulo elastico secondo diversi piani cristallografici per alcuni metalli.

La Figura 1.58 mostra come in uno stesso materiale, a livello microstrutturale, si possano avere notevoli variazioni di parametri quali il modulo o la rigidezza.

Un altro caso di disomogeneità è costituito dalla presenza di inclusioni, le quali derivano spesso dai processi di produzione di metalli e leghe metalliche. Esse costituiscono un punto di innesco di microfratture soprattutto in acciai ad alta resistenza e nelle leghe di alluminio (inclusioni intermetalliche).

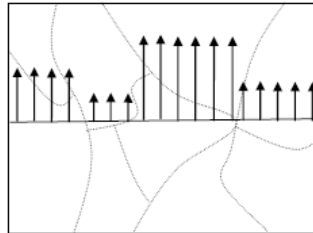


Figura 1.59^[9]: variazione dello stato di sforzo a livello microstrutturale in un metallo.

E'importante rilevare che la possibilità di avere micro-scorrimenti è più alta sulla superficie del componente per vari motivi, come ad esempio:

- a) la superficie è spesso sede di fori o intagli che aumentano la concentrazione degli sforzi;
- b) la superficie presenta un certo livello di rugosità e quindi irregolarità che fungono da micro-intagli, ossia da possibili sedi di innesco di micro-fratture;
- c) lo stato di sforzo nelle zone periferiche del componente è tipicamente più elevato che all'interno.

Questi sono alcuni dei motivi per cui le microfratture nucleano in superficie e, anche nel caso di nucleazione da inclusioni, le zone prossime alla superficie sono da considerarsi le più pericolose. Dunque, la fase di nucleazione nella vita a fatica è un fenomeno che interessa fondamentalmente la superficie del componente o del provino. In questa zona si verificano gli scorrimenti ciclici a causa di sforzi di taglio agenti a livello micro-strutturale in quanto le condizioni sono più favorevoli. Come mostrato in *Figura 1.60*, nella fase dell'oscillazione in cui il carico aumenta si forma un micro-scorrimento in direzione di un piano a bassa resistenza. A causa di questo scorrimento nuova superficie viene esposta all'ambiente esterno causando la formazione di uno strato di ossido e incrudimento locale del materiale.

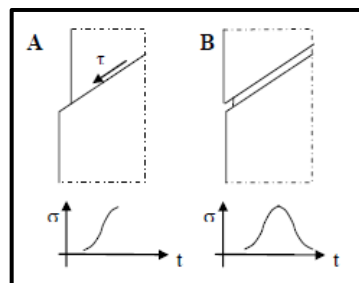


Figura 1.60^[9]: meccanismo di formazione di una banda di scorrimento.

L'incrudimento locale, nella fase dell'oscillazione in cui lo sforzo si inverte, aumenta la probabilità di avere scorrimento su una banda adiacente (*Figura 1.61*): questo meccanismo origina un'intrusione che di fatto è una micro-frattura.

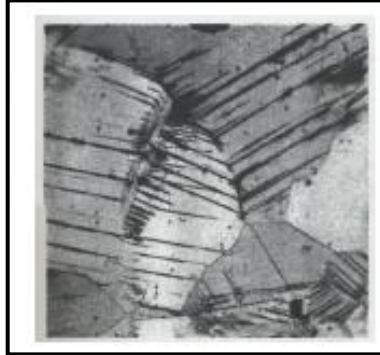


Figura 1.61 ^[9]: formazione di bande di scorrimento in un provino di rame sottoposto a fatica.

Anche se la situazione risulta semplificata e altre cause possono portare alla formazione di una banda di scorrimento, è sufficiente a comprendere che per creare un'intrusione microscopica, causa di fenomeni irreversibili come ossidazione e incrudimento, può bastare un singolo ciclo. La micro-frattura si forma perché l'intrusione abbinata a sforzi di taglio o di trazione normali alla direzione della banda causa la non coesione del materiale e la rottura dei legami atomici. Fin quando la microstruttura mantiene le dimensioni dell'ordine di qualche grano cristallino la sua crescita dipende dalla disomogeneità della struttura cristallina del materiale. In seguito, le fratture tendono ad orientarsi in direzione degli sforzi agenti e questa tendenza si amplifica nel momento in cui la micro-frattura stessa diventa origine di forte concentrazione degli sforzi al suo apice. In questa situazione la frattura cresce sempre più a livello microscopico ma in direzione del massimo sforzo macroscopico agente (*Figura 1.62*)

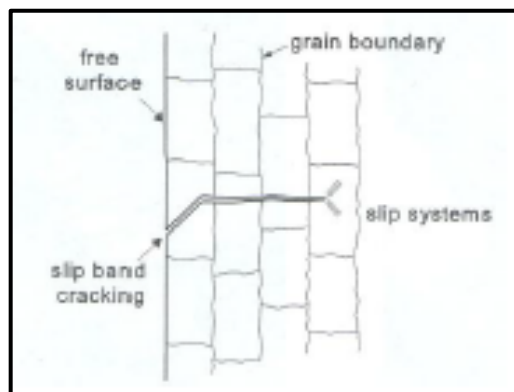


Figura 1.62 ^[9]: transizione da micro a macro-frattura in un materiale metallico.

Quando la transizione da micro a macro-frattura è completa si passa alla seconda fase, ossia alla fase di propagazione della cricca. Da questo momento la superficie non è più l'elemento principale di interesse del fenomeno, ma la propagazione è dominata da altre proprietà tra cui, su tutte, la tenacità del materiale, intesa come l'energia necessaria a creare nuove superfici libere all'interno del materiale.

In generale è difficile distinguere le due fasi e si potrebbe dire che la fase di nucleazione termina quando effettivamente la propagazione non è più influenzata da fattori superficiali. Ad esempio, un'accurata lavorazione superficiale può migliorare notevolmente la resistenza a fatica di un materiale metallico. La crescita della frattura nella direzione principale dello sforzo è dimostrata dalla forma che essa assume in provini sottoposti a torsione ciclica (fatica torsionale). In questo caso infatti, sui piani paralleli e perpendicolari agli assi del cilindro, si hanno sforzi di taglio puro mentre gli sforzi principali sono orientati a 45° , come in *Figura 1.63*.

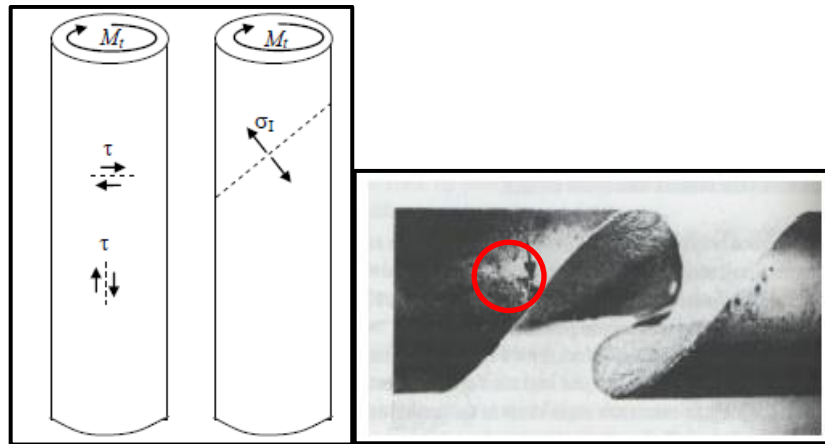


Figura 1.63 ^[9]: Stato di sforzo e superficie di frattura in un provino cilindrico sottoposto a fatica torsionale.

La propagazione della frattura lungo le superfici perpendicolari agli sforzi principali di trazione porta a superfici di frattura con caratteristiche peculiari, che si evolvono seguendo spirali inclinate a 45° , come mostrato in *Figura 1.63*. La freccia mostra il punto di nucleazione della frattura (*Figura 1.2.24 – cerchio rosso*).

1.3.5.2 Compositi a fibra continua

I materiali compositi a fibra continua presentano molteplici modalità di rottura e ciò giustifica la difficoltà che si incontra nel comprenderne il comportamento, soprattutto in campo non lineare. La resistenza del composito è determinata soprattutto dalla resistenza delle fibre, ma anche influenzata dalla capacità della matrice di trasferire il carico in presenza di rottura di fibre isolate.

I meccanismi di cedimento possono essere ricondotti a quattro tipologie fondamentali di danno: rottura delle fibre a trazione e compressione, danneggiamento progressivo della matrice (*transverse matrix cracking*), danneggiamento dell'interfaccia fibra-matrice (*interfacial debonding*) e i fenomeni di delaminazione. I primi tre si riferiscono a fenomeni di tipo *intralaminare*, che avvengono all'interno dello spessore della lamina e sono promossi dalle componenti di sforzo agenti nel piano delle lamine stesse. L'ultimo tipo di danneggiamento è invece *interlaminare* ed è originato dalle componenti di sforzo fuori dal piano. I meccanismi di danno possono evolvere in modo indipendente o interagire tra loro. La predominanza di un meccanismo di danno rispetto all'altro dipende molto dalle caratteristiche del materiale e dalla sequenza di lay-up.

Rottura delle fibre

La rottura delle fibre è un meccanismo di cedimento fragile, che avviene principalmente quando il carico è in direzione delle stesse. La rottura del rinforzo è, generalmente, il meccanismo di danno che produce il cedimento definitivo del laminato. La rottura di gruppi isolati di fibre non comporta necessariamente il cedimento totale poiché il carico si ridistribuisce e viene trasferito sulle altre. La resistenza del materiale dipende significativamente dalla lunghezza delle fibre e aumenta con essa fino ad un valore massimo in corrispondenza di una lunghezza critica. Per lunghezza della fibra superiori a quella critica la rottura del materiale avviene per rottura delle fibre di rinforzo. Per lunghezze inferiori si verificano fenomeni di *pull-out*. La matrice e lo sviluppo di danni interni ad essa giocano un ruolo fondamentale per due principali motivi:

- le zone in cui la matrice si danneggia rappresentano zone di sovrasollecitazione per le fibre;
- la matrice ha la funzione di trasferire il carico e quando si ha rottura all'interfaccia fibra-matrice questa capacità viene compromessa.

Il cedimento totale avviene quando le fibre vicine a quelle interrotte non riescono più a sopportare la sovrasollecitazione.

L'interazione tra i meccanismi di danno della matrice e la rottura delle fibre non è trascurabile nel comportamento a fatica dei materiali compositi. A differenza del danno della matrice, la delaminazione interviene in una direzione dove, con le tecnologie di laminazione convenzionali, non può essere introdotto alcun rinforzo nel laminato. Per questo motivo, una volta sviluppata, la delaminazione può procedere senza incontrare ostacoli alla sua propagazione. Questo meccanismo di danno risulta pertanto, per i compositi, uno dei fattori di rischio più significativi.

Microfrattura della matrice

Questo tipo di danneggiamento si può visualizzare in laminati multidirezionali con lamine non orientate nella direzione di carico. Ad esempio, in un laminato $[0,90]_{ns}$ (Figura 1.64), il danneggiamento avviene progressivamente e principalmente nella matrice.

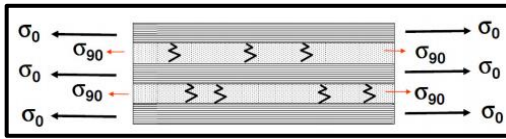


Figura 1.64 ^[9]: danneggiamento della matrice in un laminato cross-ply $[0,90]_{ns}$.

In queste condizioni di carico la matrice delle lamine ortogonali alla direzione del carico è sottoposta ad un processo di microfessurazione dovuto al carico cui è soggetta la lamina per rispettare la condizione di congruenza del laminato e seguire dunque la deformazione delle lamine con rinforzo nella direzione del carico. La peculiarità di questo tipo di danneggiamento è che si ha una saturazione del danno nelle lamine sollecitate trasversalmente alle fibre. Nel momento in cui la densità di cricche supera un valore critico, la distanza tra due fratture non è sufficiente affinché il carico trasferito possa portare ad ulteriori fessurazioni (*Figura 1.65*).

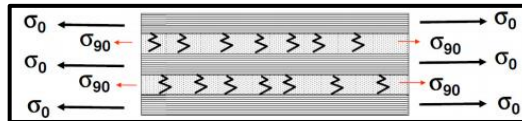


Figura 1.65 ^[9]: danneggiamento matrice in un laminato cross-ply $[0,90]_{ns}$ in condizioni prossime alla saturazione.

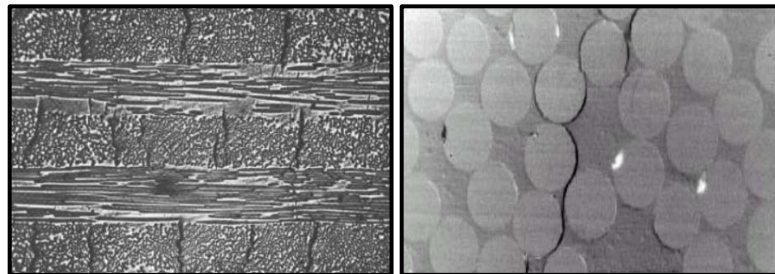


Figura 1.66 ^[9]: ingrandimento danno matrice in un laminato cross-ply (sx); ingrandimento di una fessura trasversale nella matrice (dx).

Lo sviluppo delle fratture trasversali riduce le caratteristiche di rigidità delle lamine nelle direzioni in cui le proprietà sono dominate dalla fase matrice, ma è intuibile che per un laminato multidirezionale, l'effetto sulla rigidità complessiva, dominata dalle caratteristiche delle fibre allineate con il carico, sia trascurabile. E' opportuno sottolineare che il meccanismo presentato in precedenza non è il solo che può portare alla formazione di cricche intralaminari nella matrice. E' possibile infatti la comparsa di fratture parallele alle fibre orientate secondo l'asse di applicazione del carico (*Figura 1.67*).

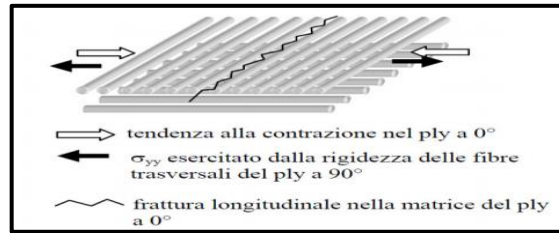


Figura 1.67 ^[9]: meccanismo di formazione delle cricche longitudinali.

La formazione di questo tipo di fratture, tipica delle lamine con rinforzo UD, è collegata da diverso coefficiente di Poisson tra le lamine orientate nella direzione del carico applicato e quelle orientate in direzione trasversale. Le lamine orientate a 0° tendono a contrarsi, ma tale tendenza è ostacolata dalla rigidità delle lamine poste a 90°. Lo stato di sforzo σ_{yy} che ne deriva può provocare la formazione di fratture nella matrice, parallelamente alle fibre. Questa modalità di danneggiamento ha una rilevanza molto minore, rispetto al *transverse matrix cracking*, nel danneggiamento compressivo del laminato.

Delaminazione

La delaminazione è una fondamentale modalità di danneggiamento che consiste nella separazione fisica tra due lamine. Essa si manifesta in seguito ad impatti o per effetto degli sforzi interlaminari agenti fuori dal piano del laminato. Le fratture per delaminazione possono avvenire secondo tre modalità di base (*Figura 1.68*) o secondo una loro combinazione.

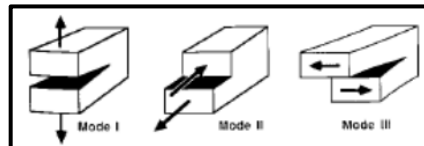


Figura 1.68 ^[9]: modalità di frattura interlaminare.

Le delaminazioni di tipo II e III sono promosse dagli sforzi di taglio interlaminare, mentre quelle di tipo I sono innescate da sforzi normali interlaminari. E' importante sottolineare che la delaminazione è spesso conseguenza di altri tipi di danneggiamento, in particolare la microfrattura della matrice che funge da innesco alla frattura interlaminare (*combined intralaminar interlaminar crack*), *Figura 1.69*.

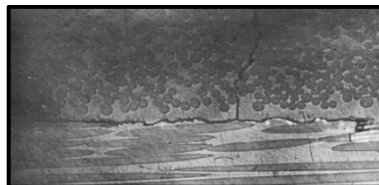


Figura 1.69 ^[9]: delaminazione in presenza di fratture trasversali nella matrice.

Altra modalità di danno è il *debonding* (separazione interfaccia fibra-matrice) che avviene per scorrimento all'interfaccia fibra-matrice ed è, in genere, fragile.

In generale, durante una prova di fatica su un laminato composito a fibra continua, si verificano le seguenti situazioni:

1. *Transverse crack*: le cricche si sviluppano in direzione ortogonale alla direzione di carico (ply 90°) e, con l'aumento del numero di cicli, si moltiplicano causando una significativa diminuzione di rigidità;
2. *Delaminazione*: le cricche trasversali causano un'intensificazione degli sforzi all'interfaccia con i ply 0° creando fenomeni di delaminazione locali;
3. *Fiber fracture*: con l'intensificazione degli sforzi all'interfaccia tra i plies e con l'aumento del numero di cicli si formano cricche longitudinali nei ply a 0° che portano alla rottura delle fibre;
4. *Failure*: il processo si conclude con la rottura del laminato.

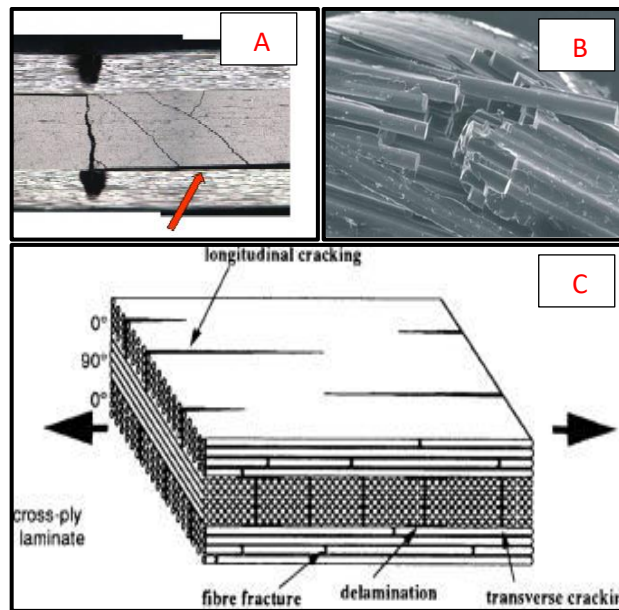


Figura 1.70 ^[12]: a) *transverse cracking & delaminazione*; b) *Fiber fracture*; c) *panoramica generale del processo di rottura per fatica di laminati compositi a fibra continua*.

Il meccanismo illustrato in *Figura 1.70* è generalmente valido, ma soprattutto nel caso di laminati $[0^\circ, 90^\circ]_s$ e $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ]_s$.

A livello teorico si potrebbe pensare che, questo meccanismo, valga anche nei **compositi a fibra discontinua**, considerando ogni strato di fibre come un laminato (la trattazione sulla modalità di rottura di compositi a fibra discontinua è oggetto di studio del seguente elaborato, per cui ne verranno esposte considerazioni nel paragrafo dedicato).

2. Tecnologie di processo e materiale utilizzato

2.1 Compression Moulding

Il Compression Moulding è uno dei processi produttivi più diffusi per la produzione di componenti in materiale composito con polimeri termoindurenti. Questa tecnologia di processo richiede l'utilizzo di presse idrauliche in grado di raggiungere pressioni variabili tra i 30 e i 300 bar. L'evoluzione delle attrezzature ha portato allo sviluppo e all'introduzione nelle presse di sistemi elettronici e di controllo del riscaldamento e del raffreddamento molto raffinati. Le fasi del processo si dividono principalmente in:

1. Posizionamento del materiale;
2. Chiusura dello stampo;
3. Ciclo di cura (polimerizzazione);
4. Estrazione del pezzo.

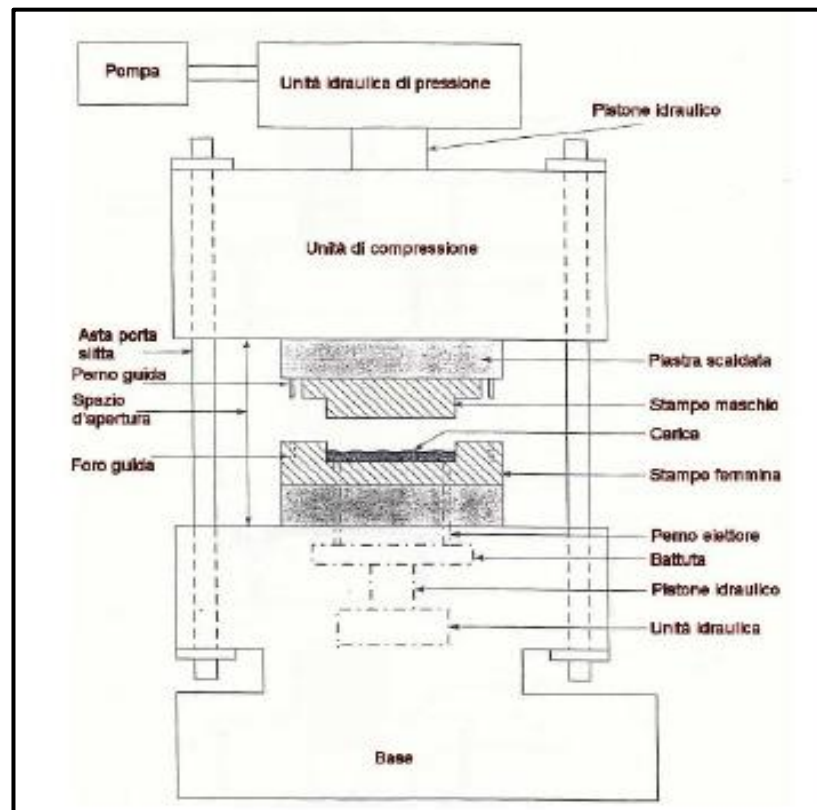


Figura 2.1 ^[10]: schematizzazione attrezzatura impianto per Compression Moulding.

La prima operazione è quella di posizionare nella metà inferiore dello stampo (*stampa femmina*) preriscaldato un quantitativo opportunamente pesato e tagliato di C-SMC (nel caso in cui il prepreg considerato sia un Carbon Sheet Moulding Compound), chiamato "carica". La preparazione della carica avviene fuori dallo stampo tenendo conto che tipicamente il materiale deve ricoprire circa il 70-80% della superficie dello stampo. Il posizionamento della carica sullo stampo è un fattore determinante sulla qualità del pezzo stampato in quanto influenza, ad esempio, l'orientazione delle fibre ed il contenuto di vuoti.

La seconda operazione è quella di chiusura dello stampo. Il controstampo (*stampo maschio*) viene portato a contatto con la superficie superiore della carica ad una certa velocità. Durante questa fase la pressione sul materiale cresce fino al valore prestabilito da progetto. Aumentando la pressione il materiale inizia a fluire all'interno dello stampo (si distinguono le zone laterali dello stampo di *Low Flow* e le zone centrali di *High Flow* del materiale). La velocità di chiusura dello stampo influenza la qualità dei componenti: è preferibile chiudere lo stampo con una velocità non eccessivamente bassa per evitare una polimerizzazione prematura e per avere un flusso più uniforme indipendentemente dallo spessore. La pressione di stampaggio può largamente variare in base a:

- Complessità della forma da ottenere;
- Tempo;
- Contenuto di fibre;
- Viscosità del prepreg alla temperatura impostata.

Lo stampo è tipicamente preriscaldato e le temperature superficiali di quest'ultimo solitamente sono nel range di 130-160 °C.

La terza operazione è quella di lasciare chiuso lo stampo per il tempo necessario alla cura del componente. Un tipico schema che illustra l'andamento di temperatura e pressione durante un ciclo di cura in pressa è mostrato in *Figura 2.2*:

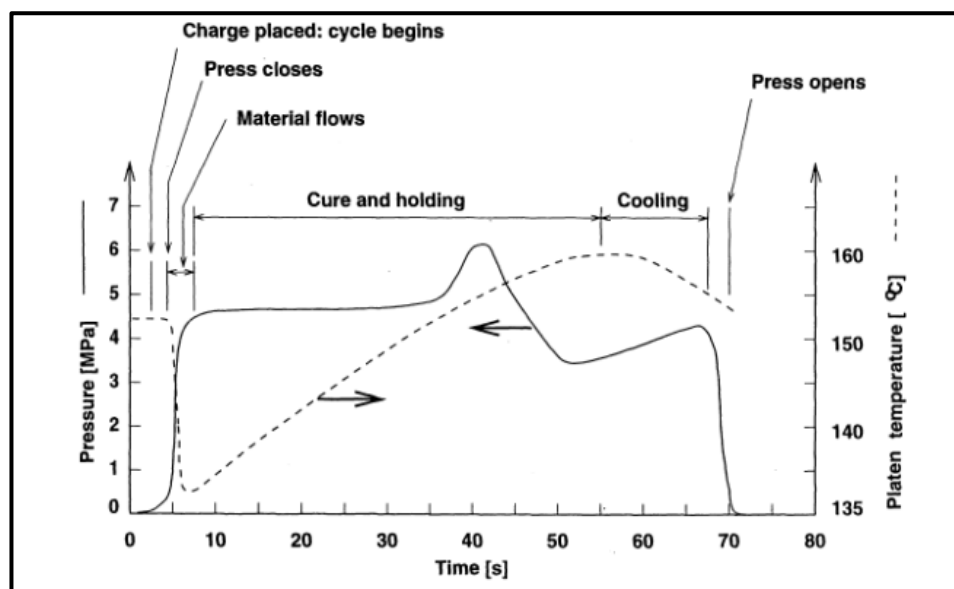


Figura 2.2 ^[12]: tipico andamento di temperatura e pressione durante il ciclo di cura in pressa.

Ottenuto un opportuno grado di reticolazione, la metà superiore dello stampo viene aperta ed il pezzo viene estratto spesso con l'aiuto di perni espulsori. Il pezzo viene quindi lasciato raffreddare all'esterno dello stampo mentre la superficie dello stesso viene pulita dai residui e cosparsa di distaccante in preparazione del successivo stampaggio.

A volte, prima di procedere con la cura in pressa, il materiale può essere preformato. Infatti, ad esempio, il materiale utilizzato in questo lavoro di tesi ha subito, prima del Compression Moulding, una preformatura in PCM. Si tratta di un macchinario che preforma il materiale con

l'ausilio del vuoto e di lampade di riscaldamento IR, rendendolo ancora duttile ma parzialmente reticolato. In particolare, in questo caso, il materiale è stato preformato secondo un ciclo che ha previsto l'utilizzo di stampo e controstampo, vuoto a 50 bar e riscaldamento tramite lampade a infrarosso a 70°C per 4 minuti.

In generale, i vantaggi di questa tecnologia di processo risultano essere:

- Tempi e volumi di produzione;
- Ottime prestazioni meccaniche e rigidità (dato l'utilizzo di prepreg);
- Resa estetica ottimale su entrambi i lati del pezzo;
- Ottima ripetibilità di processo e libertà geometrica;
- Maggiore automazione e quindi minori costi di manodopera.

Gli svantaggi, invece, risultano essere:

- Alti costi di attrezzatura e automazione (investimento iniziale);
- Costo del materiale (prepreg);
- Vincoli di sformatura più rigidi rispetto agli stampi aperti;
- Operazioni successive, in molti casi, per la rimozione di bave.

2.2 RTM

Le tecniche per infusione di resina liquida consentono la realizzazione di componenti in materiale composito complessi, con spessori anche elevati e con strette tolleranze dimensionali. Il Resin Transfer Molding (RTM) rappresenta la tecnica più comune; è un processo a stampo chiuso in cui viene inserito un sistema di rinforzo secco (fibre, tessuti, preforme) e in cui la resina viene iniettata in pressione e reticolata. Sulla base di RTM sono state sviluppate alcune varianti tra cui il VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding): questo prevede l'utilizzo del vuoto per l'aspirazione della resina, l'infusione della resina assistita da vuoto in un sistema stampo aperto/sacco a vuoto contenente il rinforzo.

Il processo RTM prevede la produzione di una preforma di fibre secche che viene posta all'interno di uno stampo chiuso, l'iniezione in pressione di resina a bassa viscosità e la reticolazione nello stesso stampo, l'apertura e l'estrazione del pezzo praticamente finito. Le fasi di lavorazione vengono riassunte in *Figura 2.3*.

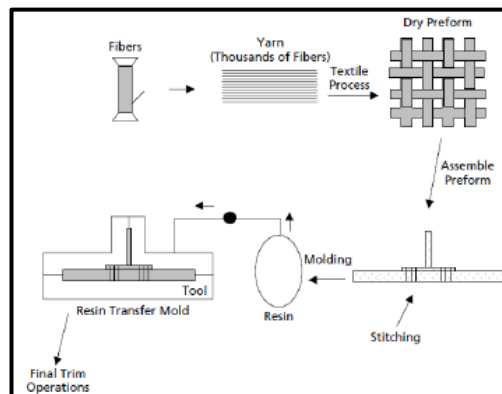


Figura 2.3 ^[9]: fasi del processo RTM per la produzione di componenti in composito.

Il sistema di rinforzo è costituito da una preforma di fibre continue oppure tessuti, assemblate con l'ausilio di leganti polimerici (*binder*) che permettono di mantenere la forma durante il maneggiamento. Sistemi di cucitura e agugliatura (*stitching*) di tessitura in 3D permettono di ottenere preforme anche complesse, stabili e ripetibili mediante attrezzature automatiche. L'impiego di preforme presenta diversi vantaggi rispetto a tecniche di laminazione tradizionali. Esse possono essere facilmente maneggiate, trasportate, deformate e pressate nello stampo. La produzione separata delle preforme ottimizza i tempi di inserimento in stampo, riducendo i costi di produzione.

Una volta che la preforma o i tessuti di rinforzo sono posizionati nello stampo, questo viene chiuso e viene iniettata la resina liquida in pressione. Per poter riempire lo stampo in tempi ridotti, è necessario impiegare una preforma con alta permeabilità, operare ad alta pressione, utilizzare una resina a bassa viscosità. Per ridurre la viscosità della resina è possibile operare a resina e/o stampo preriscaldati, anche se questo riduce il tempo di indurimento. La resina ideale per l'RTM ha una bassa viscosità (inferiore a 500 cP sono tipiche per questa tecnologia), che permette di completare l'impregnazione della preforma in un tempo di reticolazione sufficientemente lungo alla temperatura di iniezione, in modo da consentire il riempimento anche a pressione non eccessiva e un basso contenuto di sostanze volatili per minimizzare la formazione di vuoti e porosità.

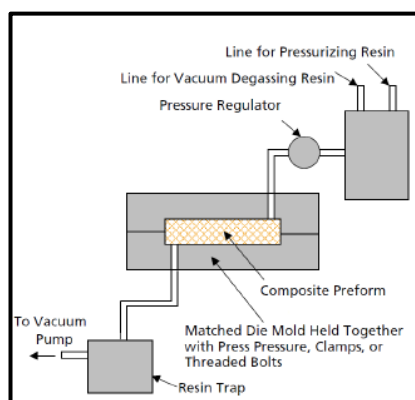


Figura 2.4 ^[9]: Schematizzazione impianto RTM.

Tra i processi RTM sono distinguibili processi HP-RTM (*High Pressure – RTM*) e LP-RTM (*Low Pressure – RTM*): il principio di base è quello descritto per il processo RTM classico ma ciò che li differenzia è praticamente la pressione applicata al controstampo nel momento della chiusura. Entrambe le varianti garantiscono qualità superficiale sulle due facce del pezzo, possibilità di realizzare forme complesse e componenti di grandi dimensioni ma, l'HP-RTM prevede un tempo di ciclo minore con maggiori volumi di produzione al contrario dell'LP-RTM.

2.3 Manual prepreg lay-up e Autoclave

Questo processo consiste nella deposizione manuale di rinforzi preimpregnati su stampi aperti con compattazione mediante sacco da vuoto e cura in autoclave (pressione, temperatura, tempo di cura). In particolare, le fasi di processo risultano: taglio del materiale, laminazione, preparazione del sacco da vuoto, cura in autoclave (polimerizzazione) ed estrazione del pezzo, il quale andrà poi eventualmente lavorato per raggiungere i requisiti qualitativi richiesti.

Inizialmente il materiale viene prelevato e tagliato in modo tale da poter essere successivamente laminato. Il taglio del prepreg può essere eseguito manualmente oppure in modo completamente automatizzato: la scelta dipende sostanzialmente dalla quantità di materiale da tagliare e dalla qualità del taglio necessaria. Una volta tagliato il materiale si passa alla fase di laminazione, ossia la fase di deposizione delle lamine sullo stampo. Prima di effettuare la laminazione è necessario applicare sulla superficie dello stampo un'agente distaccante per evitare che la resina del laminato aderisca allo stampo stesso. Talvolta, la deposizione delle lamine è preceduta dalla stesura sullo stampo di un'ulteriore lamina denominata *peel-ply*, ossia un sottile tessuto che viene utilizzato ogni qualvolta si debba conferire alla superficie del laminato una rugosità superficiale ottimale per l'esecuzione di un incollaggio. L'aspetto cruciale della laminazione è il posizionamento corretto delle lamine di prepreg. Per facilitare l'operazione vengono utilizzati sistemi di riscontro quali ad esempio griglie di riferimento o *ply-book*, in cui è riportata la sequenza di lay-up e, per ogni lamina, il numero di identificazione, le dimensioni e la posizione in pianta sullo stampo.

Eseguita la laminazione viene preparato il sacco da vuoto (*Figura 2.5*), il quale ha tre compiti fondamentali: evacuare bolle d'aria presenti nel laminato, evacuare le sostanze volatili presenti nella resina e favorire l'adesione tra le lamine.

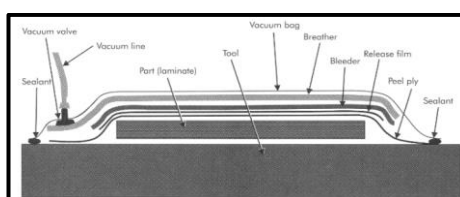


Figura 2.5 ^[9]: schema di un tipico sacco da vuoto per la polimerizzazione di laminati in composito.

La *Figura 2.5* schematizza un sacco da vuoto, il quale è dotato inoltre di trasduttori di temperatura e prese di pressione, realizzate mediante l'applicazione di una o più valvole.

Preparato il sacco, lo stampo laminato viene inserito in autoclave per la polimerizzazione, ossia la fase che conferisce al laminato le sue caratteristiche finali. Affinché questo avvenga è necessario agire contemporaneamente su due parametri: temperatura e pressione. L'autoclave è essenzialmente un serbatoio in pressione in cui è possibile variare la temperatura e la pressione nonché il vuoto nel sacco. Il suo punto di forza sta nell'esercitare uno stato di pressione idrostatico che permette di avere sul laminato uno stato di sforzo in ciascun punto diretto come la normale del laminato in quel punto. Affinché il ciclo in autoclave venga eseguito correttamente è necessario garantire l'isolamento tra il volume interno al sacco da vuoto e l'atmosfera esterna pressurizzata.



Figura 2.6: esempio di autoclave.

Le autoclavi per compositi a matrice termoindurente tipicamente hanno range operativi fino a 200°C di temperatura massima e 10 bar di pressione, mentre le dimensioni della camera interna sono completamente customizzabili in base al componente da dover polimerizzare.

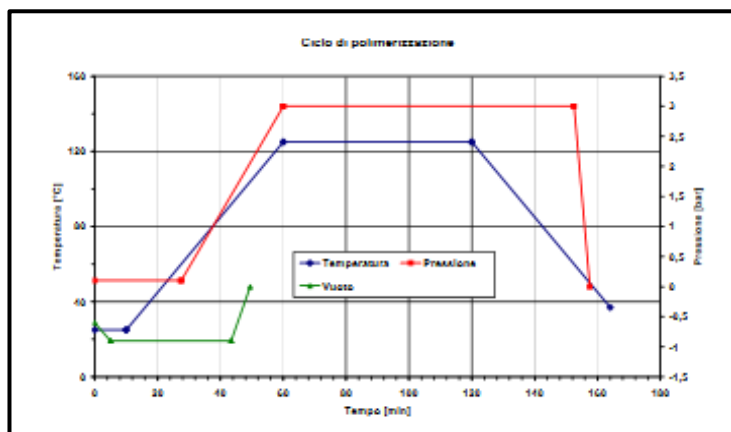


Figura 2.7 ^[12]: tipico ciclo di polimerizzazione in autoclave per un composito a matrice epossidica.

Lo svantaggio principale risulta essere il basso rateo produttivo che rende difficile ammortizzare gli investimenti iniziali.

2.4 Confronto tra le tecnologie

La Tabella 2.1 propone un rapido confronto tra le caratteristiche principali di ogni tipologia di processo illustrata nel Capitolo 2. In alcuni casi viene fatto riferimento, come vantaggio o come svantaggio, a “4 M” (precisamente *Regola delle 4M*), ossia una voce che raccoglie i costi per risorse umane (*Man*), per il materiale (*Material*), per l’attrezzatura (*Machine*) e per il processo di lavorazione (*Method*).

Tecnologie di produzione	Pro	Contra
Manual Prepreg Lay-up & Autoclave	Caratteristiche meccaniche elevate(*)	Tempi di ciclo lunghi
	Forme complesse	4 M
	Lay-up localizzato	Bassi volumi di produzione
	(*)Controllo distribuzione resina e vuoti	Resa estetica lato stampo
C-SMC (Carbon SMC)	Tempi e volumi di produzione	Alti costi di automazione ed attrezzatura iniziale
	Caratteristiche meccaniche ottime	Costo del materiale
	Resa estetica entrambi lati	Finiture successive
	Ripetibilità processo e libertà geometrica	Vincoli sformatura
RTM (Resin Transfer Molding)	HP-RTM vs LP-RTM	VARTM:
	In comune: <ul style="list-style-type: none"> Resa estetica entrambi lati Grandi dimensioni e forme complesse; 4 M Differenze: <ul style="list-style-type: none"> Alta pressione (HP) vs Bassa pressione (LP); Tempo ciclo minore (HP) vs Tempo ciclo maggiore (LP); Volume produzione maggiore (HP) vs Volume produzione minore (LP). 	<ul style="list-style-type: none"> Vacuum Assisted Stampo aperto HP-CRTM: la resina scorre sopra la preforma e viene forzata attraverso lo spessore.

Tabella 2.1: confronto riassuntivo tra vantaggi e svantaggi delle varie tecnologie di processo.

2.5 HexMC M77 i2000 RA

I materiali compositi ad alte prestazioni come i prepreg sono stati inizialmente impiegati per volumi produttivi non elevati e, principalmente, in campo aerospaziale. Questi materiali risultano avere elevate proprietà meccaniche lungo determinate direzioni ma non si adattano bene a geometrie complesse, soprattutto in presenza di angoli acuti. Inoltre, questi materiali non sono ideali per alti volumi produttivi in quanto il loro processo di lavorazione prevede la laminazione strato per strato sullo stampo da parte di un operatore.

L'HexMC® M77 C/2000 RA, sviluppato dall'Hexcel Composites, è il materiale oggetto di questo lavoro di tesi. Si tratta di un composito a fibra di carbonio discontinua e matrice epossidica prodotto specificatamente per il Compression Moulding. Esso nasce per ridurre il gap con i prepreg utilizzati nella classica laminazione manuale sia nelle proprietà meccaniche che nel tempo di processo. Le fibre sono discontinue e raggruppate in mazzetti lunghi 50 mm e larghi 8 mm, disposte nel piano in modo randomico (Figura 2.8).

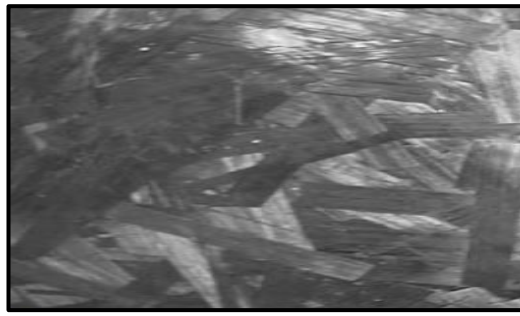


Figura 2.8 ^[10]: *aspetto superficiale dell'HexMC prima dello stampaggio.*

La matrice è a base di resina epossidica, quindi un polimero termoindurente, mentre il rinforzo è costituito da fibre di carbonio ad alta resistenza. Il processo utilizzato per produrre componenti finiti con questa tipologia di materiale è il Compression Moulding (*vedi paragrafo 2.1*).

Ogni parte che compone la sigla di questo materiale indica un fondamentale parametro:

- C sta per Carbon ed indica che le fibre utilizzate sono fibre di carbonio;
- RA rappresenta il codice identificativo del Release Agent, utilizzato per facilitare il distacco dallo stampo della parte;
- 2000 rappresenta il peso areale o "grammatura", pari a 2000 g/m²;
- M77 rappresenta il codice identificativo della matrice utilizzata.

Tipicamente, l'HexMC viene prodotto partendo da prepreg UD ad alto contenuto di fibre, buona fluidità, buona adesione delle fibre e veloce polimerizzazione. Lo strato di UD viene quindi tagliato e ridisposto adeguatamente in mazzetti disposti casualmente. Il materiale si presenta quindi sotto forma di fogli preimpregnati di determinate dimensioni che vengono successivamente arrotolati.

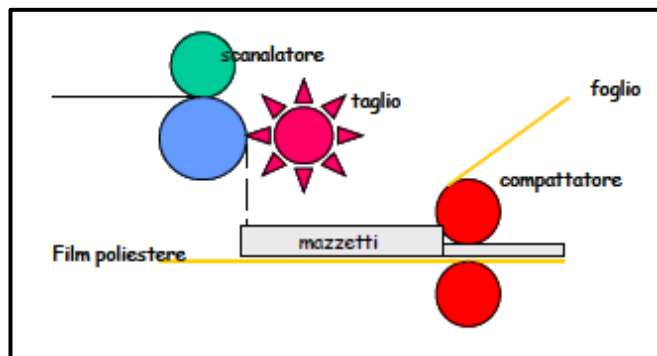


Figura 2.9 ^[10]: schema esemplificativo del processo produttivo dell'HexMC.

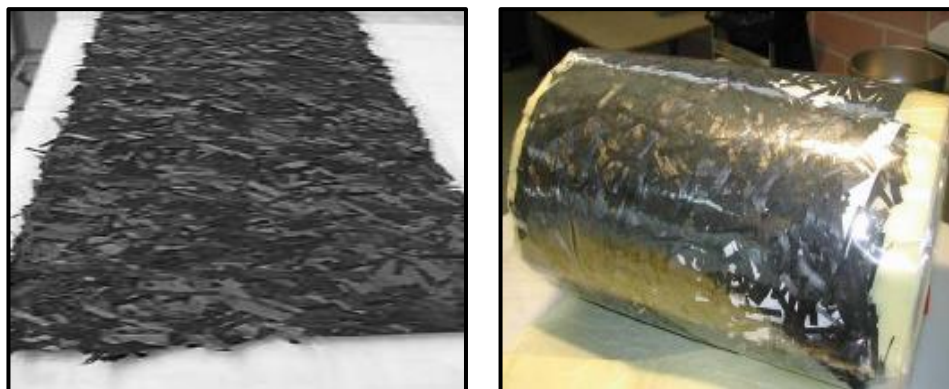


Figura 2.10 ^[10]: foglio di HexMC (a sinistra); rotolo di HexMC (a destra).

Come tutti i preimpregnati, questo materiale deve essere conservato preferibilmente a -18°C , temperatura a cui presenta una *Shelf Life* di 18 mesi. La sua conservazione a temperatura ambiente riduce notevolmente la *Shelf Life* a 6 settimane.

A temperatura ambiente il foglio si presenta duttile e formabile mentre per polimerizzare in tempi brevi è necessario raggiungere temperature elevate. Da datasheet, questo materiale prevede, per avere un tempo di cura di 3 minuti, il raggiungimento di 150°C (cicli di cura alternativi in *Tabella 2.3*).

L'HexMC viene considerato uno Sheet Moulding Compound (*SMC*), o, più precisamente nel caso specifico della fibra di carbonio un Carbon Sheet Moulding Compound (*C-SMC*), ad elevate prestazioni con cui è possibile ottenere prodotti concorrenti con le leghe leggere (Al, Mg, Ti). Le caratteristiche principali che distinguono l'HexMC da un normale SMC sono:

- Utilizzo di fibre di carbonio ad alta resistenza (normalmente gli SMC sono prodotti con fibre di vetro);
- Alto contenuto di fibre, 57% secondo il datasheet da fornitore (negli SMC non si supera tipicamente il 20-25%);
- Assenza di riempitivi;

Le caratteristiche dell'HexMC permettono di considerarlo, a livello di proprietà meccaniche, anche per scopi strutturali. Le proprietà meccaniche, dichiarate da fornitore, vengono raccolte nella *Tabella 2.2*:

	Tensile	Flexural	ILSS	Compression
Strength (MPa)	300	500	70	290
Modulus (GPa)	38	30	na	38
Standards	ASTM D3039*	ASTM D790	EN 2563	EN 6036*

* With specimen width of 32mm

Tabella 2.2 ^[11]: proprietà meccaniche dell'HexMC M77 da datasheet fornitore.

Cicli di cura alternativi sono quelli rappresentati in *Tabella 2.3*:

Temperatura [°C]	Tempo [min]
120	8
130	6
140	4
150	3

Tabella 2.3: cicli di cura alternativi.

La caratteristica e novità principale di questo materiale è la possibilità di ottenere strutture complesse in tempi inferiori ai 15 minuti. I prodotti ottenuti possono avere forme complicate ma mantenendo la tipica densità dei compositi epoxy/carbon pari a 1,55 g/cm³.

Inoltre, la tecnologia produttiva dell'HexMC permette di co-stampare insieme al prepreg inserti metallici, oltre che ridurre al minimo lo scarto di materiale. L'HexMC, grazie alle sue caratteristiche, diventa quindi prestazionalmente concorrente con le leghe leggere, perché permette di superare alcune classiche problematiche che limitano l'uso dei materiali compositi nella produzione di massa.

Lo schema in *Figura 2.11* mostra la collocazione applicativa di questo materiale rispetto ad altre tecnologie di produzione:

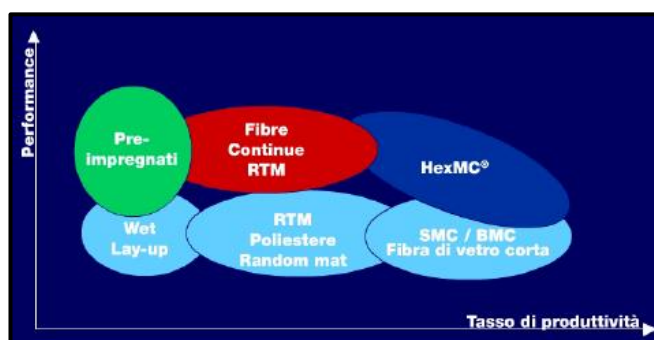


Figura 2.11 ^[11]: confronto tra performance e rate produttivo delle varie tecnologie di processo.

Dalla *Figura 2.11* è possibile notare come con l'HexMC è possibile mantenere alte performance ed avere elevati tassi produttivi rispetto ad altre tecnologie. In *Figura 2.12*, *Figura 2.13* e *Figura 2.14* viene presentato il confronto tra vari materiali in termini di densità, modulo elastico e resistenza a rottura:



Figura 2.12 [11]: confronto tra le densità di vari materiali.

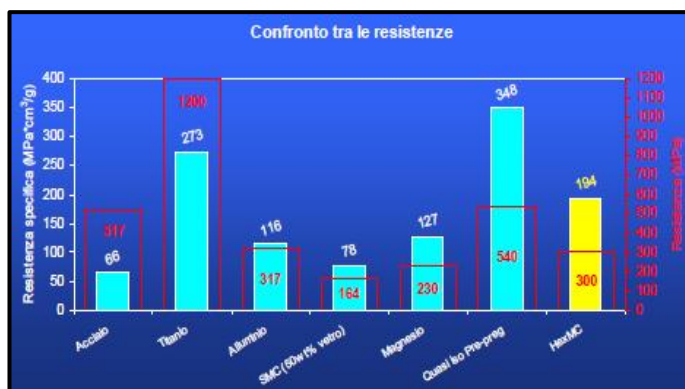


Figura 2.13 [11]: confronto tra le resistenze a rottura di vari materiali.

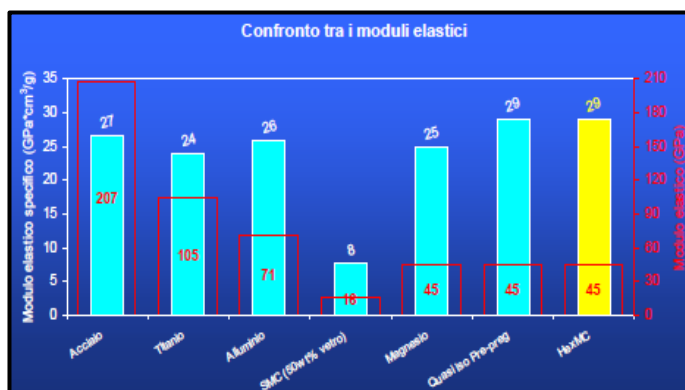


Figura 2.14 [11]: confronto tra i moduli elastici di vari materiali.

Se confrontato con i compositi epoxy/carbon tradizionali a fibre continue, l'HexMC presenta gli stessi valori di densità e modulo elastico ma una riduzione di circa il 40% del carico di rottura. A fronte di questa resistenza inferiore, esso presenta vari vantaggi:

- Velocità di produzione nettamente superiore;
- Possibilità di stampare oggetti di forma complesse e con spessori variabili;
- Co-polimerizzazione con altri materiali o con inserti metallici;
- Sistema automatizzato e quindi riproducibilità del processo;
- Notevole riduzione degli scarti di materiale.

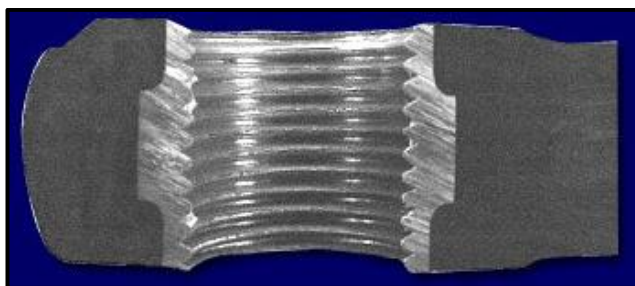


Figura 2.15 ^[10]: esempio di co-stampaggio di un inserto metallico (in sezione).

I campi in cui questo materiale sembra avere più riscontri applicativi sono:

- Aerospace;
- Automotive;
- Settore ferroviario e marittimo;
- Macchinari industriali;
- Articoli sportivi.

Attualmente uno dei punti critici, vista la scarsa diffusione sul mercato, è il costo del materiale, anche se il costo del processo produttivo rimane molto competitivo (alto investimento iniziale per le attrezzature ma facilmente recuperabile). Nel caso in cui le proprietà meccaniche del materiale vogliono essere migliorate lungo determinate direzioni esiste la possibilità di co-stampare prepreg UD. La resistenza ai raggi UV è molto alta ed una prolungata permanenza alla luce solare non determina il calo delle proprietà meccaniche, ma, per evitare eventuali variazioni di colore, è consigliata la verniciatura dei pezzi.

In particolare, per le piastre prodotte in questo lavoro di tesi, vengono di seguito raccolte le informazioni principali riguardo il processo e i parametri di produzione:

Raw Material

Raw material	Defrost Time	Lab. Temp	Storage
Hexcel HexMC M77 i2000-RA	1 gg	26°C	-18°C

Lay-up

Charge weight [g]	Charge Description	Charge Length/cm Mold	Charge width/cm Mold	Charge Length/cm Preform	Charge Width/cm Preform	Coverage Area %
499	3 plies	32	32	28,5	28,5	79

Staging/Preforming

Vacuum [mB]	Infrared Lamp Temp [°C]	Preforming Time
980	70	4

Moulding

RA	Dwell Pressure bar/ton	Dwell Time [s]	Press Load bar/ton	Thermocouple Temp [°C] Top/Bot	Cure Time [min]	Temp Up. Mold [°C]	Temp Low. Mold [°C]
MARBO WC114	30	30	300	140	12	140 (A)	142 (A)
-	16	-	135 kg/cm ²	-	-	141 (B)	142 (B)
-	-	-	-	-	-	141 (C)	141 (C)

Tabelle 2.4: parametri di processo.

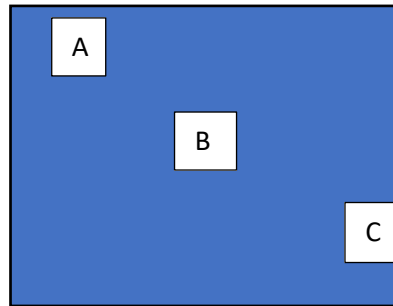


Figura 2.16: schematizzazione dei punti di acquisizione della temperatura sugli stampi.

3. Pianificazione, strumentazione e caratterizzazione

3.1 Working Plan: Test matrix

Prima di procedere con la fase pratica di testing è stato valutato ed effettuato un planning in modo da capire i test necessari da eseguire ed ottimizzare tutto in base alle richieste di produzione e ai tempi di laboratorio. La **Tabella 3.1** raccoglie in modo schematico la pianificazione, quindi i test effettivamente eseguiti e le informazioni relative più importanti, tra cui le codifiche generali dei campioni e le normative di riferimento.

TEST MATRIX						
Trazione Unnotched						
ID campione	N° campioni	Normativa	Speed test	Dimensioni [mm]	Tipo Estensometro	
T-M77-CAS	5	ASTM D3039	2 [mm/min]	250*25*3	Biassiale	
T50-M77-CAS	5	ASTM D3039	2 [mm/min]	250*50*3	Monoassiale	
T100-M77-CAS	5	ASTM D3039	2 [mm/min]	250*100*3	Monoassiale	
Trazione Open Hole						
ID campione	N° campioni	Normativa	Speed test	Dimensioni [mm]	Tipo Estensometro	w/d
TOH-M77-CAS	5	ASTM D5766	2 [mm/min]	250*25*3	Monoassiale	6
T50OH-M77-CAS-A	5	ASTM D5766	2 [mm/min]	250*50*3	Monoassiale	6
T50OH-M77-CAS-B	5	ASTM D5766	2 [mm/min]	250*50*3	Monoassiale	3
Compressione (Modulo)						
ID campione	N° campioni	Normativa	Speed Test	Dimensioni [mm]	Tipo Estensometro	
CM-M77-CAS	1	SACMA SRM 1-94	1 [mm/min]	140*130*3	Monoassiale	
Compressione (Resistenza)						
ID campione	N° campioni	Normativa	Speed test	Dimensioni [mm]	Tipo Estensometro	
CS-M77-CAS	5	SACMA SRM 1-94	1 [mm/min]	80*15*3	-	
Altri Test						
ID campione	N° campioni	Normativa	Scan Rate	Dimensioni/Qtà	Frequenza [Hz]	Ampiezza [µm]
DSC	1	ASTM D3418	20 °C/min	10-20 [mg]	-	-
DMA	1	ASTM D7028	5 °C/min	40*5*3 [mm]	5	50
Micrografia	1	-	-	20*8*3 [mm]	-	-
Fatica						
ID campione	N° campioni	Normativa	Frequenza [Hz]	Dimensioni [mm]	R	Modalità Test
F-M77-CAS	27	ASTM D3479	5	250*25*3	0,1	Standard
F-M77-CAS	23	ASTM D3479	5	250*25*3	0,1	Termografia

Tabella 3.1: schematizzazione della Test Matrix.

Dalla **Tabella 3.1** si possono evincere, in via generale, tutti i tipi di test effettuati su campioni in HexMC M77 C/2000 RA, i quali verranno trattati specificatamente in questo capitolo nei paragrafi successivi dedicati.

I campioni sono stati ricavati tutti da piastre stampate in pressa, secondo i parametri raccolti in **Tabelle 2.4**, di dimensioni 320*320*3 [mm] del tipo in **Figura 3.1**:

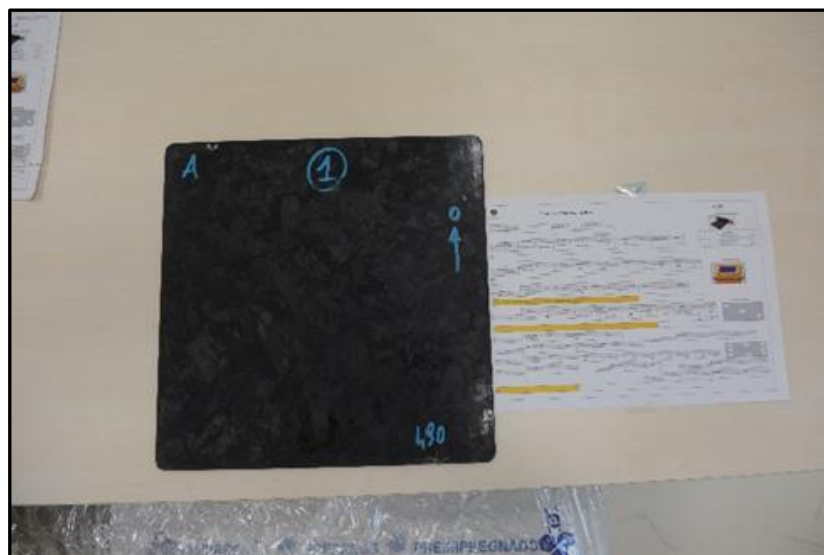


Figura 3.1: esempio di piastra standard da cui sono stati ricavati i campioni.

3.2 BBA: Building Block Approach

Un metodo molto utilizzato nella pianificazione di test su componenti nel settore automotive è il BBA, ossia il *Building Block Approach*.

In principio, l'ottimizzazione del materiale e della progettazione veniva condotta in base al risultato di vari crash test effettuati sulle vetture. Questa pratica però, ovviamente, comportava sia costi che tempi molto elevati. Per questo *Automobili Lamborghini S.p.A.*, prendendo spunto dall'industria aerospaziale, ha esteso al mondo automotive il metodo *Building Block Approach*, per cui i calcoli del margine di sicurezza si basano su un complesso mix di test ed analisi. Combinando test ed analisi a vari livelli di complessità strutturale, spesso a partire da semplici *coupons* e progressivamente passando attraverso elementi più complessi fino ai test in piena scala, è possibile raggiungere la necessaria fiducia per ridurre la quantità di crash test in piena scala da eseguire. In questo modo si riesce ad avere uno studio ottimizzato del materiale prima del crash test in modo tale da ridurre il numero fino ad anche uno soltanto e quindi abbassare notevolmente i costi.

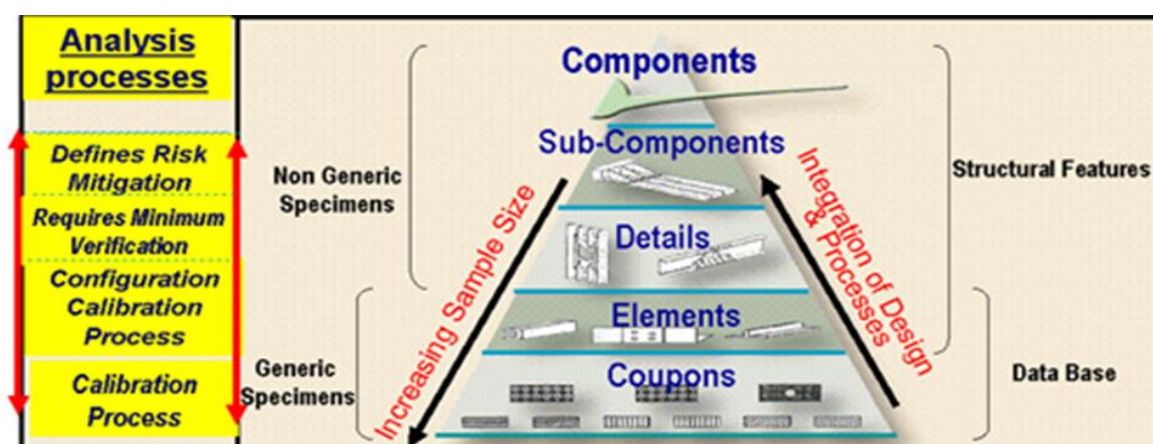


Figura 3.2 ^[12]: schematizzazione grafica piramidale del Building Block Approach.

E' da specificare che per la caratterizzazione del materiale oggetto di questo lavoro di tesi, l'HexMC M77 C/2000-RA, è stata condotta l'analisi di semplici coupons, ossia al primo livello della schematizzazione piramidale del *Building Block Approach* (Figura 3.2).

3.3 DSC: Differential Scanning Calorimetry

La calorimetria differenziale a scansione, nota anche come DSC (dall'inglese *Differential Scanning Calorimetry*), è una delle principali tecniche di analisi termica utilizzata per la caratterizzazione di molti tipi di materiali tra cui i polimeri. Il principio base di questa tecnica prevede il riscaldamento o il raffreddamento controllato del materiale. Con la tecnica DSC si misura la differenza di flusso termico tra il campione in esame ed uno di riferimento, i quali sono vincolati ad una temperatura variabile definita da un programma termico prestabilito. Il programma impostato nell'analisi in esame è illustrato in *Figura 3.3*.

CICLO DSC (Flusso azoto = 30 ml/min)	
STEP 1	1'@20°C
STEP 2	20°C -> 220°C, 20°C/min
STEP 3	1'@220°C
STEP 4	220°C -> 20°C, 20°C/min
STEP 5	1'@20°C
STEP 6	20°C -> 220°C, 20°C/min
STEP 7	220°C -> 20°C, 50°C/min

Figura 3.3: schema del ciclo DSC effettuato.

La macchina viene predisposta posizionando sugli alloggiamenti due crogioli identici (*Figura 3.4*), scelti in modo da resistere alle temperature di prova senza interagire con il campione in esame. Uno dei due crogioli rimane vuoto in quanto funge da riferimento. Se la macchina è munita di bilancia è preferibile tararla prima di caricare il materiale con il peso dei crogioli scarichi in modo da avere una misura precisa della massa inserita da analizzare.



Figura 3.4: crogioli utilizzati nel test DSC.

Tramite l'unità di controllo, la fornace viene chiusa ermeticamente isolando l'ambiente di prova da quello esterno. Una volta impostato il programma termico, all'interno della fornace contenente la massa di materiale da analizzare viene creata un'atmosfera inerte con un flusso continuo ed uniforme di Ar o N₂. Lo strumento utilizzato per eseguire il test è un Differential Scanning Calorimeter Perkin Elmer 8500 con Intracooler 2P, illustrato in *Figura 3.5*:



Figura 3.5: strumentazione DSC Perkin Elmer 8500 e Intracooler 2P.

Avviata la prova, il calore ceduto dalla fornace riscalda sia il campione che il riferimento in egual modo. Ogni variazione di temperatura tra i due è dovuta ai fenomeni che insorgono nel materiale: ad esempio, una reazione esotermica è causa di un innalzamento della temperatura del campione mentre una endotermica è causa del suo raffreddamento.

Durante tutta la prova un sistema di termocoppie registra i dati di temperatura inviandoli ad un elaboratore che, mediante un apposito software, genera l'output richiesto. Una volta terminata la prova il sistema di raffreddamento permette all'operatore di aprire la macchina e rimuovere i crogioli.

La tecnica DSC viene anche utilizzata, come in questo caso, per studiare proprietà dei polimeri quali la temperatura di transizione vetrosa. E' bene specificare che non si tratta di una temperatura precisa ma di un intervallo di temperature entro il quale si verifica la transizione. In un grafico che ha sull'asse delle ascisse la temperatura e sull'asse delle ordinate il flusso di calore, ciò si traduce in quanto illustrato in *Figura 3.6*:

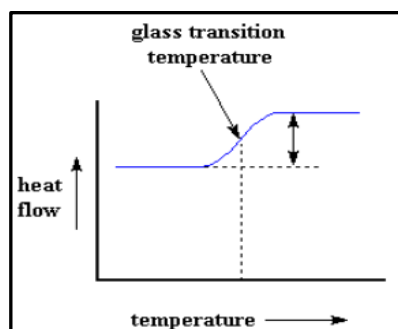


Figura 3.6 ^[12]: schematizzazione della zona di transizione vetrosa in una prova DSC.

La prova DSC è stata condotta in accordo con la normativa di riferimento, la ASTM D 3418 ('Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry'). Il campione utilizzato è stato ricavato tramite taglio water-jet da una parte della piastra utilizzata per i provini dei test a trazione (Figura 3.7 – cerchio rosso).

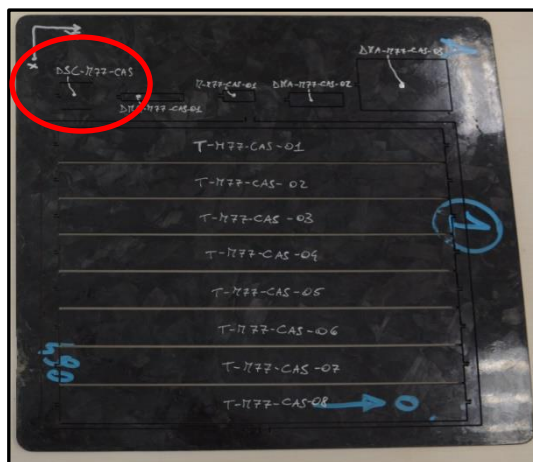


Figura 3.7: campione per test DSC.

Le dimensioni effettive del campione risultano di 20*20*3 mm da cui sono stati ricavati 10-20 mg di materiale da sottoporre al test DSC. Il campione è stato estratto dalla piastra con una tronchese e sbriciolato. Il materiale (sia resina che fibra) sminuzzato è stato prelevato evitando zone verniciate o contaminanti per raggiungere i 20 mg richiesti dalla prova.

Una volta ricavato il campione è stato codificato:

- **DSC-M77-CAS:** DSC indica il tipo di prova effettuata, M77 identifica il materiale e CAS il laureando.

3.4: DMA: Dynamic Mechanical Analysis

L'analisi meccanica dinamica (DMA dall'inglese *Dynamic Mechanical Analysis*) è una tecnica di analisi termica utilizzata per lo studio delle proprietà viscoelastiche dei materiali. Consiste nell'applicazione sul provino di una forza oscillante ad una data temperatura. Tramite questo tipo di analisi è possibile determinare alcune proprietà tra cui la temperatura di transizione vetrosa (T_g) e parametri quali il modulo complesso di Young, i moduli di conservazione e di perdita (*Storage modulus* e *Loss modulus*), oltre al fattore di smorzamento ($\tan\delta$) e lo scorrimento viscoso (*creep*).

La strumentazione per la DMA consente di effettuare sia misure su campioni solidi che fluidi. Il campione, fissato tra due bracci o piatti, può essere sottoposto a stress in vari modi tramite l'ausilio di un motore elettromagnetico: esso può essere sottoposto a flessione oppure compressione, taglio o torsione. La deformazione indotta viene misurata tramite un trasduttore LVDT in grado di rilevare spostamenti dell'ordine di frazioni di micron. A seconda dell'obiettivo, è possibile misurare sia a frequenza costante (variando la temperatura), sia a temperatura costante (variando la frequenza) oppure variando sia la frequenza dello sforzo sia la temperatura in modo programmato.

Lo strumento utilizzato per questa analisi è il Differential Scanning Calorimeter Perkin Elmer 8000, illustrato in *Figura 3.8*:



Figura 3.8: strumentazione DMA Perkin Elmer 8000 e campione montato.

Applicando uno stress sinusoidale, il materiale, se puramente elastico, subisce una deformazione istantanea costante nel tempo; rimuovendo la forza applicata esso tende a recuperare immediatamente e completamente il suo stato originario. Nel caso di sistemi viscosi, lo stress applicato causa una deformazione crescente nel tempo finché non viene rimosso; in questo caso la deformazione si arresta ma non si ha un completo recupero dello stato originario nel materiale.

Nel caso di un materiale puramente elastico, quindi, lo sforzo e la deformazione sono in fase, mentre nel caso di un materiale puramente viscoso sono fuori fase di 90°. I polimeri presentano comunemente una differenza di fase tra sforzo e deformazione, indicata con la lettera greca δ , compresa tra 0° e 90°. La trattazione matematica del comportamento viscoelastico di un materiale porta alla definizione dello Storage modulus e del Loss modulus.

Lo Storage modulus, che misura l'energia immagazzinata e che è legato al comportamento elastico, viene indicato con E' e si ricava dall'equazione:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos\delta$$

mentre il loss modulus, relativo all'energia dissipata sotto forma di calore e legato al comportamento viscoso, è dato dall'equazione:

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin\delta$$

dove, in entrambe le equazioni:

- σ_0 è l'ampiezza dello stress;
- ε_0 è l'ampiezza della deformazione;
- δ è lo sfasamento tra stress e deformazione.

Il rapporto tra il Loss modulus e lo Storage modulus fornisce la tangente dello sfasamento tra stress e deformazione:

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'}$$

Nella caratterizzazione dei materiali polimerici si è soliti riportare in un grafico i valori di E' , E'' e $\tan\delta$ in funzione della temperatura. Prendendo in considerazione l'applicazione di uno sforzo di taglio, vengono definiti i moduli G' e G'' in modo analogo a quanto precedentemente esposto.

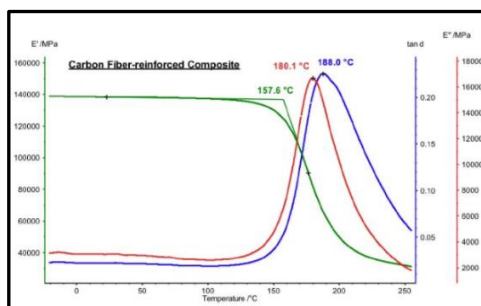


Figura 3.9 [12]: esempio di output di un test DMA su compositi rinforzati in fibra di carbonio.

L'analisi DMA è stata effettuata in accordo con la normativa di riferimento ASTM D 7028 ('Standard Test Method for Glass Transition Temperature of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis') impostando uno scan rate di 3°C/min anziché 5°C/min per uniformare maggiormente la temperatura nella fornace durante il riscaldamento. I provini, uno di dimensioni 40x5x3 mm ed uno di 35x10x3 mm, sono stati sottoposti ad una sollecitazione di ampiezza 50 µm ad una frequenza di 5 Hz. Il tipo di sollecitazione meccanica scelto è stato il single cantilever beam. La temperatura da raggiungere è stata fissata a 220°C. In ogni provino, dopo l'estrazione dalla piastra, è stata necessaria una preparazione superficiale mediante carte abrasive per ottenere delle superfici lisce.

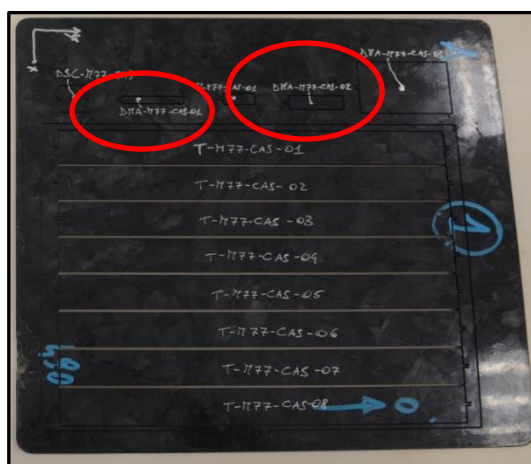


Figura 3.10: campioni per test DMA.

I due campioni, come visibile in *Figura 3.10*, sono stati codificati secondo la sigla:

- *DMA-M77-CAS 01*: DMA indica il tipo di prova effettuata, M77 identifica il materiale, CAS il laureando e 01 il numero progressivo del provino (in questo caso le dimensioni del provino, 40x5x3 mm);
- *DMA-M77-CAS 02*: DMA indica il tipo di prova effettuata, M77 identifica il materiale, CAS il laureando e 02 il numero progressivo del provino (in questo caso le dimensioni del provino, 35x10x3 mm).

3.5 Test quasi statici

Sono stati effettuati dei test statici sul materiale al fine di caratterizzarne i parametri più importanti. In particolare, sono stati effettuati test di trazione su campioni di tre differenti larghezze, test di trazione su campioni open hole, test di compressione (modulo e resistenza). Le informazioni principali sui singoli test effettuati sono raccolte nei seguenti paragrafi dedicati.

3.5.1 Prove di trazione

La prova di trazione è la prova meccanica più importante in quanto permette di quantificare le fondamentali proprietà meccaniche con le quali si classificano e si scelgono i materiali. In particolare, alcuni tra i parametri ricavabili più importanti sono il carico di rottura, l'allungamento percentuale ed il modulo elastico. E' una prova di tipo distruttivo in cui la sollecitazione applicata è di tipo statico, cioè gradualmente crescente.

La macchina utilizzata per effettuare i vari test di trazione è stata la Instron 5985 illustrata in *Figura 3.11* (sinistra), la quale si compone, in generale, di:

- un basamento;
- due colonne di sostegno;
- una traversa fissa;
- una traversa mobile;
- teste idrauliche dotate di sistemi di afferraggio;
- pompa di comando idraulica ad alta pressione;

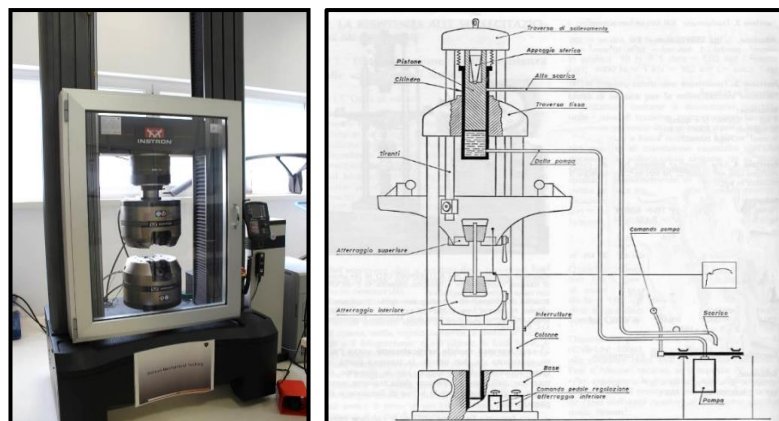


Figura 3.11 ^[12]: Instron 5985 statica utilizzata per i test di resistenza a trazione (a sinistra); schematizzazione attrezzatura universale per test di trazione (a destra).

La prova di trazione viene effettuata allo scopo di individuare le caratteristiche di resistenza, deformabilità ed elasticità di un materiale. Tali elementi sono ricavabili dal diagramma sforzo-deformazione, output della prova (Figura 3.12):

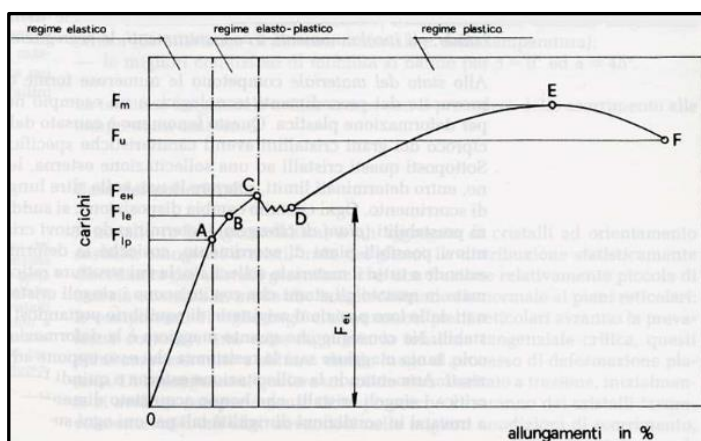


Figura 3.12 ^[12]: diagramma sforzo-deformazione standard.

La Figura 3.12 illustra la curva sforzo-deformazione che si ottiene per materiali metallici, in cui si distinguono sia un regime elastico che uno plastico. Nel caso dei materiali compositi in fibra di carbonio e matrice epossidica il grafico si riduce al tratto OA, ossia al regime elastico: la rottura del composito è di tipo fragile ed avviene in campo elastico per cui non esiste snervamento.

Nel caso di prove di trazione su materiali compositi a matrice polimerica la normativa di riferimento è la ASTM D 3039 (“Standard test method for Tensile properties of polymer matrix composite materials”). Essa definisce le caratteristiche principali dei campioni da sottoporre al test (velocità di traversa 2mm/min):

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle,°
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Figura 3.13 ^[14]: caratteristiche geometriche dei campioni a matrice polimerica per test a trazione.

I test di trazione sono stati condotti su campioni *Unnotched* (a sezione piena) di tre larghezze differenti (25,50 e 100 mm) e su campioni *Open Hole* (a sezione forata) di due larghezze (25, 50 mm) e due rapporti w/d (3 e 6) differenti.

Trazione su campioni Unnotched

I campioni sono stati ricavati da piastre del tipo illustrato in Figura 3.1 (Paragrafo 3.1) e, in particolare, tramite taglio alla macchina water-jet (Figura 3.14). Nella water-jet una pompa ad altissima pressione genera un getto d’acqua con pressione fino a 6480 bar. Questa pressione viene convertita in velocità tramite un piccolo orifizio di uscita realizzato con pietre preziose, creando un getto di dimensioni molto ridotte. Per aumentare la potenza di taglio di circa 1000 volte, viene

inserita della sabbia di granato nel getto d'acqua supersonico. L'acqua e il granato escono dalla testa di taglio a una velocità di quasi quattro volte maggiore quella del suono e questo getto è in grado di tagliare una lastra di acciaio di dimensioni superiori a 30 cm.

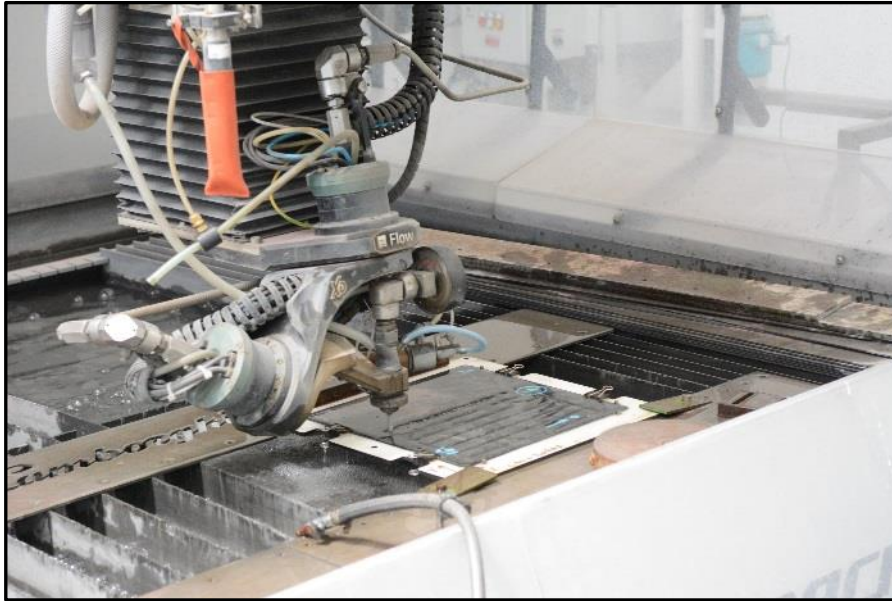


Figura 3.14: macchina di taglio water-jet in funzione.

Una volta ricavati, i campioni sono stati codificati:

- **T-M77-CAS 01:** T sta per trazione (o meglio *Tensile*) su provini di tipo unnotched con larghezza di 25 mm, M77 classifica il tipo di resina utilizzata quindi il materiale, CAS identifica il laureando e 01 il numero del provino in modo progressivo;
- **T50-M77-CAS:** T50 sta ad indicare trazione su provini unnotched con larghezza 50 mm;
- **T100-M77-CAS:** T100 sta ad indicare trazione su provini unnotched di larghezza 100 mm.

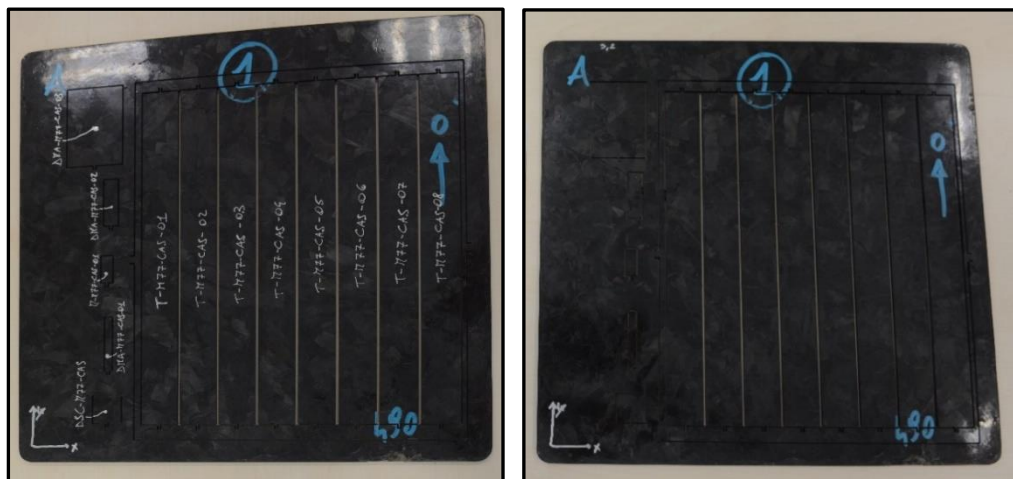


Figura 3.15: campioni T-M77-CAS 01-08 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.



Figura 3.16: campioni T50-M77-CAS 01-05 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.



Figura 3.17: campioni T50-M77-CAS 06-10 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.



Figura 3.18: campioni T100-M77-CAS 01-02 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

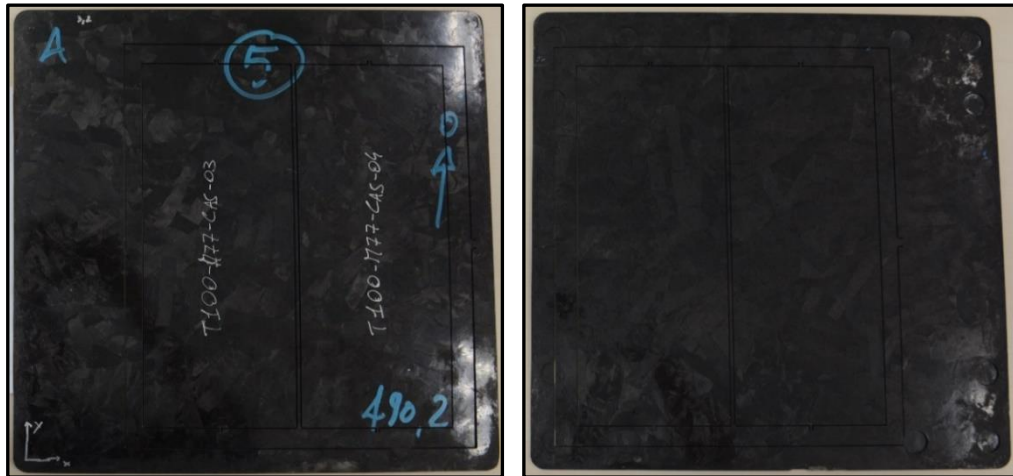


Figura 3.19: campioni T100-M77-CAS 03-04 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.



Figura 3.20: campioni T100-M77-CAS 05-06 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.



Figura 3.21: campioni T100-M77-CAS 07-08 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

Una volta tagliati e codificati, i campioni sono stati estratti dalle piastre di riferimento e sono state isolate le zone tabs dalle lunghezze utili di prova (*Figura 3.22*):



Figura 3.22: isolamento della zona tabs dalla lunghezza utile di prova.

Dopo aver isolato la lunghezza utile dei campioni, essi sono stati sottoposti a sabbiatura in modo da favorire l'incollaggio delle tabs (*Figura 3.23*):

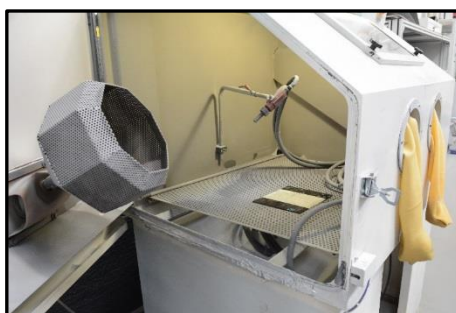


Figura 3.23: sabbiatrice.

Il risultato di questa operazione viene illustrato in *Figura 3.24* (A,B,C):

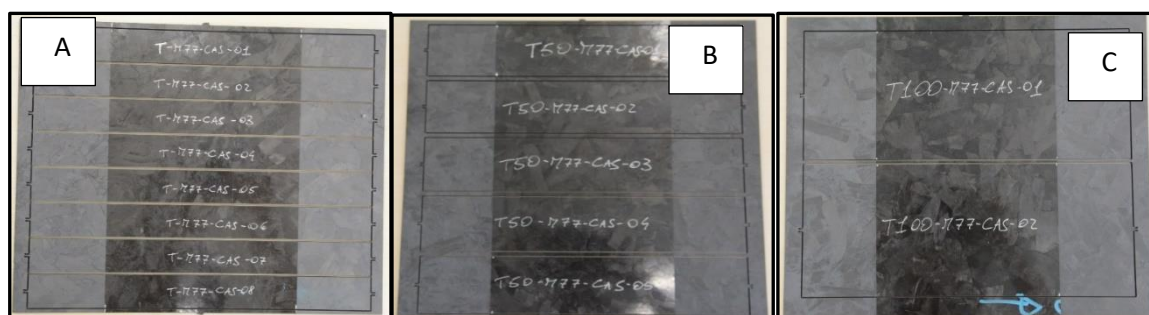


Figura 3.24: sabbiatura zona applicazione tabs dei campioni; A) T-M77-CAS; B) T50-M77-CAS; C) T100-M77-CAS.

Una volta sabbiate le zone di applicazione delle tabs, queste sono state incollate. Nel caso di campioni T-M77-CAS, l'incollaggio è avvenuto con il semplice utilizzo di cianoacrilato, mentre per i campioni T50-M77-CAS e T100-M77-CAS con larghezze maggiori l'incollaggio è avvenuto tramite l'utilizzo di colla DP490 maggiormente resistente. Le tabs applicate sono in materiale composito in fibra di vetro e matrice epossidica con lunghezza 56 mm, spessore 2 mm e larghezza dipendente dal provino.

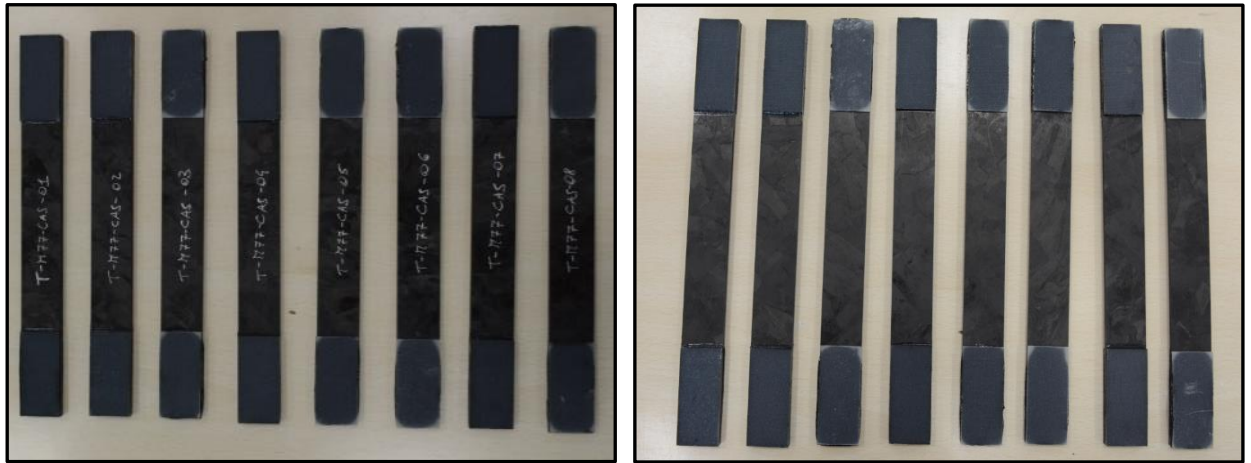


Figura 3.25: campioni T-M77-CAS 01-08 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

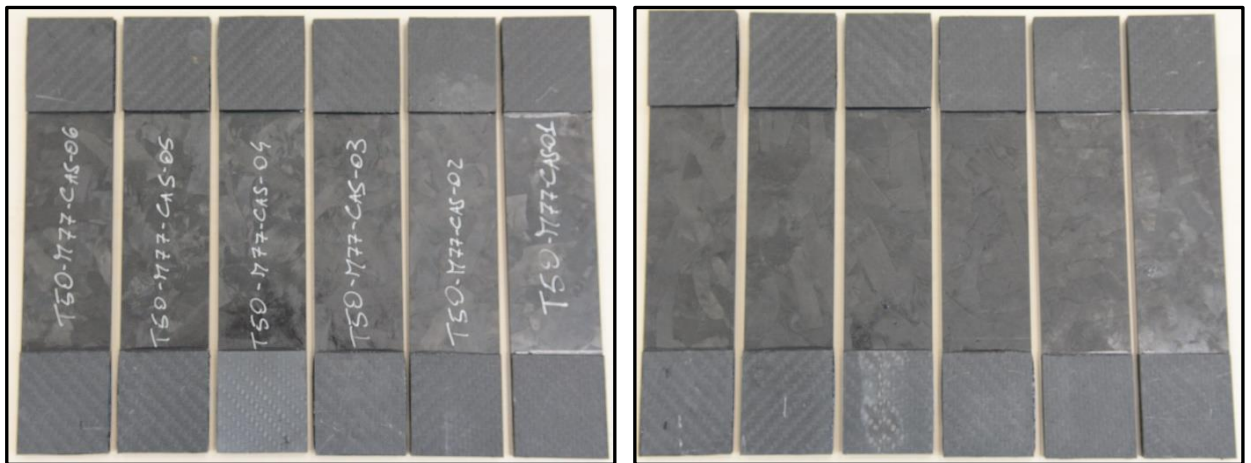


Figura 3.26: campioni T50-M77-CAS 01-06 e tabs incollate con DP490 prima dei test.

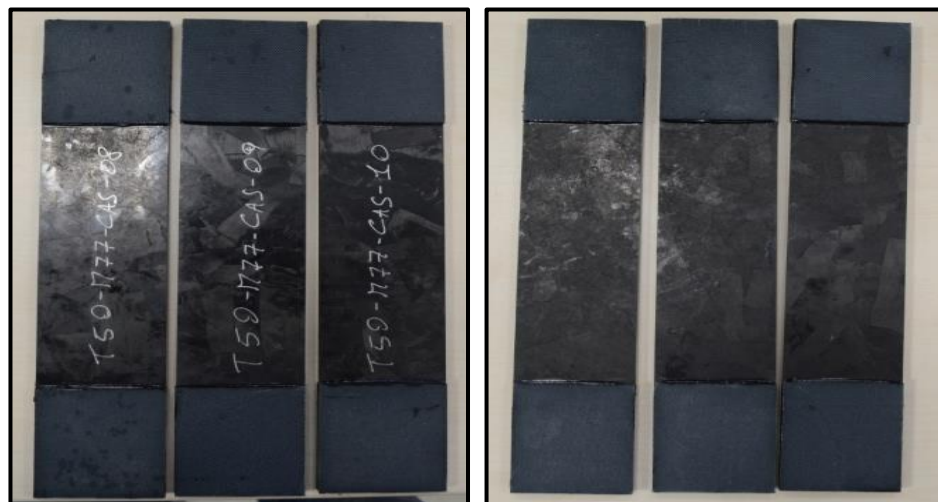


Figura 3.27: campioni T50-M77-CAS 08-10 e tabs incollate con DP490 prima dei test.



Figura 3.28: campioni T100-M77-CAS 01-03 e tabs incollate con DP490 prima dei test.



Figura 3.29: campioni T100-M77-CAS 04-06 e tabs incollate con DP490 prima dei test.

Dopo la fase di incollaggio delle tabs i campioni sono stati misurati per definirne le dimensioni effettive necessarie per l'utilizzo della macchina di prova. Le seguenti tabelle (*Tabella 3.2, Tabella 3.3, Tabella 3.4*) mostrano le grandezze misurate: esse risultano essere la media di tre diverse misurazioni in tre punti dei campioni per ogni grandezza. Le misure di spessore sono state eseguite tramite l'ausilio di un micrometro mentre quelle di larghezza e lunghezza libera tramite un calibro. Da notare il fatto che nelle tabelle sono presenti dati di misurazione raccolti per più provini rispetto a quelli definiti come minimo dalla normativa di riferimento, ossia 5. Questo per avere un range più ampio di campioni su cui svolgere l'analisi dei dati prevenendo eventuali anomalie nei test.

ID provino	Larghezza [mm]	Lunghezza utile [mm]	Spessore [mm]
T-M77-CAS 01	25,09	136,53	3,114
T-M77-CAS 02	25,11	137,69	3,109
T-M77-CAS 03	25,08	137,39	3,098
T-M77-CAS 04	25,07	137,71	3,093
T-M77-CAS 05	25,09	138,11	3,100
T-M77-CAS 06	25,09	138,56	3,089
T-M77-CAS 07	25,08	137,54	3,078
T-M77-CAS 08	25,10	137,49	3,077

Tabella 3.2: dimensioni campioni T-M77-CAS 01-08.

ID provino	Larghezza [mm]	Lunghezza libera [mm]	Spessore [mm]
T50-M77-CAS 01	50,06	137,23	3,156
T50-M77-CAS 02	50,11	137,27	3,200
T50-M77-CAS 03	50,15	136,94	3,203
T50-M77-CAS 04	50,07	137,63	3,148
T50-M77-CAS 05	50,05	137,45	3,177
T50-M77-CAS 06	50,07	137,80	3,103
T50-M77-CAS 07	50,05	138,01	3,074
T50-M77-CAS 08	50,09	137,83	3,063
T50-M77-CAS 09	50,09	138,07	3,073
T50-M77-CAS 10	50,07	137,72	3,038

Tabella 3.3: dimensioni campioni T50-M77-CAS 01-10.

ID provino	Larghezza [mm]	Lunghezza libera [mm]	Spessore [mm]
T100-M77-CAS 01	100,11	137,86	3,141
T100-M77-CAS 02	100,09	137,19	3,105
T100-M77-CAS 03	100,06	137,33	3,072
T100-M77-CAS 04	100,05	137,39	3,100
T100-M77-CAS 05	100,02	137,52	3,095
T100-M77-CAS 06	100,12	137,50	3,077

Tabella 3.4: dimensioni campioni T100-M77-CAS 01-06.

Note le dimensioni dei campioni, sono state effettuate le prove di trazione tramite l'utilizzo della Instron 5985 con il supporto di estensometri per la valutazione del modulo elastico. In particolare, è stato utilizzato un estensometro biassiale (Instron W-E402B) nel caso di campioni T-M77-CAS e, a causa della larghezza eccessiva, un estensometro monoassiale (Instron Dynamic Extensometer) per i campioni T50-M77-CAS e T100-M77-CAS.

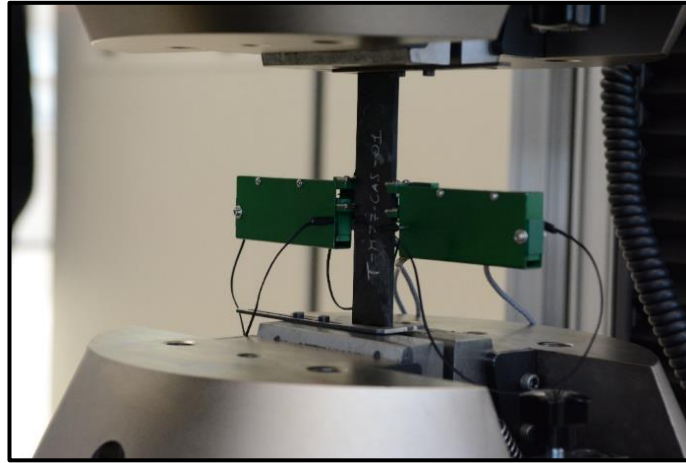


Figura 3.30: campione T-M77-CAS 01 con estensometro biassiale per il calcolo del modulo elastico.



Figura 3.31: campione T50-M77-CAS 04 con estensometro monoassiale per il calcolo del modulo elastico.

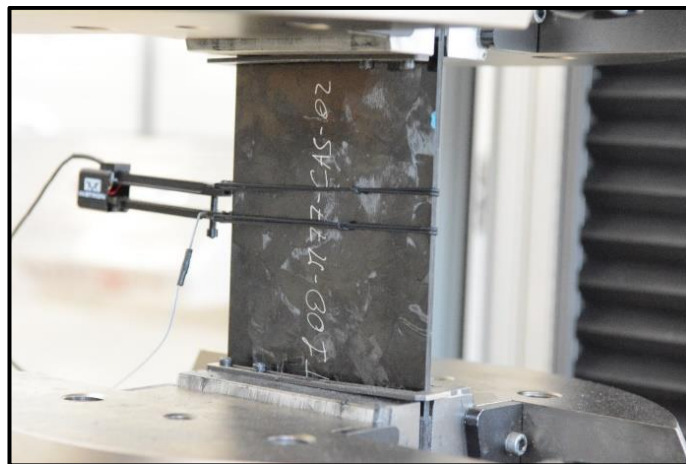


Figura 3.32: campione T100-M77-CAS 02 con estensometro monoassiale per il calcolo del modulo elastico.

Trazione su campioni Open Hole

La procedura per la preparazione dei campioni Open Hole è stata identica a quella dei campioni Unnotched. Inizialmente dalle piastre sono stati ricavati tramite taglio alla macchina waterjet ed in seguito codificati:

- **TOH-M77-CAS 01**: T sta per trazione (o meglio *Tensile*) su provini di larghezza 25 mm, OH per Open Hole, M77 classifica il tipo di resina utilizzata quindi il materiale, CAS identifica il laureando e 01 il numero del provino in modo progressivo;
- **T50OH-M77-CAS-A 01**: T50OH sta ad indicare trazione su provini di tipo Open Hole di larghezza 50 mm, mentre A indica un rapporto $w/d=6$;
- **T50OH-M77-CAS-B 01**: B sta ad indicare un rapporto $w/d=3$;

Sui campioni Open Hole è stato praticato, sempre tramite waterjet, un foro di particolare diametro per cui il parametro dominante su cui effettuare l'analisi è risultato il rapporto w/d . Quest'ultimo è stato definito in accordo con la normativa di riferimento per test di trazione su campioni Open Hole, la ASTM D 5766 ('*Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*'). Essa definisce come standard un rapporto $w/d=6$, il quale è stato modificato nel caso dei campioni T50OH-M77-CAS-B ($w/d=3$) per studiare l'effetto del foro sulla larghezza.

Una volta eseguita la codifica i campioni hanno subito un trattamento di sabbiatura nella zona delle tabs in modo da favorirne l'incollaggio. Anche in questo caso esse sono state incollate con l'utilizzo di cianoacrilato per i campioni TOH-M77-CAS e di DP490 per i campioni T50OH-M77-CAS-A e T50OH-M77-CAS-B. Il risultato finale è illustrato in *Figura 3.33-3.37*:

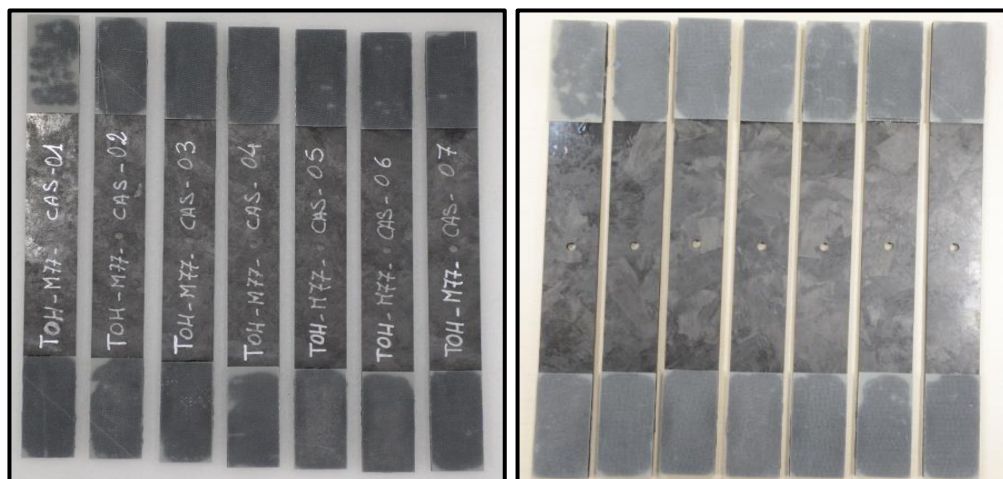


Figura 3.33: campioni TOH-M77-CAS 01-07 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

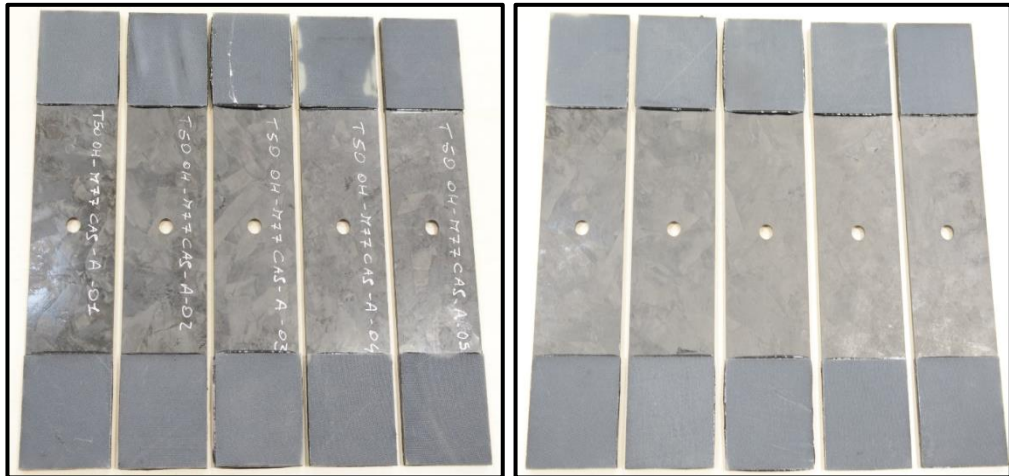


Figura 3.34: campioni T500H-M77-CAS-A 01-05 e tabs incollate con DP490 prima dei test.

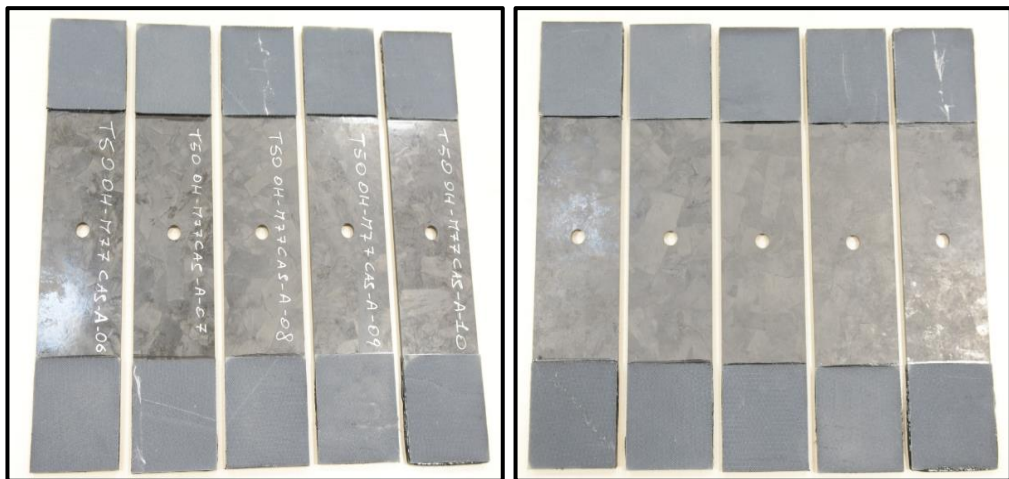


Figura 3.35: campioni T500H-M77-CAS-A 06-10 e tabs incollate con DP490 prima dei test.

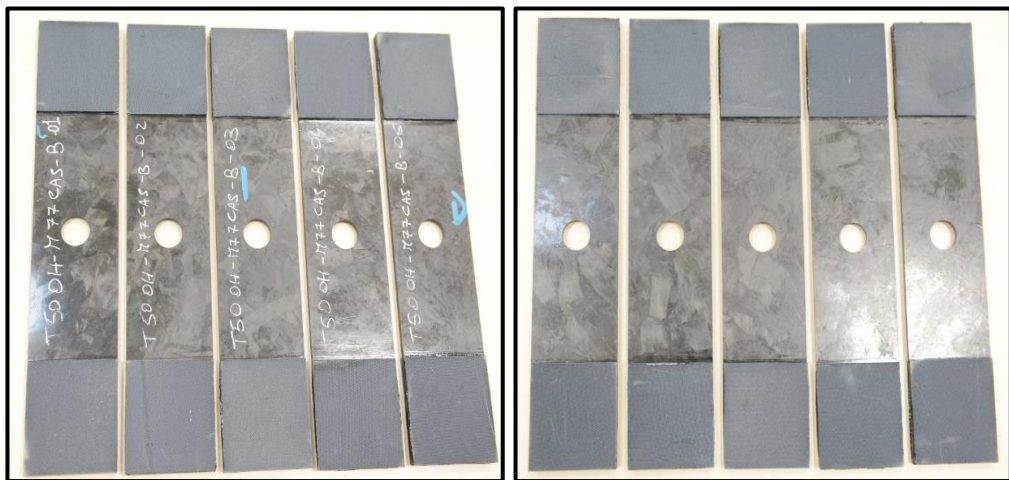


Figura 3.36: campioni T500H-M77-CAS-B 01-05 e tabs incollate con DP490 prima dei test.

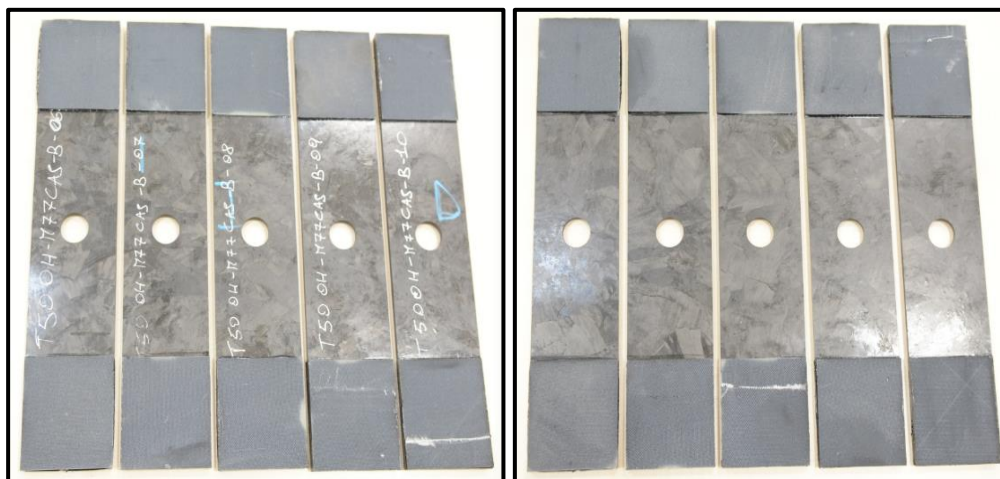


Figura 3.37: campioni T50OH-M77-CAS-B 06-10 e tabs incollate con DP490 prima dei test.

Una volta incollate le tabs sono state misurate le dimensioni dei campioni: larghezza e lunghezza utile tramite l'ausilio di un calibro, mentre lo spessore tramite l'ausilio di un micrometro. I dati raccolti in Tabella 3.5-3.7 risultano essere la media di 3 misurazioni effettuate in 3 zone diverse del campione.

Nonostante la normativa definisce come sufficienti 5 campioni per un'analisi attendibile, sono stati prodotti e misurati più provini a scopo previsionale di eventuali anomalie nei test.

ID provino	Larghezza [mm]	Lunghezza utile [mm]	Spessore [mm]
TOH-M77-CAS 01	25,03	137,84	3,04
TOH-M77-CAS 02	25,07	137,84	3,03
TOH-M77-CAS 03	25,01	137,76	3,04
TOH-M77-CAS 04	25,04	137,94	3,05
TOH-M77-CAS 05	25,02	137,89	3,06
TOH-M77-CAS 06	25,06	137,91	3,09
TOH-M77-CAS 07	25,04	137,97	3,10

Tabella 3.5: dimensioni campioni TOH-M77-CAS 01-07.

ID provino	Larghezza [mm]	Lunghezza libera [mm]	Spessore [mm]
T50OH-M77-CAS-A 01	50,07	137,72	3,04
T50OH-M77-CAS-A 02	50,09	137,45	3,03
T50OH-M77-CAS-A 03	50,05	138,32	3,04
T50OH-M77-CAS-A 04	50,06	137,65	3,06
T50OH-M77-CAS-A 05	50,03	137,00	3,06
T50OH-M77-CAS-A 06	50,06	137,71	3,06
T50OH-M77-CAS-A 07	50,08	137,85	3,08
T50OH-M77-CAS-A 08	50,14	137,36	3,10
T50OH-M77-CAS-A 09	50,12	137,97	3,12
T50OH-M77-CAS-A 10	50,09	137,01	3,10

Tabella 3.6: dimensioni campioni T50OH-M77-CAS-A 01-10.

<i>ID provino</i>	<i>Larghezza [mm]</i>	<i>Lunghezza libera [mm]</i>	<i>Spessore [mm]</i>
T50OH-M77-CAS-B 01	50,16	137,82	3,15
T50OH-M77-CAS-B 02	50,10	138,15	3,16
T50OH-M77-CAS-B 03	50,13	137,85	3,19
T50OH-M77-CAS-B 04	50,11	138,60	3,25
T50OH-M77-CAS-B 05	50,12	137,78	3,29
T50OH-M77-CAS-B 06	50,16	137,73	3,18
T50OH-M77-CAS-B 07	50,10	138,37	3,19
T50OH-M77-CAS-B 08	50,12	137,82	3,20
T50OH-M77-CAS-B 09	50,15	137,77	3,24
T50OH-M77-CAS-B 10	50,05	137,04	3,26

Tabella 3.7: dimensioni campioni T50OH-M77-CAS-B 01-10.

Note le dimensioni dei campioni sono state effettuate le prove di trazione con l'utilizzo della macchina Instron 5985 ed il supporto di estensometri per la misurazione del modulo elastico. In particolare, è stato utilizzato un estensometro biassiale (Instron W-E402B) nel caso di campioni TOH-M77-CAS e, a causa della larghezza eccessiva, un estensometro monoassiale (Instron Dynamic Extensometer) per i campioni T50OH-M77-CAS-A e T50OH-M77-CAS.B.

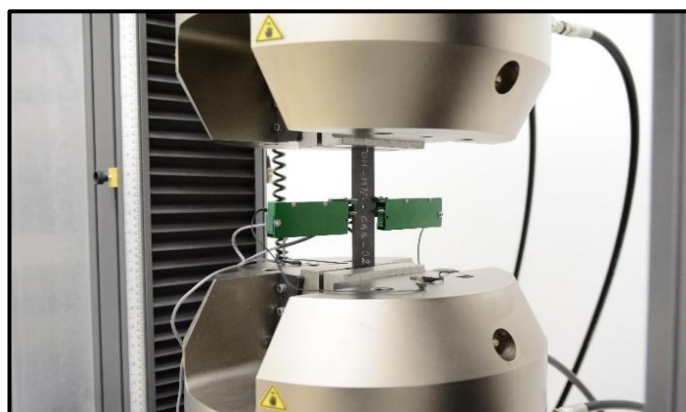


Figura 3.38: campione TOH-M77-CAS 02 con estensometro biassiale per il calcolo del modulo elastico.

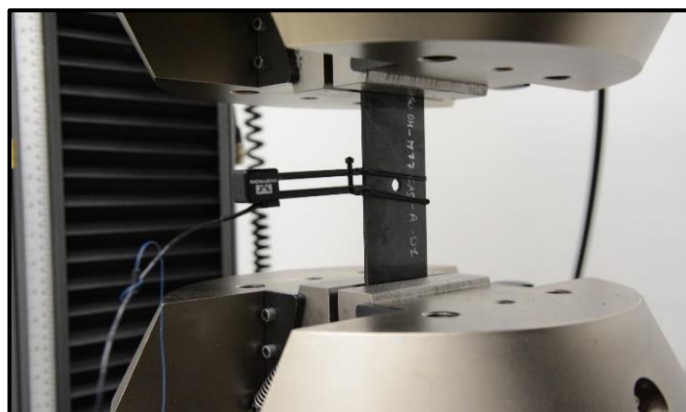


Figura 3.39: campione T50OH-M77-CAS-A 01 con estensometro monoassiale per il calcolo del modulo elastico.

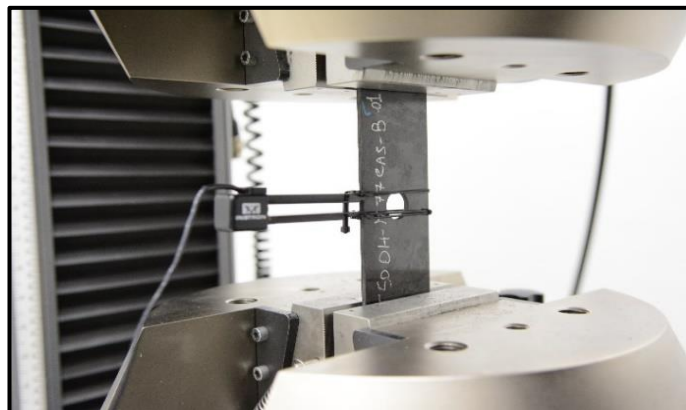


Figura 3.40: campione T500H-M77-CAS-B 01 con estensometro monoassiale per il calcolo del modulo elastico.

3.5.2 Prove di compressione (modulo e resistenza)

Questa prova serve a misurare la capacità di un materiale di resistere a sollecitazioni di compressione. Consiste nel sottoporre ad una forza di compressione crescente un provino di geometria definita valutandone il comportamento.

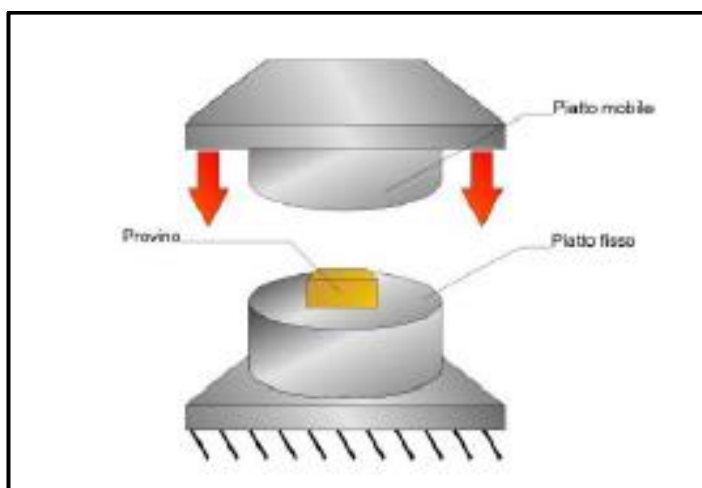


Figura 3.41 ^[12]: schematizzazione di un test di compressione.

La macchina utilizzata per effettuare i test di compressione è la Instron 5895 in cui, a differenza dei test di trazione, le celle di carico sono state sostituite da piatti di compressione: uno fisso ed uno mobile (Figura 3.41)

Anche per il test di compressione l'output dalla macchina di carico è risultato la curva sforzo-deformazione con le stesse considerazioni fatte nel Paragrafo 3.6.1 per le prove di trazione (Figura 3.12).

I test sono stati condotti in accordo con la normativa di riferimento valida nel caso di materiali polimerici, la SACMA SRM 1R-94 ('Recommended Test Method for Compressive Properties of Oriented Fiber-Resin Composites').

Sono stati effettuati due tipi di test a compressione:

1. *Compression Modulus*: test non distruttivo per la valutazione del modulo elastico a compressione;
2. *Compression Strength*: test distruttivo per la valutazione della resistenza a compressione;

In entrambe le modalità è stato utilizzato un dispositivo antibuckling al fine di evitare fenomeni flessionali sui campioni che avrebbero potuto influenzare i risultati.

I campioni sono stati codificati nel seguente modo:

- *CM-M77-CAS 01*: CM indica il tipo di test (*Compression Modulus*), M77 identifica il materiale, CAS il laureando e 01 il numero progressivo del campione;
- *CS-M77-CAS 01*: CS indica il tipo di test (*Compression Strength*), M77 identifica il materiale, CAS il laureando e 01 il numero progressivo del campione.

I campioni sono stati ricavati da una piastra del tipo in *Figura 3.42*:



Figura 3.42: piastra con campioni *CM-M77-CAS* e *CS-M77-CAS*.

Compression Modulus

I test *Compression Modulus* sono stati condotti su provini senza tabs incollate. I campioni sono stati ricavati dalla piastra tramite l'ausilio della macchina water-jet e successivamente estratti (*Figura 3.43*):



Figura 3.43: campioni *CM-M77-CAS 01-10* per test *compression modulus*.

Come già esposto in precedenza è stato previsto l'utilizzo di un dispositivo anti-buckling (*Figura 3.44*).

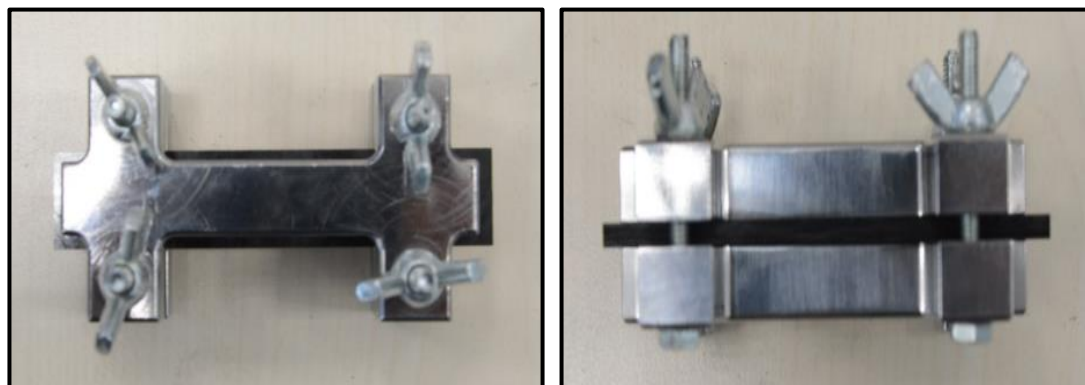


Figura 3.44: dispositivo antibuckling montato su campione.

Una volta ricavati i campioni sono stati misurati: la larghezza e la lunghezza tramite un calibro mentre lo spessore tramite un micrometro. I dati ottenuti sono riassunti in *Tabella 3.8*:

<i>ID provino</i>	<i>Larghezza [mm]</i>	<i>Lunghezza utile [mm]</i>	<i>Spessore [mm]</i>
CM-M77-CAS 01	15,06	79,96	3,050
CM-M77-CAS 02	15,07	79,97	3,054
CM-M77-CAS 03	15,07	79,94	3,082
CM-M77-CAS 04	15,08	79,94	3,092
CM-M77-CAS 05	15,07	79,97	3,071
CM-M77-CAS 06	15,08	79,94	3,079
CM-M77-CAS 07	15,08	79,98	3,081
CM-M77-CAS 08	15,09	79,98	3,081
CM-M77-CAS 09	15,04	79,97	3,079
CM-M77-CAS 10	15,06	79,94	3,075

Tabella 3.8: dimensioni campioni CS-M77-CAS 01-10.

Per misurare in modo preciso il modulo elastico è stato utilizzato un estensometro monoassiale (Instron Dynamic Extensometer) del tipo illustrato in *Figura 3.45*:

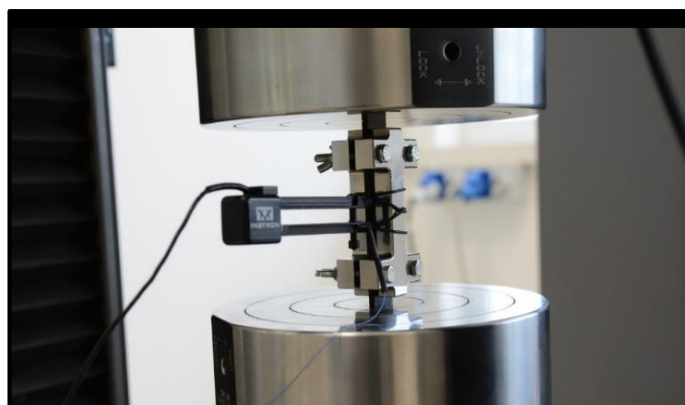


Figura 3.45: campione CM-M77-CAS con estensometro monoassiale per il calcolo del modulo elastico.

Compression Strength

I test Compression Strength sono stati condotti su campioni muniti di tabs. Le tabs utilizzate ed il loro processo di incollaggio ha seguito la stessa procedura descritta nelle prove di trazione. Esse sono state utilizzate per favorire la rottura nella zona centrale dei campioni. Una volta estratti dalla piastra ed incollate le tabs in provini si presentavano come in *Figura 3.46*:

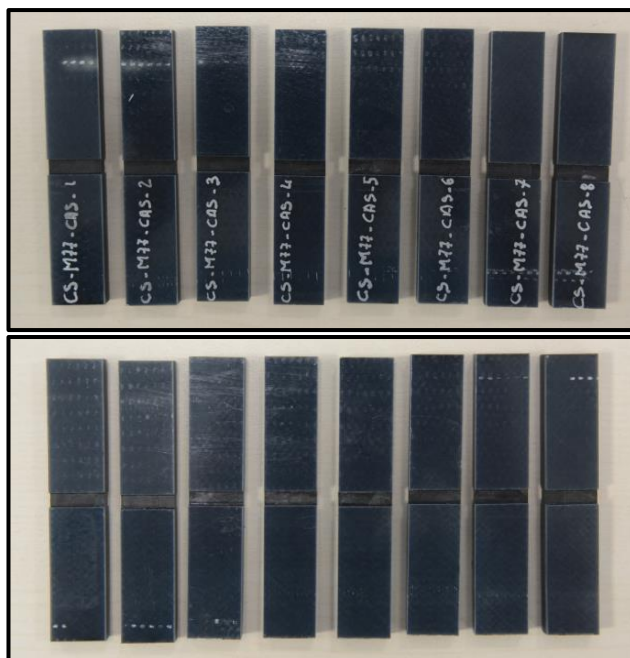


Figura 3.46: campioni CS-M77-CAS 01-08 per test compression strength.

Una volta estratti e preparati, i campioni sono stati misurati tramite l'utilizzo di un calibro per la larghezza e la lunghezza utile e di un micrometro per lo spessore. I dati raccolti sono presentati in *Tabella 3.9*:

<i>ID provino</i>	<i>Larghezza [mm]</i>	<i>Lunghezza utile [mm]</i>	<i>Spessore [mm]</i>
CS-M77-CAS 01	15,31	4,27	3,12
CS-M77-CAS 02	14,99	4,31	3,14
CS-M77-CAS 03	15,31	4,32	3,15
CS-M77-CAS 04	14,89	4,33	3,14
CS-M77-CAS 05	15,26	4,33	3,14
CS-M77-CAS 06	14,74	4,40	3,16
CS-M77-CAS 07	15,13	4,42	3,15
CS-M77-CAS 08	15,09	4,46	3,17

Tabella 3.9: dimensioni campioni CS-M77-CAS 01-08.

Non essendo richiesta la misurazione del modulo elastico non è stato previsto l'utilizzo di un estensometro mentre, anche in questo caso, è stato utilizzato un dispositivo anti-buckling (*Figura 3.47*):

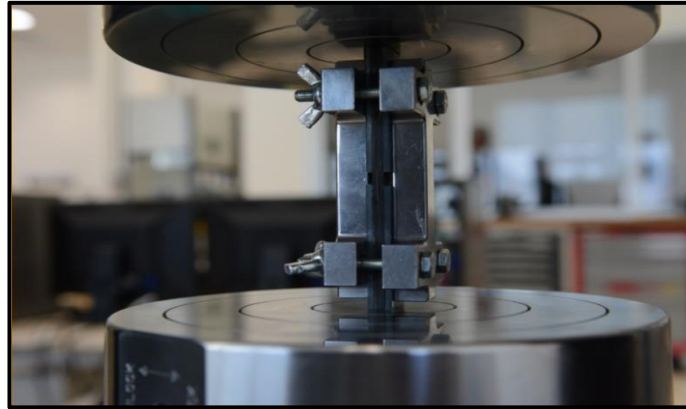


Figura 3.47: campione CS-M77-CAS in macchina con dispositivo anti-buckling.

3.6 Test dinamici

In questa esperienza sono state effettuate delle prove di fatica, già ampiamente descritta nel *Capitolo 1*, allo scopo di verificare le proprietà del materiale sottoposto a sollecitazioni cicliche. In particolare è stato analizzato l'andamento della rigidità durante il test dinamico oltre che ricavata la curva di Wohler.

3.6.1 Prove di fatica

Standard

La prova di fatica è un test eseguito su materiali per verificarne e caratterizzarne le proprietà rispetto alle sollecitazioni dinamiche. La macchina di prova utilizzata è stata la Instron 8801 (*Figura 3.48*):



Figura 3.48: strumentazione per test a fatica Instron 8801.

I test sono stati condotti in accordo con la normativa di riferimento ASTM D 3479 (‘‘Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials’’) utilizzando un rapporto di carico $R=0,1$ ed una frequenza di carico pari a 5 Hz.

I campioni sono stati codificati nel seguente modo:

- *F-M77-CAS 01*: F indica il tipo di test (*Fatigue*), M77 identifica il materiale, CAS il laureando e 01 il numero progressivo dei campioni.

Essi sono stati ricavati da piastre del tipo utilizzate per i test statici tramite taglio waterjet.



Figura 3.49: campioni *F-M77-CAS 01-09* ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

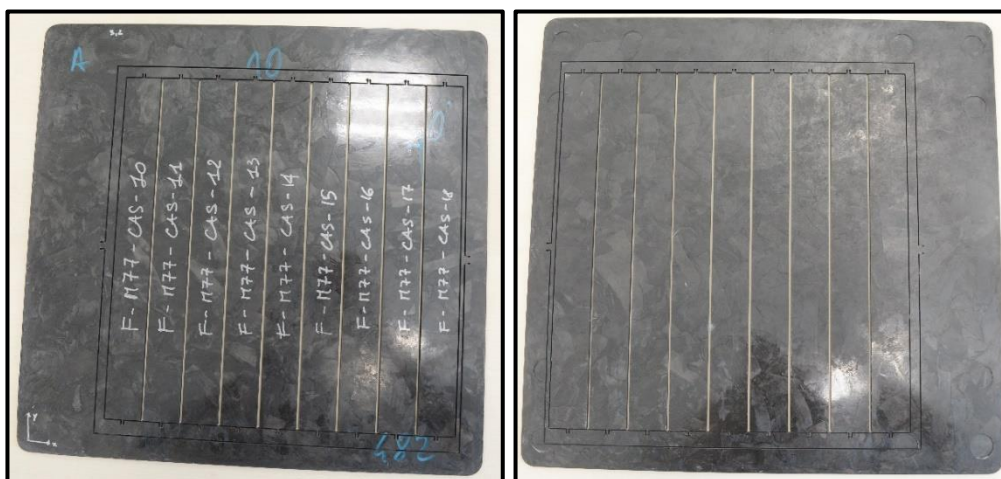


Figura 3.50: campioni *F-M77-CAS 10-18* ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.



Figura 3.51: campioni F-M77-CAS 19-27 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

La preparazione dei campioni per i test a fatica, compreso l'incollaggio delle tabs in fibra di vetro tramite cianoacrilato, è stata la stessa di quelli per i test a trazione. Il risultato di questa operazione si traduce nelle foto seguenti:

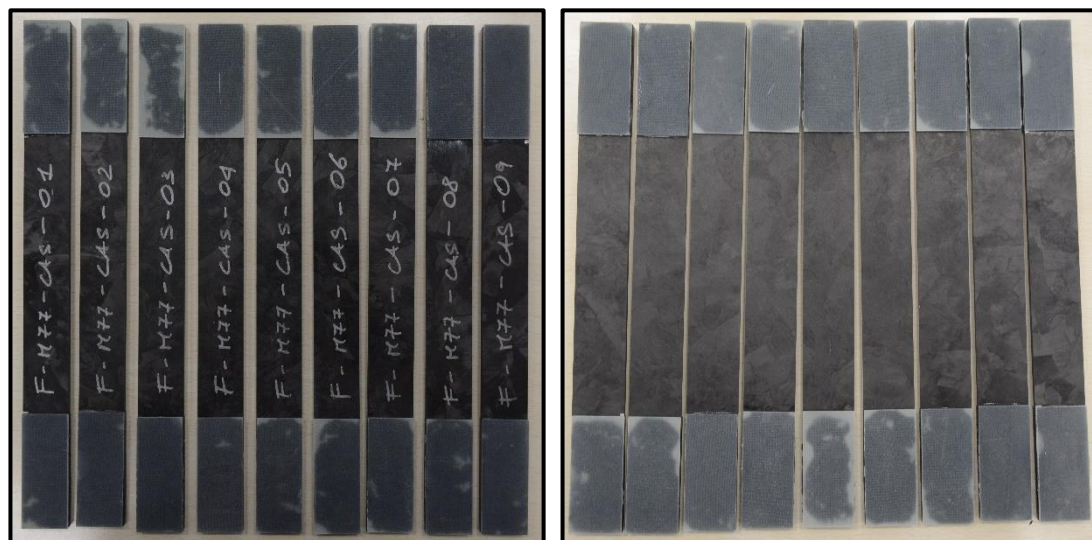


Figura 3.52: campioni F-M77-CAS 01-09 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

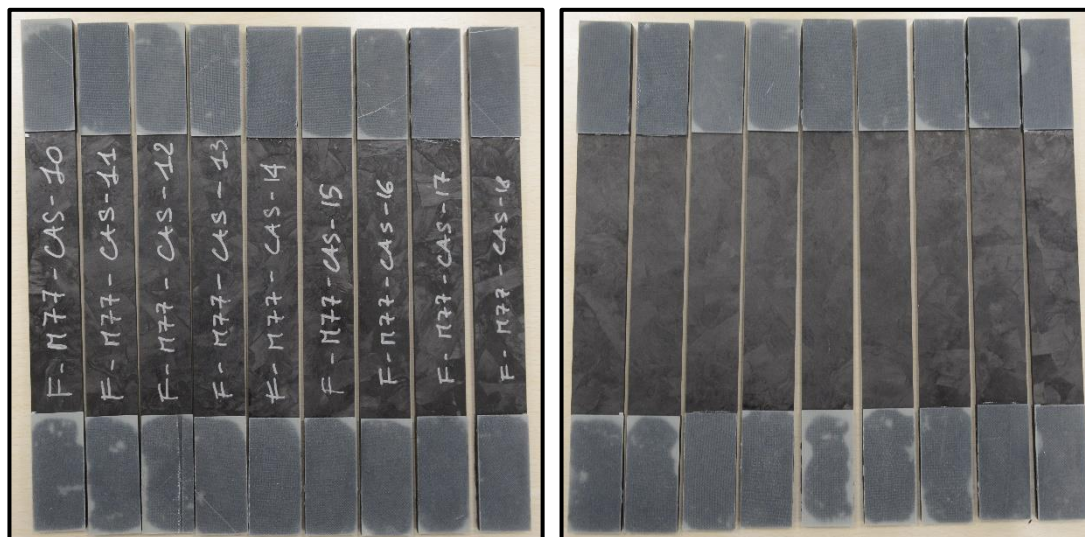


Figura 3.53: campioni F-M77-CAS 10-18 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

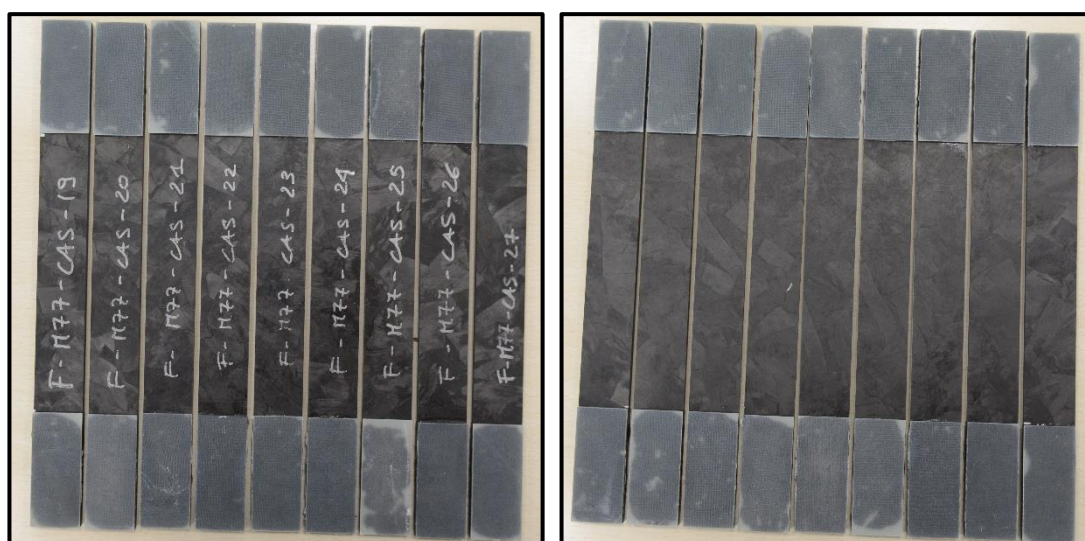


Figura 3.54: campioni F-M77-CAS 19-27 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

Una volta preparati ed incollate le tabs i campioni sono stati misurati: la lunghezza utile e la larghezza tramite l'ausilio di un calibro mentre lo spessore tramite un micrometro (*Tabella 3.10*).

<i>ID provino</i>	<i>Larghezza [mm]</i>	<i>Lunghezza libera [mm]</i>	<i>Spessore [mm]</i>
F-M77-CAS 01	25,02	137,76	3,026
F-M77-CAS 02	25,01	137,77	3,028
F-M77-CAS 03	25,03	137,84	3,025
F-M77-CAS 04	25,02	137,99	3,030
F-M77-CAS 05	25,04	137,92	3,033
F-M77-CAS 06	25,04	137,85	3,048
F-M77-CAS 07	25,05	137,60	3,052
F-M77-CAS 08	25,05	137,85	3,048
F-M77-CAS 09	25,05	137,74	3,069
F-M77-CAS 10	25,05	137,83	3,037
F-M77-CAS 11	25,01	137,74	3,047
F-M77-CAS 12	25,04	137,74	3,047
F-M77-CAS 13	25,09	137,79	3,049
F-M77-CAS 14	25,08	137,83	3,050
F-M77-CAS 15	25,04	137,92	3,078
F-M77-CAS 16	25,01	137,93	3,084
F-M77-CAS 17	25,06	137,65	3,084
F-M77-CAS 18	25,08	137,73	3,100
F-M77-CAS 19	25,05	137,92	3,037
F-M77-CAS 20	25,04	137,74	3,038
F-M77-CAS 21	25,05	137,88	3,037
F-M77-CAS 22	25,06	137,88	3,026
F-M77-CAS 23	25,03	137,96	3,032
F-M77-CAS 24	25,05	137,88	3,032
F-M77-CAS 25	25,04	137,75	3,034
F-M77-CAS 26	25,03	137,90	3,019
F-M77-CAS 27	25,06	137,60	3,036

Tabella 3.10: dimensioni campioni F-M77-CAS 01-27.

Di seguito viene proposto, in *Figura 3.55*, un esempio di campione F-M77-CAS durante l'esecuzione del test.



Figura 3.55: campione F-M77-CAS durante l'esecuzione del test.

Durante le prove di fatica non è stato possibile utilizzare un'estensometro, quindi l'andamento della rigidità è stato valutato tenendo come riferimento la corsa della traversa. I motivi principali

che hanno portato a non utilizzare l'estensometro sono stati la sua instabilità durante le prove (alta probabilità di avere dati falsati) e l'ampia durata di quest'ultime.

Con Termografia

Le prove di fatica con il supporto della termografia sono state condotte allo stesso modo di quelle standard mantenendo come parametri di prova un rapporto di carico $R=0,1$ ed una frequenza di carico di 5 Hz. A differenza della metodologia standard la strumentazione di prova ha previsto l'utilizzo di una termocamera, la FLIR DES X6540sc con risoluzione IR 640x512, sensibilità termica $< 25\text{mK}$ (tipicamente 18 mK) e precisione di misura della temperatura di $\pm 1^\circ\text{C}$. Il set-up di prova è illustrato in *Figura 3.56*.

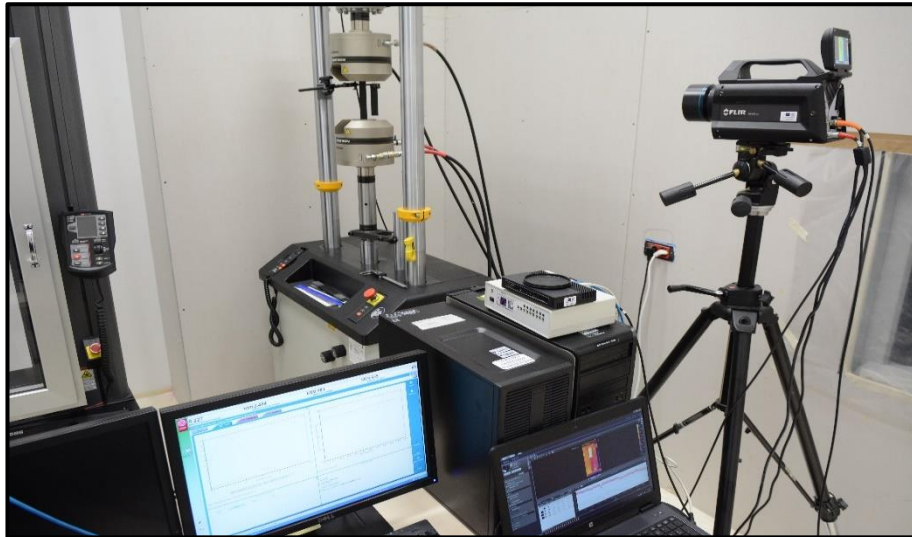


Figura 3.56: strumentazione utilizzata per le prove di fatica con supporto della termografia.

Il software utilizzato per monitorare la temperatura superficiale del campione durante le prove è stato il Flir Research mentre per l'analisi dei dati è stato utilizzato il software IRTA (*Figura 3.57*).

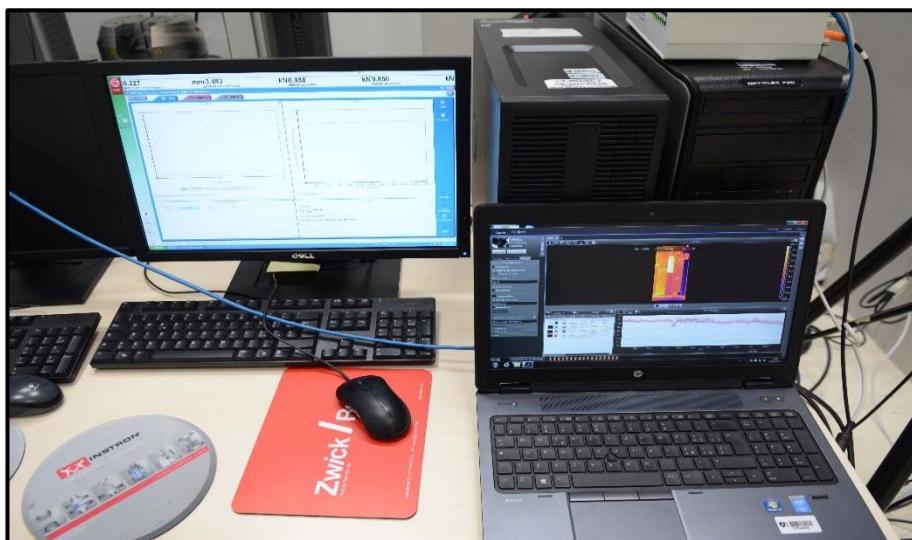


Figura 3.57: strumentazione software per monitoraggio della prova di fatica (computer a sinistra) e della temperatura del campione (computer a destra).

Per depurare i dati dalla possibile variazione di temperatura dell'ambiente è stato installato un campione di riferimento non sollecitato di fianco a quello in prova (Figura 3.58).



Figura 3.58: campione in prova e dispositivo di supporto per il campione di riferimento.

Gli strumenti a disposizione hanno permesso l'analisi superficiale della temperatura di una sola faccia del campione.

I campioni sono stati ricavati da piastre del tipo illustrato nel *paragrafo 3.1* tramite taglio waterjet. La codifica dei campioni è stata analoga a quella utilizzata per le prove di fatica senza termografia mantenendo la progressività nel numero (da F-M77-CAS 28 in poi).

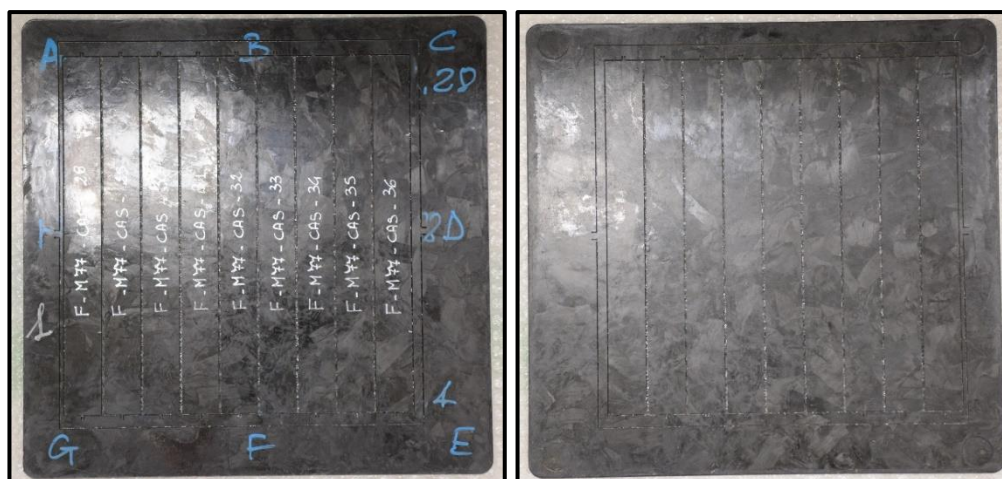


Figura 3.59: campioni F-M77-CAS 28-36 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

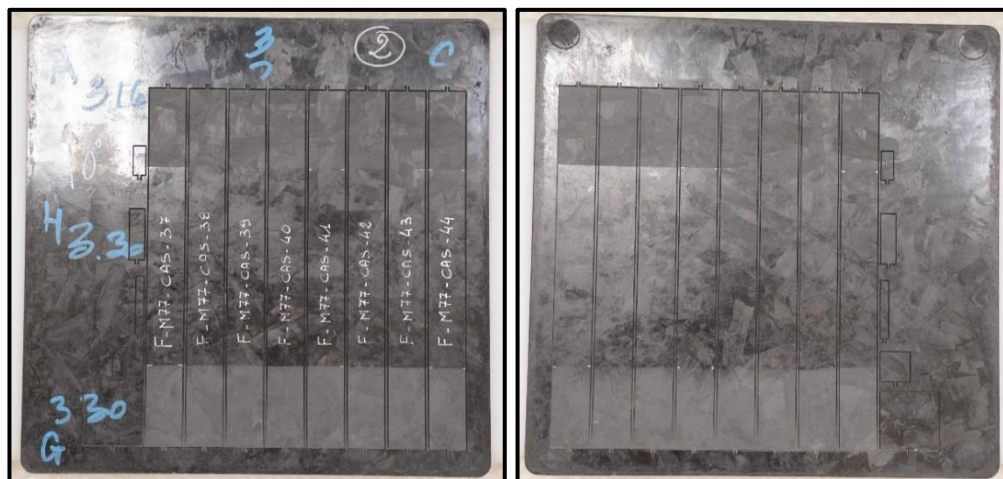


Figura 3.60: campioni F-M77-CAS 37-44 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

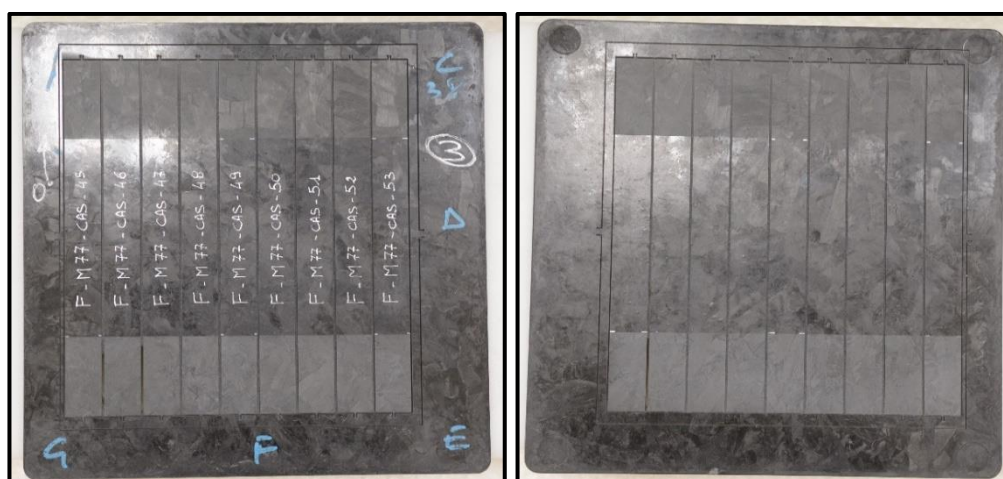


Figura 3.61: campioni F-M77-CAS 45-53 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

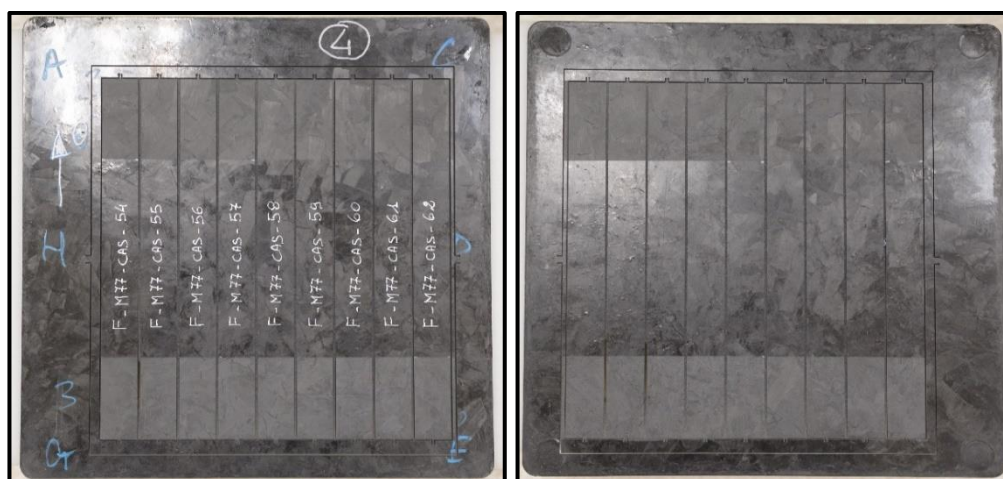


Figura 3.62: campioni F-M77-CAS 54-62 ricavati tramite taglio waterjet dalla piastra con e senza codifica.

La preparazione dei campioni ha seguito le stesse considerazioni fatte per la trazione e la fatica senza termografia.

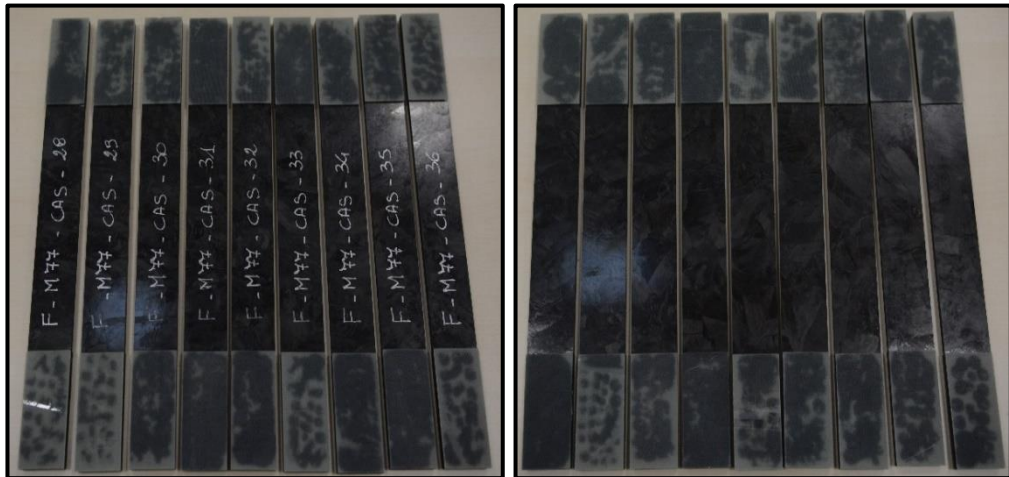


Figura 3.63: campioni F-M77-CAS 28-36 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

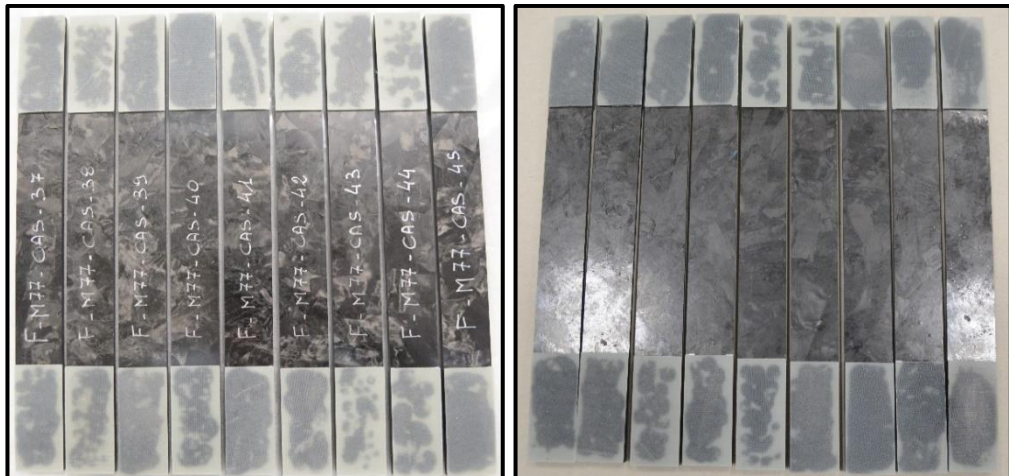


Figura 3.64: campioni F-M77-CAS 37-45 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

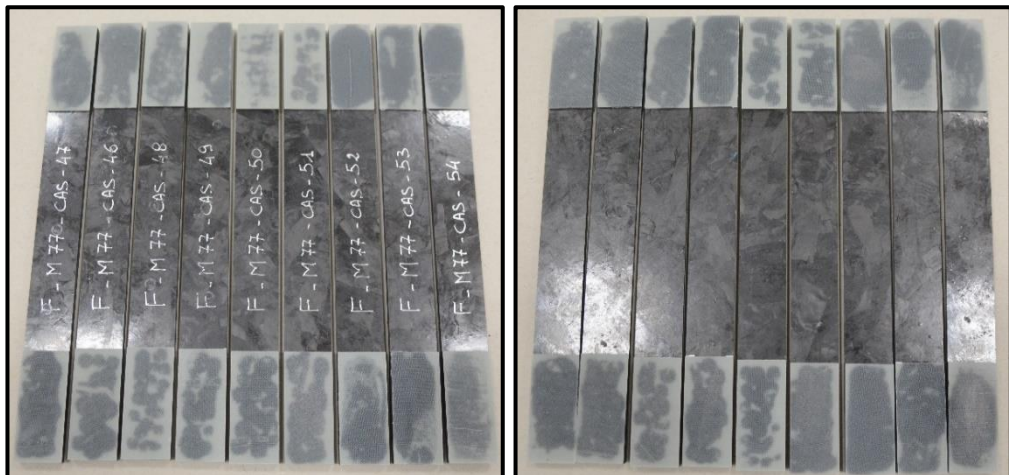


Figura 3.65: campioni F-M77-CAS 46-54 e tabs incollate con cianoacrilato prima dei test.

Una volta preparati ed incollate le tabs i campioni sono stati misurati: la lunghezza utile e la larghezza tramite l'ausilio di un calibro mentre lo spessore tramite un micrometro (*Tabella 3.11*).

<i>ID provino</i>	<i>Larghezza [mm]</i>	<i>Lunghezza libera [mm]</i>	<i>Spessore [mm]</i>
F-M77-CAS 28	25,04	138,13	3,091
F-M77-CAS 29	24,99	138,21	3,123
F-M77-CAS 30	25,08	138,10	3,151
F-M77-CAS 31	25,01	137,92	3,160
F-M77-CAS 32	25,02	138,18	3,172
F-M77-CAS 33	25,03	138,19	3,205
F-M77-CAS 34	25,01	138,02	3,230
F-M77-CAS 35	25,06	138,02	3,275
F-M77-CAS 36	25,00	138,19	3,314
F-M77-CAS 37	25,04	138,21	3,174
F-M77-CAS 38	25,05	138,22	3,170
F-M77-CAS 39	25,04	138,24	3,177
F-M77-CAS 40	25,00	137,93	3,196
F-M77-CAS 41	25,07	138,01	3,231
F-M77-CAS 42	25,05	138,12	3,253
F-M77-CAS 43	25,02	138,09	3,274
F-M77-CAS 44	25,08	138,18	3,279
F-M77-CAS 45	25,07	137,73	3,124
F-M77-CAS 46	25,03	138,06	3,152
F-M77-CAS 47	25,03	138,02	3,160
F-M77-CAS 48	25,03	138,27	3,157
F-M77-CAS 49	24,97	138,11	3,171
F-M77-CAS 50	25,04	138,15	3,213

Tabella 3.11: dimensioni campioni F-M77-CAS 28-50.

Una volta misurati, la faccia dei campioni opposta a quella della codifica è stata verniciata di nero (*Figura 3.65*) in modo da avere un valore di riferimento dell'emissività, necessaria per l'analisi dei dati termografici da parte del software.



Figura 3.65: superficie del campione analizzata con termografia verniciata di nero durante la prova.

4. Limite di fatica tramite analisi termografica

4.1 Analisi termoelastica TSA

L'analisi termoelastica dello stress (TSA) si basa sul principio delle misure termoelastiche. Risulta noto il fenomeno fisico per cui un gas sottoposto a compressione aumenta la propria temperatura, mentre se espanso essa diminuisce. Qualcosa di analogo avviene, in maniera molto più limitata, in termini di variazione di temperatura, anche per i solidi. Il fenomeno descritto trova validità nei casi in cui si opera in condizioni di processo adiabatiche, ma nel caso di un solido è difficile impedire al calore di diffondere in zone contigue al punto in cui esso è generato. Diviene quindi particolarmente importante il ruolo del materiale, della frequenza di applicazione del carico e della tipologia di sforzo presente nel componente in prova. L'analisi termoelastica delle tensioni è basata su queste considerazioni e viene descritta dall'equazione fondamentale di Darken e Curry che ne descrive l'effetto:

$$\frac{\delta T}{T} = -K_0 \cdot \delta \sigma \quad (1)$$

dove T è la temperatura assoluta, $\sigma = (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})$ è il principale invariante delle tensioni (cioè la somma delle tensioni principali) e K_0 è la costante termoelastica:

$$K_0 = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \quad (2)$$

con α coefficiente di dilatazione termica, ρ densità di massa e c_p calore specifico a pressione costante.

L'effetto termoelastico correla le variazioni di temperatura unicamente al primo invariante delle tensioni, a sua volta responsabile della variazione di volume dell'elemento considerato.

Considerando il fenomeno della conduzione del calore in un solido, descritto dall'equazione di Fourier:

$$\rho c_v \frac{\delta T}{\delta t} = k \nabla^2 T + q \quad (3)$$

in cui c_v è il calore specifico a volume costante, t è il tempo, k la conduttività termica e q una fonte di calore interna per unità di volume, risulta ben evidente che in condizioni di adiabaticità si ottiene l'annullamento del termine $\nabla^2 T$. Di conseguenza, introducendo l'equazione (1) relativa all'incremento di temperatura in (3), si ottiene l'equazione per q :

$$q = -\rho c_v K_0 T_0 \frac{\delta \sigma}{\delta t} \quad (4)$$

dove T_0 è la temperatura ambiente.

Si evince quindi come la variazione delle tensioni nel tempo, dovuta all'effetto termoelastico, crei una sorgente periodica di calore che è responsabile delle variazioni locali di temperatura. Nel caso in cui viene applicato un carico esterno in maniera ciclica, tipicamente sinusoidale nel caso di prove di fatica, il calore prodotto da ogni sorgente puntiforme varierà anch'esso sinusoidalmente

nel tempo, e si propagherà nel materiale per mezzo di onde termiche caratterizzate da una velocità di diffusione finita. La grandezza fisica definita come

$$\mu = \sqrt{\frac{2\chi}{\omega}} \quad (5)$$

-dove $\chi=k/\rho c_p$ è la diffusività termica del materiale e $\omega=2\pi\nu$ è la pulsazione di applicazione del carico- è la lunghezza di diffusione termica che caratterizza il fenomeno. In particolare le onde che diffondono nel materiale sono attenuate e la temperatura risultante sulla superficie di un componente in prova è il risultato della somma di più funzioni sinusoidali, ognuna con un ritardo crescente con la distanza del punto in esame.

Risulta chiaramente visibile dalla (5) come la frequenza sia l'unico parametro variabile. Per basse frequenze il punto in esame è influenzato da sorgenti molto lontane e il segnale generato giunge con notevole ritardo dovuto alla elevata distanza, evidenziando così un segnale risultante sfasato. Al contrario, per alte frequenze, la temperatura in ogni punto è influenzata solamente da quanto accade nel punto stesso e i segnali provenienti dalle sorgenti limitrofe non influiscono su quello risultante che quindi non presenterà nessuno sfasamento.

L'applicazione dell'analisi termoelastica a componenti in materiale composito risulta particolarmente complicata a causa dell'ortotropia del materiale, che determina valori della costante termoelastica dipendenti dall'orientazione delle fibre. Un'ulteriore difficoltà viene individuata nella stratificazione delle lamine del materiale, che evidenzia un comportamento variabile in funzione della profondità dalla superficie e che implica dunque costanti termoelastiche che si modificano con la frequenza di applicazione del carico. Utilizzando un modello analitico bistrato è risultato possibile interpretare dati di prove sperimentali, proponendo quindi una giustificazione circa la dipendenza dalla frequenza delle costanti termoelastiche misurate. E' stato dimostrato come, per un utilizzo pratico della tecnica termoelastica ai fini dell'analisi delle sollecitazioni, sia necessario ricavare le costanti calibrate alla frequenza corretta di prova. I dati sperimentali a disposizione hanno evidenziato come sussista un generale andamento decrescente del valore delle costanti termoelastiche all'aumentare della frequenza: infatti è stato dimostrato come le costanti teoriche non tengano conto dell'influenza della resina superficiale che varia con la frequenza del carico di sollecitazione. Tale fenomeno è stato così interpretato: al crescere della frequenza, la temperatura superficiale viene sempre meno influenzata dalle onde termiche generate in profondità, incrementando così il contributo della risposta termoelastica generata dalla sola resina (*Figura 4.1*)

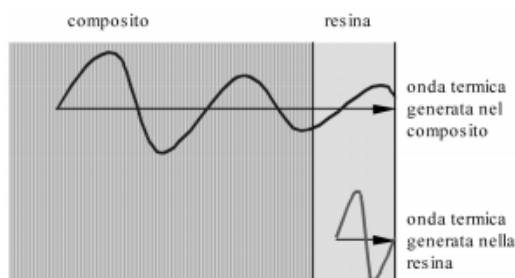


Figura 4.1 ^[12]: *propagazione delle onde termiche attraverso lo strato di resina superficiale.*

E' stato dimostrato dunque che, per rendere più efficace e flessibile l'impiego dell'analisi termoelastica su componenti in materiale composito, risulta indispensabile calibrare le costanti termoelastiche a diverse frequenze di sollecitazione o in alternativa si devono rendere necessari l'utilizzo di modelli analitici in grado di estendere a diverse frequenze i dati sperimentali di calibrazione ottenuti ad una sola frequenza.

Di solito, il set-up tipico usato per i test di fatica è utilizzabile per compiere anche analisi termoelastiche di stress (TSA), come in questo caso. Perciò, applicando un carico ciclico al componente meccanico e misurando l'andamento temporale della temperatura sulla superficie di quest'ultimo, è possibile ottenere una mappa proporzionale alla fluttuazione nel tempo del primo invariante di tensione. Questa tipologia di misura può essere compiuta con l'ausilio di una termocamera (paragrafo 4.2) senza contatto sulla superficie del materiale. Una schematizzazione del set-up tipico di prova viene illustrata in *Figura 4.2* (il reale set-up utilizzato è illustrato in *Figura 3.56* – Capitolo 3).

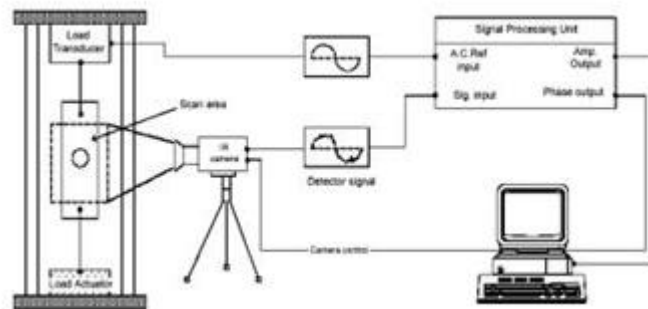


Figura 4.2 ^[12]: schematizzazione set-up di prova TSA.

Talvolta, per individuare le variazioni temporali di temperatura dal segnale di ogni pixel della termocamera, visto l'alto livello di disturbo spesso presente, è necessario processare i dati ottenuti utilizzando la tecnica Lock-in, prendendo come riferimento il segnale della cella di carico. In questo caso, la tecnica Lock-in non è stata impiegata e per ovviare al problema del disturbo, rispetto alle misure di temperatura, è stato posto di fianco al campione in prova un riferimento, allo scopo di depurare i dati dall'influenza dell'ambiente esterno (*Figura 4.3*).



Figura 4.3: campione in prova e riferimento non sollecitato.

4.2 Le termocamere

Una termocamera ad infrarossi è un dispositivo senza contatto che rileva l'energia all'infrarosso (calore) emessa da un oggetto e la converte in un segnale elettronico che viene successivamente elaborato per produrre un'immagine termica su un display ed eseguire i calcoli di temperatura. Il calore rilevato da una termocamera può essere quantificato in modo estremamente preciso, permettendo non solo di monitorare l'andamento termico ma anche di identificare e valutare la gravità relativa ai problemi legati al calore. La termocamera è quindi una particolare telecamera, sensibile alla radiazione infrarossa, capace di ottenere immagini o riprese termografiche.

A partire dalla radiazione rilevata si ottengono dunque delle mappe di temperatura delle superfici esposte. Le termocamere si dividono in radiometriche e non radiometriche. Le prime consentono di misurare il valore di temperatura assoluto di ogni punto dell'immagine. L'immagine, infatti, è costruita su una matrice di un certo numero di pixel per un certo numero di righe. L'elettronica dello strumento legge velocemente il valore di energia immagazzinata da ogni singolo pixel e genera un'immagine, in bianco e nero o in falsi colori, dell'oggetto osservato.

Tra le caratteristiche che distinguono tra loro le termocamere vi è il campo spettrale:

- VIR: infrarosso vicino al visibile;
- SW: infrarosso onda corta;
- MW: infrarosso medio;
- LW: infrarosso lontano;
- XLW: infrarosso verso microonde.

Un'altra caratteristica che differenzia le termocamere è il tipo di sensore. Per applicazioni comuni è attualmente utilizzato un sensore di tipo microbolometrico a matrice piana ma esistono sensori a maggiori prestazioni a cella singola (scansione meccanica) o a matrice di punti. I sensori possono essere sia non raffreddati che raffreddati (in genere con celle peltier o pompa stirling). Quelli raffreddati sono utilizzati principalmente per applicazioni di ricerca e sviluppo e hanno una sensibilità superiore rispetto ai microbolometrici non raffreddati. Il materiale che costituisce il sensore influenza la sensibilità termica della termocamera: quelli più comuni sono o in silicio amorfo o in ossido di vanadio, che ha prestazioni e tempo di vita medio superiore.

In funzione dell'applicazione sono disponibili termocamere con caratteristiche differenti in termini di frequenza di acquisizione:

- Inferiore a 33 Hz: termocamere in grado di analizzare fenomeni statici e non adatte a misurazioni in ambito di manutenzione meccanica o di organi rotanti in movimento;
- Da 33 Hz a 60 Hz: termocamere per l'analisi di eventi brevi e rapidi;
- Da 60 Hz a 2 kHz: termocamere per analisi particolari come Lock-in o analisi di strutture.

La frequenza di acquisizione è un parametro fondamentale nell'utilizzo della termocamera: se si cerca di misurare la temperatura di un oggetto in movimento e lo strumento non ha una frequenza di acquisizione sufficiente, si ha un fenomeno di "smearing" sull'immagine che impedisce di avere una misura di temperatura accurata.

Inoltre, con le termocamere è possibile misurare la temperatura in ogni singolo punto dell'immagine ma bisogna inserire nello strumento (o nei software di elaborazione post processing) due parametri, emissività (0,95 in questo caso – vernice nera) e temperatura ambiente (o riflessa) che permettono di ottenere la temperatura corretta.

La termocamera utilizzata in questo lavoro di tesi è la FLIR X6540sc (Figura 4.4) della serie FLIR X6000sc.



Figura 4.4 ^[12]: termocamera FLIR X6540sc.

Le termocamere FLIR X6000sc offrono le prestazioni migliori in termini di acquisizione termica e di connettività più avanzate. Esse hanno tempi d'integrazione e frame rate adeguati ad acquisire dati in processi ad alta velocità che richiedono precisioni dell'ordine di microsecondi o a seguire fenomeni con rapide variazioni termiche. La versione X6540sc è dotata di sensori a antimoniuro di indio raffreddati in grado di rilevare differenze di temperatura inferiori a 25 mK, o di appena 1 mK utilizzando tecniche di analisi come la termografia Lock-In. La termocamera misura la temperatura con un'accuratezza di $\pm 1^\circ\text{C} / \pm 1\%$ in un ampio intervallo dinamico di temperature.

Queste termocamere producono immagini nitide 640 x 512 full frame fino a 355 Hz con il tempo di integrazione breve necessario per misurare accuratamente processi ad alta velocità. E' possibile visualizzare le immagini termiche direttamente sull'LCD touchscreen della termocamera in tempo reale (Figura 4.5).



Figura 4.5 ^[12]: elementi principali di connettività e lettura dati della termocamera FLIR X6540sc.

Il software di analisi e controllo utilizzato per l'elaborazione e la lettura dei dati in output dalla termocamera è stato il FLIR ResearchIR.

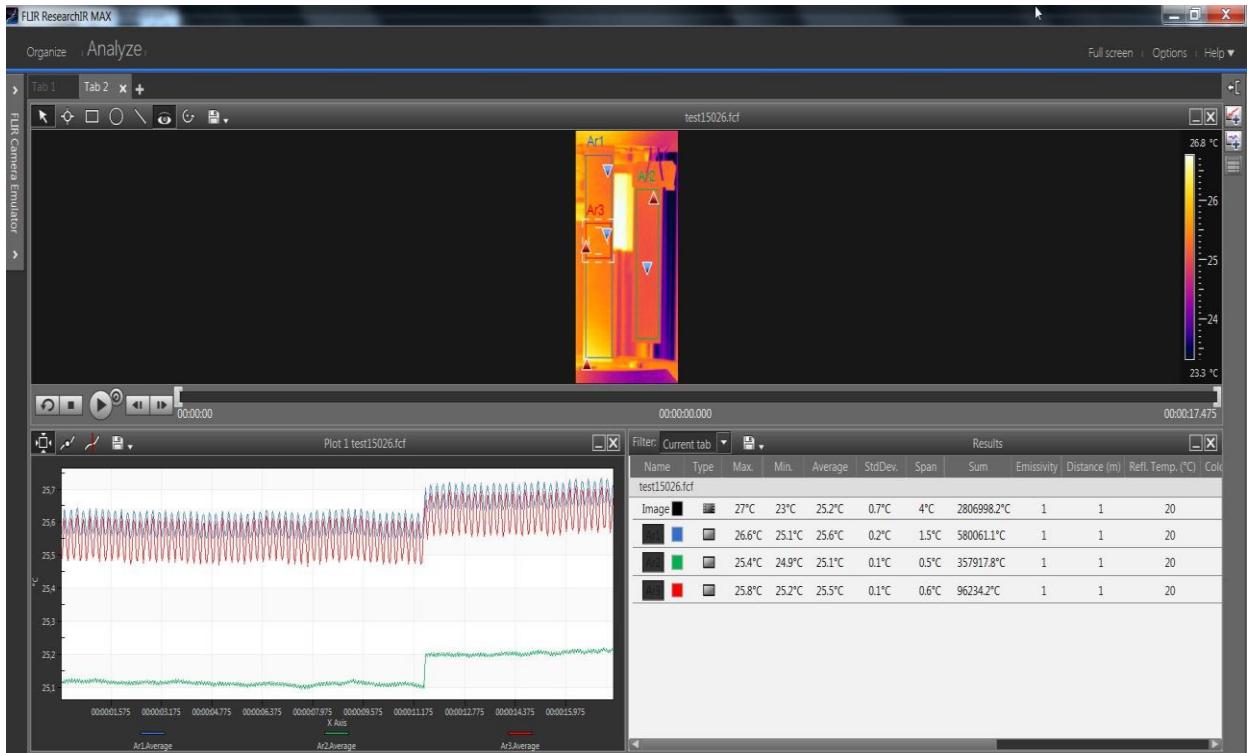


Figura 4.6: visualizzazione interfaccia del software di controllo ed analisi FLIR ResearchIR.

In Figura 4.6 è possibile visualizzare l'interfaccia al pc del software di controllo ed analisi FLIR ResearchIR. Tramite l'utilizzo di questo software è stato possibile sia elaborare i dati acquisiti in output dalla termocamera, sia visualizzare l'andamento della temperatura superficiale dei campioni durante le prove dinamiche in real time. La Figura 4.6 riporta l'esempio di elaborazione di un filmato acquisito mostrando il livello di temperatura medio nei vari box (aree verde, blu e rossa) di acquisizione definiti sui campioni (Figura 4.7).

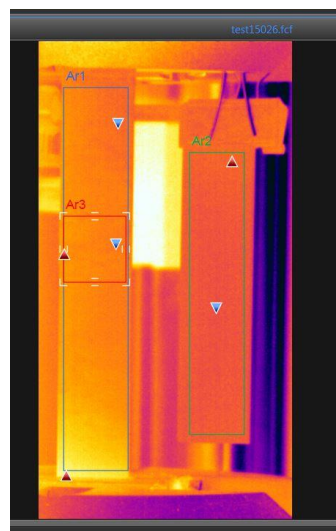


Figura 4.7: box di acquisizione definiti sui campioni per elaborazione dei dati tramite software.

E' stato inoltre utilizzato il MultiDES, ossia uno strumento che ha permesso di acquisire automaticamente con la termocamera: impostando inizialmente i tempi, il MultiDES ha permesso l'acquisizione tramite trigger esterni automatici.



Figura 4.7: MultiDES.

Un altro software tipicamente impiegato in questo tipo di analisi è IRTA. Esso viene però utilizzato soprattutto nel caso di analisi termografiche Lock-In, per cui non in questo caso.

4.3 Modello termografico per la valutazione del limite di fatica

I metodi utilizzati per caratterizzare un materiale a fatica, in generale, sono spesso influenzati da grande dispersione e difficoltà di applicazione, oltre che da lunghi tempi di prova dovuti all'elevato numero di campioni da analizzare. Il seguente paragrafo descrive un metodo, chiamato metodo Risitano, per l'analisi della mappa termica sulla superficie di campioni tramite l'utilizzo della termografia che permette di determinare il limite di fatica. E' noto che quando un materiale è soggetto a carico la sua temperatura vari. Nel caso in cui il carico applicato superi il limite di fatica l'aumento di temperatura risulta essere significativo. Da dati sperimentali, utilizzando un sistema di analisi delle immagini, è stato possibile evidenziare alcuni aspetti importanti, oggetti di ulteriori indagini:

- se la sollecitazione applicata è al di sotto del limite di fatica, l'aumento di temperatura ΔT , nella parte più calda della superficie esterna del campione, risulta estremamente limitato (praticamente nullo);
- se la sollecitazione applicata è superiore al limite di fatica, l'aumento di temperatura segue un andamento a tre fasi: una prima fase di crescita, una seconda di stabilizzazione ed una terza di rapido aumento prima della rottura. Questo comportamento si manifesta in molti materiali diversi;
- l'aumento di temperatura fino alla fase di stabilizzazione, e di conseguenza la temperatura di stabilizzazione risulta maggiore quanto più alta è la sollecitazione applicata;
- La durata della prima fase, in termini di numero di cicli, è molto variabile;
- La durata della seconda fase, in termini di numero di cicli, dipende dalla sollecitazione applicata: per carichi applicati vicino al valore di rottura la fase due risulta praticamente inesistente, mentre per carichi applicati poco superiori al limite di fatica si estende per la gran parte della vita a fatica;
- L'aumento di temperatura è superiore per frequenze di applicazione del carico più alte.

Una schematizzazione dell'andamento della temperatura in base al livello di sollecitazione applicato viene riportata in *Figura 4.8*:

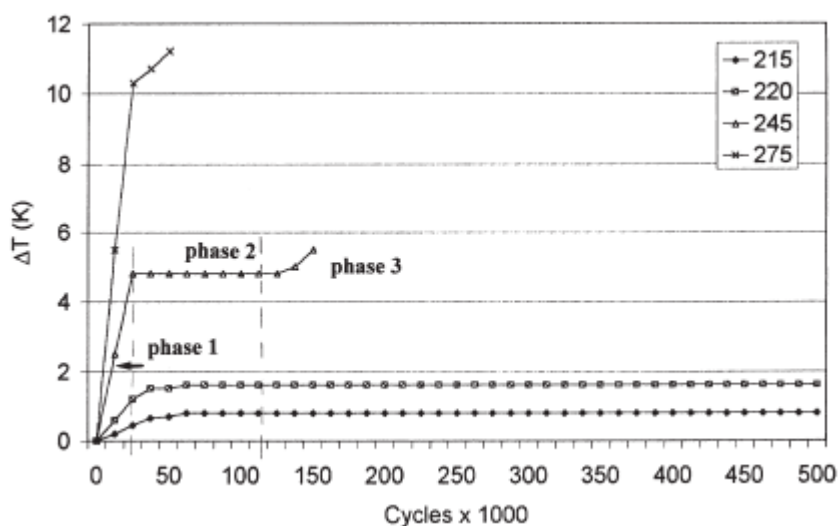


Figura 4.8 ^[1]: andamento del ΔT in base al livello di sollecitazione.

Sulla base di test eseguiti su alcuni tipi di materiali, come acciai e compositi, gli autori hanno proposto l'analisi termografica come metodo rapido per la determinazione del limite di fatica. Infatti, secondo il tipo di indagine adottata, il limite di fatica può essere definito, in modo macroscopico, come il valore di sollecitazione tale per cui l'aumento di temperatura, o il tasso medio di aumento di temperatura, su ogni punto della superficie del campione è praticamente pari a zero. Di conseguenza, è stato proposto che il limite di fatica può essere determinato attraverso grafici che relazionano l'incremento di temperatura ΔT con il carico applicato come intercetta della curva sull'asse x. Dalle prime applicazioni di questo metodo è emerso che il limite di fatica può essere determinato con un numero molto limitato di campioni o componenti meccanici. Infatti, la fase di stabilizzazione della temperatura viene raggiunta in breve tempo e può essere individuata dopo un numero contenuto di cicli. Da queste osservazioni si evince come lo stesso campione può essere quindi utilizzato per differenti livelli di carico. Questo è particolarmente vero quando il livello di carico applicato non è troppo vicino al carico di rottura, per cui la stabilizzazione praticamente non si manifesta.

A differenza degli altri, questo metodo non è distruttivo e nei casi in cui viene applicato permette un notevole risparmio sui costi. Teoricamente, risulta possibile ricavare il limite di fatica con un solo campione (di solito tre per avere maggiore affidabilità se la dispersione del dato è inferiore al 10%): in questo caso si limitano gli errori dovuti ad eventuali differenze tra provini diversi.

Dagli studi condotti, soprattutto nel caso di materiali metallici e compositi epoxy/vetro in fibra continua, è stato possibile rilevare come il limite di fatica ricavato tramite questo metodo non si discosti molto da quello ricavato tramite metodo tradizionale (Woehler), a conferma di una buona affidabilità del metodo. Per i compositi a fibra discontinua viene proposta in questo lavoro di tesi un'analisi nelle due metodologie allo scopo di generare un confronto. Con questo metodo è inoltre possibile prevedere la zona di frattura fin dall'inizio dei test, in modo da poter apportare alcune correzioni per migliorare la resistenza a fatica anche in fase di prototipazione.

Le immagini termiche, ottenute con l'ausilio di una termocamera in tempo reale, vengono convertite in matrici che esprimono il valore della temperatura istantanea di ogni punto sul campione. L'analisi della temperatura assoluta può portare ad informazioni non precise perché influenzata da disturbi legati alla riflessione termica, all'ambiente e alla trasmissione di calore da parte di elementi estranei (ad esempio i morsetti della macchina di carico), che richiederebbero l'accurata eliminazione delle cause di disturbo (camera adiabatica, inibizione della riflessione ecc.). Per limitare al massimo i disturbi esterni, in questo caso, è stato utilizzato un campione di riferimento non sollecitato allo scopo di depurare i dati in ogni istante dalle condizioni ambientali di laboratorio.

Dato il numero limitato di cicli necessari per ottenere i risultati, il danno cumulativo sul campione può essere considerato trascurabile. Test eseguiti su numerosi materiali hanno convalidato questa ipotesi, in modo che, teoricamente, l'intera sequenza di cicli potesse essere eseguita su un solo campione. Così è possibile risparmiare sia sul tempo di montaggio dei campioni sia sul costo degli stessi. I carichi possono dunque essere applicati in sequenza sullo stesso campione senza interruzioni, passando da un livello di carico inferiore ad uno successivo superiore. La temperatura mostra, pertanto, un andamento cumulativo del tipo riportato in *Figura 4.9*, con incrementi progressivi che, per ogni livello di carico, iniziano dalla temperatura raggiunta nello step precedente.

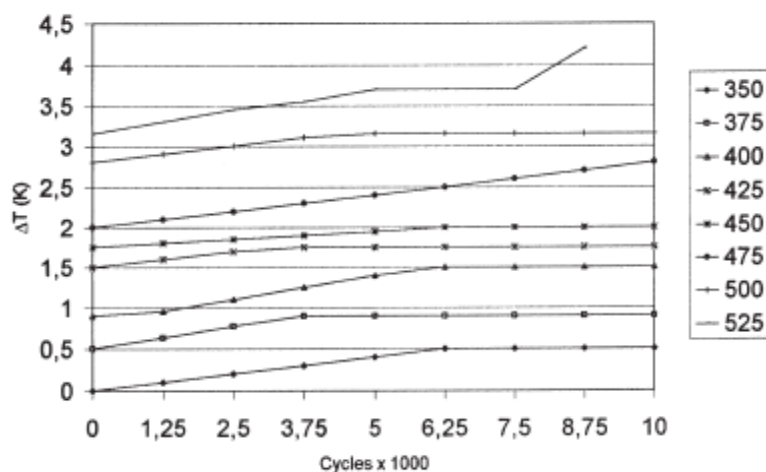


Figura 4.9 ^[1]: incrementi termici su un campione soggetto ad una prova di fatica con carico applicato crescente.

Per ottenere risultati soddisfacenti, senza conoscere l'ordine di grandezza del limite di fatica, è necessario conoscere almeno il carico di rottura (motivo ulteriore per cui è stata condotta anche una caratterizzazione statica del materiale). Da questo valore è possibile identificare una serie di carichi a gradino da applicare come percentuali del carico di rottura, ipotizzando almeno 5 step distinti. I carichi devono essere applicati in successione, dal valore più basso a quello più alto, al fine di ridurre al minimo il danno cumulativo e per semplicità di impostazione sul sistema di controllo delle prove. Il tempo assegnato a ciascun livello di carico deve essere limitato, ma abbastanza lungo per valutare la temperatura (il numero di cicli varia da 1000 a 10000 in base al tipo di materiale ma, in questo caso, è stato scelto un intervallo di 20000 cicli). Il passaggio al carico successivo può essere immediato o ritardato dalla necessità di programmarlo sulla macchina

di prova. E' importante fare riferimento ad una condizione 0 degli incrementi termici, definita come l'inizio del test e, in questo caso, tenuta sotto controllo ad ogni istante dal campione di riferimento non sollecitato. Chiaramente, è vitale che il campione non venga maneggiato durante la prova e che l'ambiente di prova non venga alterato. Inoltre, è preferibile mantenere gli stessi parametri di acquisizione e di calibrazione della misura. Il risultato di questo tipo di analisi è esposto in *Figura 4.10*:

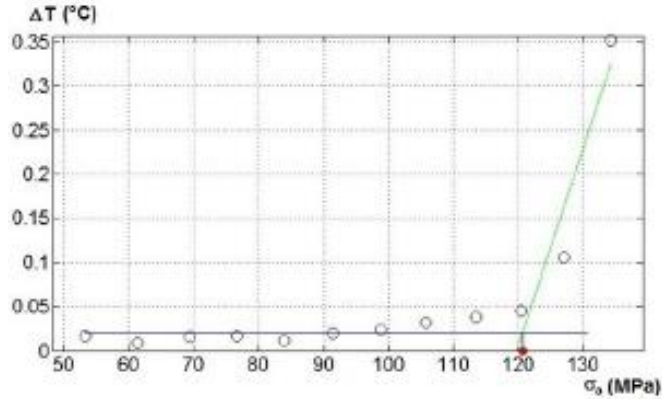


Figura 4.10 ^[12]: individuazione del limite di fatica.

Come esposto anche nel capitolo successivo, il limite di fatica viene individuato in un grafico che correla l'incremento di temperatura alla stabilizzazione con la σ_a relativa ad un preciso livello di carico. E' visibile come la variazione di temperatura segua due andamenti differenti. I punti ottenuti sono disposti secondo due serie di dati distinte che descrivono il diverso comportamento del materiale. La regressione lineare delle due rette permette di individuare il limite di fatica come intersezione delle stesse. Il limite di fatica viene definito quindi come il livello di carico al di sotto del quale non si manifesta danneggiamento, per cui è quel punto al di sotto del quale, teoricamente, si può dire di avere una vita a fatica infinita.

5. Risultati e discussione

5.1 Micrografia

Tramite la micrografia, eseguita con microscopio ottico Olympus BX51M, è stato possibile acquisire immagini in sezione in alcune zone delle piastre prodotte. Lo scopo è stato quello di analizzare la qualità lungo lo spessore delle piastre stampate per verificare l'eventuale presenza di problematiche durante la loro produzione. La *Figura 5.1* e *Figura 5.2* sono il risultato dell'unione di più acquisizioni ottenute con ingrandimento 2,5x su due differenti piastre tra quelle stampate.



Figura 5.1: micrografia in sezione del campione M-M77-CAS 01 con ingrandimento 2,5x.

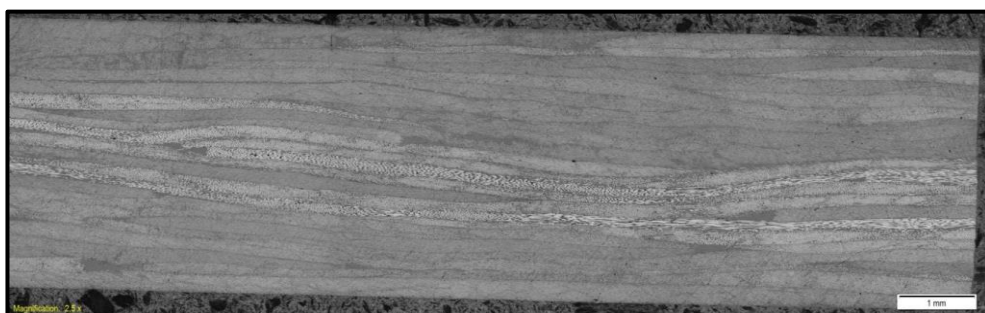


Figura 5.2: micrografia in sezione del campione M-M77-CAS 02 con ingrandimento 2,5x.

Eccetto qualche minima porosità locale, dalle immagini non emerge la presenza di particolari difettosità (come ad esempio zone ricche di resina, zone prive di resina o fenomeni di delaminazione locali) a conferma del fatto che le piastre sono state prodotte correttamente. Ciò si traduce in una buona affidabilità dei parametri di cura utilizzati ed in un buon livello di ripetibilità del processo.

5.2 Analisi DSC

Per analizzare la temperatura di transizione vetrosa del materiale è stata effettuata un'analisi DSC. La strumentazione a disposizione, descritta nel paragrafo dedicato del *capitolo 3*, ha permesso di ricavare dei termogrammi in cui individuare la T_g come media di una temperatura di onset ed una di offset della transizione. I risultati ottenuti sono stati confrontati sia con alcuni dati a disposizione^[8] sullo stesso materiale in report di laboratorio precedenti sia con quelli nominali nel datasheet. Il ciclo termico ha previsto due cicli di riscaldamento e due cicli di raffreddamento tra i 20 °C e i 220 °C secondo lo schema illustrato in *Figura 3.3* nel *capitolo 3*.

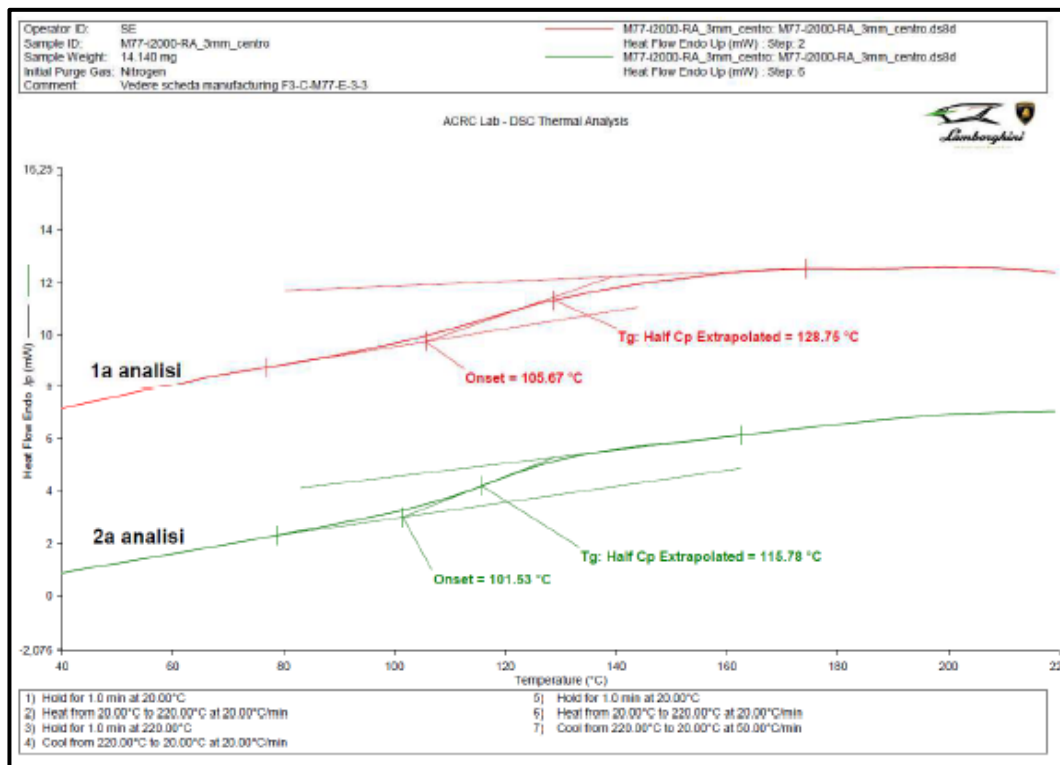


Figura 5.3: termogramma DSC del campione M77-i2000-RA*.

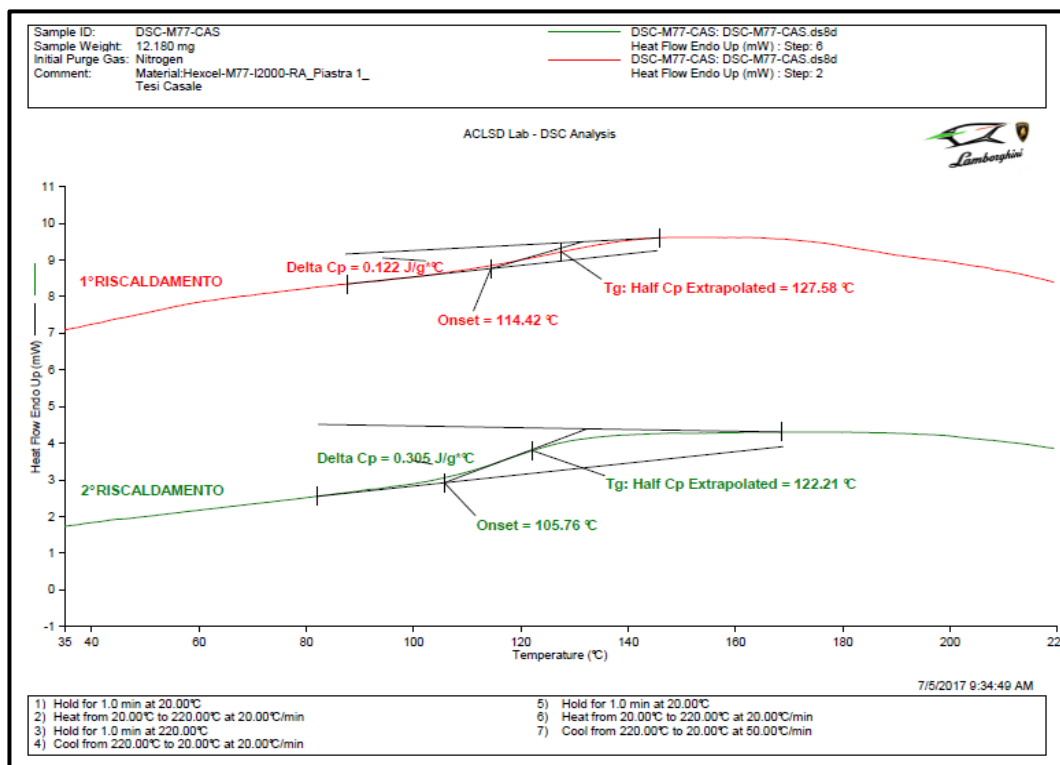


Figura 5.4: termogramma DSC del campione DSC-M77-CAS.

ID	T _g nominale	1° Analisi T _g Half Cp	2° Analisi T _g Half Cp
DSC-M77-CAS	120 °C	127,58 °C	122,21 °C
M77-i2000-RA*	120 °C	128,75 °C	116,78 °C

Tabella 5.1: risultati analisi DSC.

La Tabella 5.1 mostra come i risultati ottenuti per il campione in esame (DSC-M77-CAS) risultino in linea con quelli per il campione M77-i2000-RA*, derivanti da precedenti test di laboratorio, e con quelli nominali da datasheet. Ciò conferma la buona produzione delle piastre e l'affidabilità del processo produttivo. Inoltre, dai termogrammi in Figura 5.3 e Figura 5.4, si nota come l'entalpia residua risulti nulla, a conferma di un buon livello di cura delle piastre.

5.3 Analisi DMA

Un'ulteriore verifica della temperatura di transizione vetrosa del materiale è stata effettuata tramite l'analisi DMA. Essa ha permesso di individuare alcune caratteristiche termiche del materiale, tra cui il valore di onset della transizione vetrosa, l'energia immagazzinata dovuta al suo comportamento elastico (*Storage Modulus*) e l'energia dissipata sotto forma di calore dovuta al suo comportamento viscoso (*Loss Modulus*). Le prove sono state condotte secondo i parametri, le procedure, la strumentazione e le specifiche già illustrate nel Capitolo 3.5 dedicato.

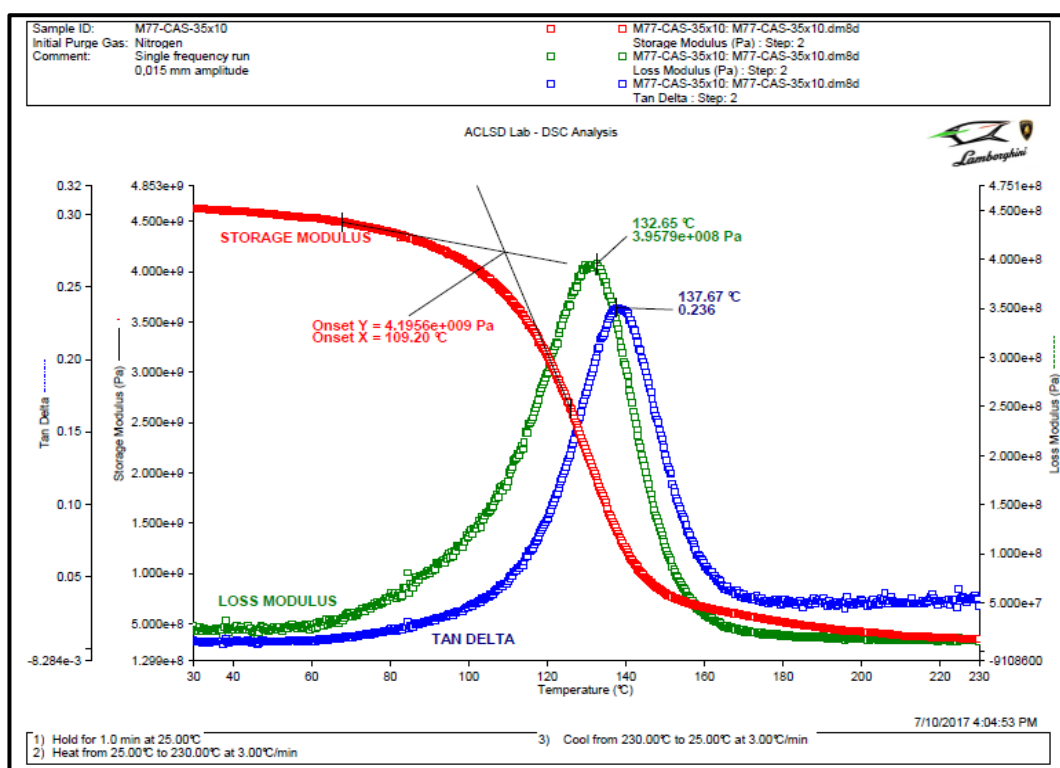


Figura 5.5: analisi DMA su campione DMA-M77-CAS 01 (35x10x3 mm).

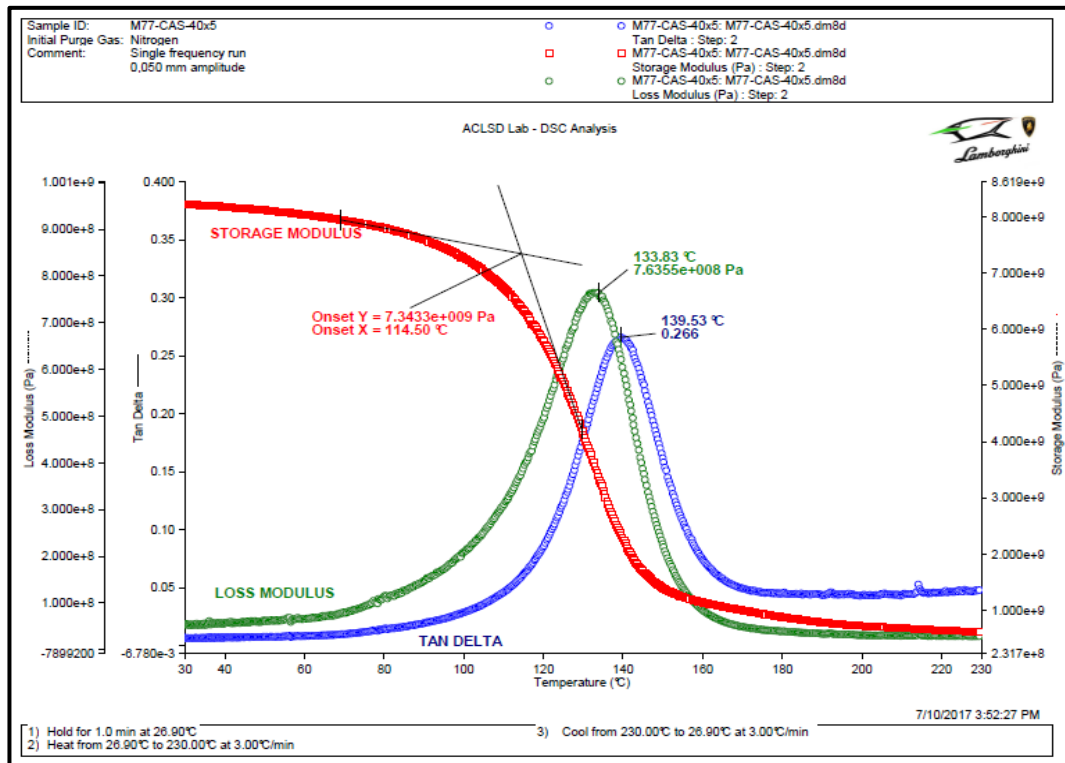


Figura 5.6: analisi DMA per campione DMA-M77-CAS 02 (40x5x3 mm).

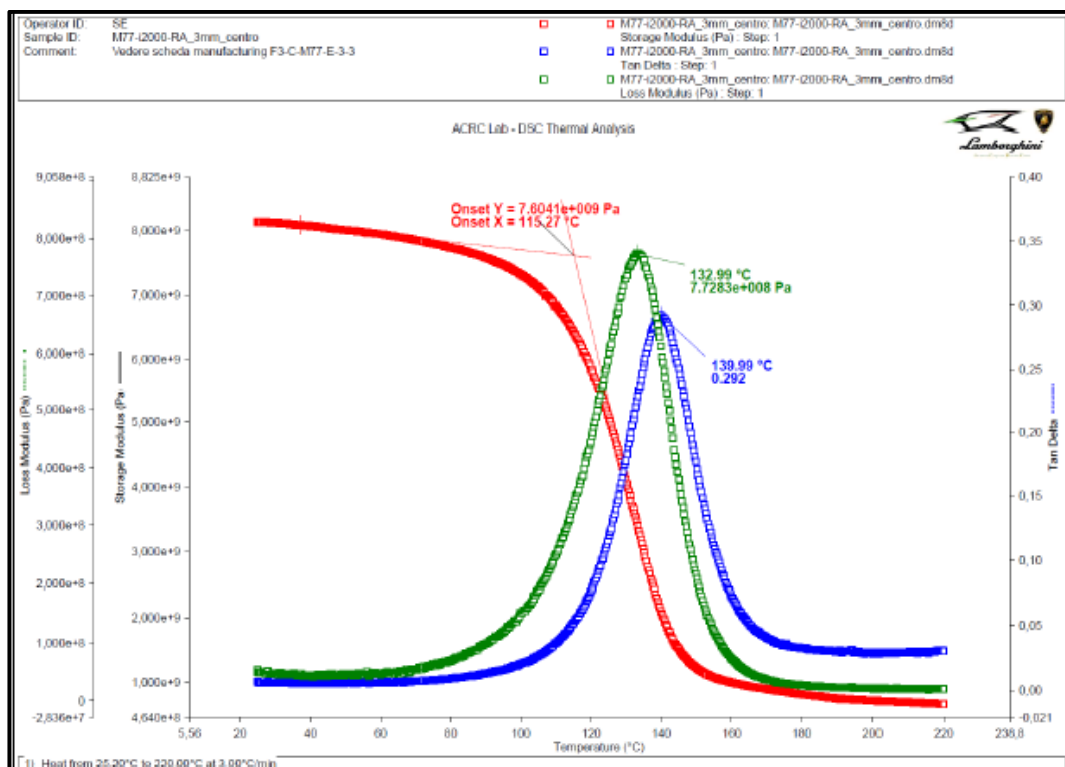


Figura 5.7: analisi DMA per campione M77-i2000-RA*.

Test	Storage Onset Modulus	Loss Peak Modulus	Tan δ
DMA-M77-CAS 01	109,20 °C	132,65 °C	137,67 °C
DMA-M77-CAS 02	114,50 °C	133,83 °C	139,59 °C
M77-i2000-RA*	115,27 °C	132,99 °C	139,99 °C

Tabella 5.2: risultati analisi DMA.

I grafici in *Figura 5.5*, *5.6* e *5.7* mettono a confronto le curve ottenute tramite analisi DMA sui campioni DMA-M77-CAS 01 e DMA-M77-CAS 02, oggetto di questo lavoro di tesi, e quelle ottenute per il campione M77-i2000-RA*, oggetto di report^[8] di laboratorio precedenti. Come è possibile notare dai grafici, le curve non mostrano particolari problematiche nell'andamento a conferma di un'analisi condotta correttamente. La *Tabella 5.2* riassume invece i dati numerici desumibili dai termogrammi e mostra come, sia tra i campioni oggetto dello studio, sia tra questi ultimi e quelli derivanti da precedenti test di laboratorio, i risultati siano concordi. Ciò si traduce in un picco nel *Loss Modulus* a circa 133 °C, in una temperatura di onset della transizione vetrosa di circa 113 °C ed in un picco nella *Tan δ* (che rappresenta il rapporto tra il *Loss Modulus* e lo *Storage Modulus*) a circa 138°C. Il fatto che i risultati siano concordi tra loro dimostra, come nel caso dell'analisi DSC, che le piastre prodotte siano state curate correttamente e che il loro processo di produzione risulta ripetibile.

5.4 Trazione

Le analisi delle proprietà meccaniche dell'HexMC M77 i2000 RA sono state condotte a partire da semplici prove di trazione su provini lisci (UNT) con l'obiettivo di ricavare dati riguardo la resistenza a rottura ed il modulo elastico. Da questi dati è stato poi possibile stabilire un punto di partenza per l'impostazione delle prove dinamiche. Inoltre, analizzando campioni di larghezze differenti, è stato possibile valutare l'influenza della larghezza sulla resistenza a rottura e sul modulo elastico.

Per avere poi una panoramica più ampia sulle caratteristiche del materiale, sono state condotte delle prove di trazione anche su campioni Open Hole (OH) allo scopo di ottenere sia dati di resistenza a rottura e di modulo elastico in presenza di un foro, sia allo scopo di investigare l'effetto di quest'ultimo sul materiale valutando diversi d/w.

5.4.1 Trazione UNT (Unnotched)

T-M77-CAS

Le prove sono state condotte in accordo con la normativa ASTM D 3039 su provini di larghezza 25 mm secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel *Capitolo 3.6.1* dedicato. In questo caso la larghezza dei campioni ha permesso l'utilizzo di un estensometro biassiale e quindi la valutazione del modulo di Poisson oltre che del modulo elastico.

ID campione	σ_r [MPa]	ε_r [%]	E [GPa]	ν_{12}
T-M77-CAS 01	319	0,81	42,38	0,56
T-M77-CAS 02	293	0,69	44,95	0,44
T-M77-CAS 03	341	0,77	47,23	0,37
T-M77-CAS 05	350	1,08	35,21	0,26
T-M77-CAS 07	329	0,82	42,77	0,35
Media	326	0,83	42,51	0,40
Dev.Std	22,03	0,15	4,52	0,11
CoV %	6,75	18,07	10,63	27,50

Tabella 5.3: risultati prove di trazione T-M77-CAS.

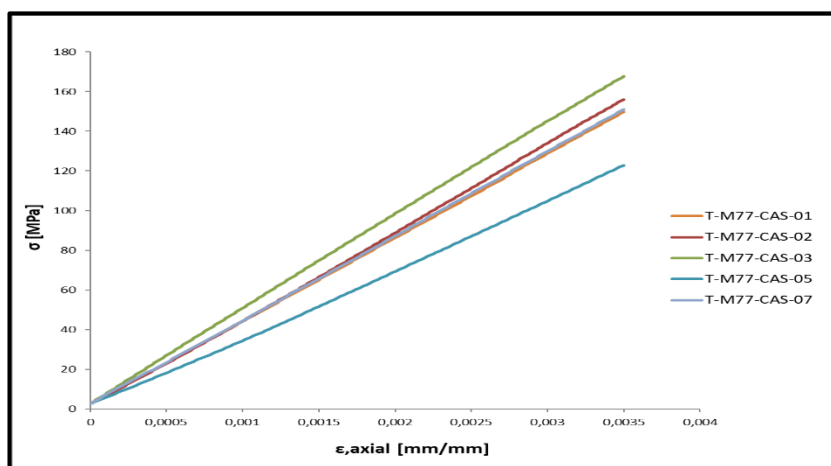


Figura 5.8: curve σ - ε per campioni T-M77-CAS nell'intervallo di definizione 0-3500 μ strain.

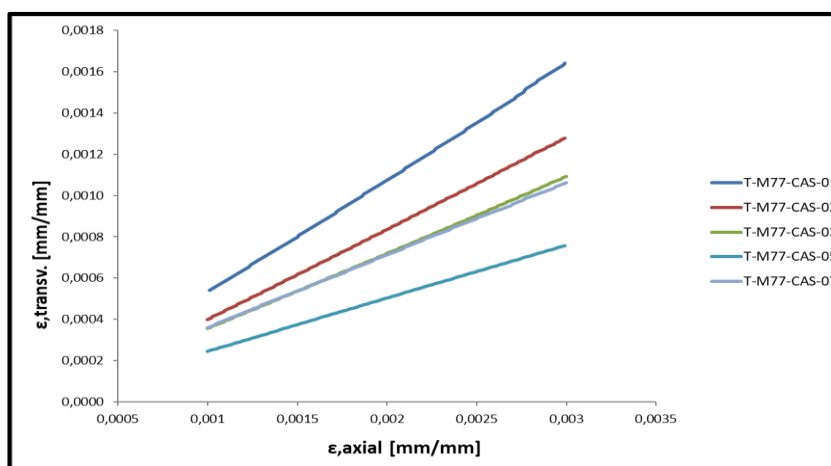


Figura 5.9: curve ε_a - ε_t per campioni T-M77-CAS nell'intervallo di definizione 1000-3000 μ strain.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra gli 8 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). La Figura 5.8 si riferisce alle curve σ - ε ottenute e mostra il loro andamento perfettamente lineare, a conferma della buona conduzione delle prove. In particolare, le curve definiscono il comportamento lineare in campo elastico in un range di definizione 0-3500 μ strain, definito per evitare che l'estensometro fosse applicato sul provino al momento della rottura. La Figura 5.9 illustra invece l'andamento del modulo di Poisson

nel range di definizione 1000-3000 μ strain: anche in questo caso gli andamenti delle curve risultano lineari a conferma di una buona esecuzione dei test. La *Tabella 5.3* raccoglie i dati numerici in output dai test. Per i campioni in esame il valore di resistenza a rottura medio risulta di 326 MPa con una deviazione standard di 22,03 MPa. Il modulo elastico invece presenta un valor medio di 42,51 GPa con una deviazione standard notevolmente più ridotta (4,52 GPa) rispetto a quella della resistenza a rottura. Non sono state registrate durante le prove particolari anomalie. Infine il CoV %, ossia il coefficiente di variazione, che permette di valutare la dispersione dei valori attorno alla media indipendentemente dall'unità di misura, mostra come la dispersione dei dati maggiore si abbia per deformazione a rottura e modulo di Poisson, mentre per la resistenza a rottura ed il modulo elastico rimanga nell'ordine del 5-10%. Probabilmente il coefficiente di variazione elevato è strettamente legato alla natura randomica del materiale, causa della dispersione dei dati.

T50-M77-CAS

Le prove sono state condotte su campioni di larghezza 50 mm secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel *Capitolo 3.6.1* dedicato. Anche se questa larghezza non è prevista dalla normativa, le prove sono state condotte seguendo la ASTM D 3039. In questo caso è stato utilizzato un estensometro monoassiale a causa della dimensione dei campioni e quindi non è stato possibile valutare il modulo di Poisson.

ID campione	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]	E [GPa]
T50-M77-CAS 01	330	0,89	37,91
T50-M77-CAS 02	330	1,05	32,62
T50-M77-CAS 04	327	0,90	40,85
T50-M77-CAS 05	343	1,19	36,21
T50-M77-CAS 06	320	0,74	37,05
Media	330	0,95	36,93
Dev.Std	8,31	0,17	2,98
CoV %	2,51	17,89	0,80

Tabella 5.4: risultati prove di trazione T50-M77-CAS.

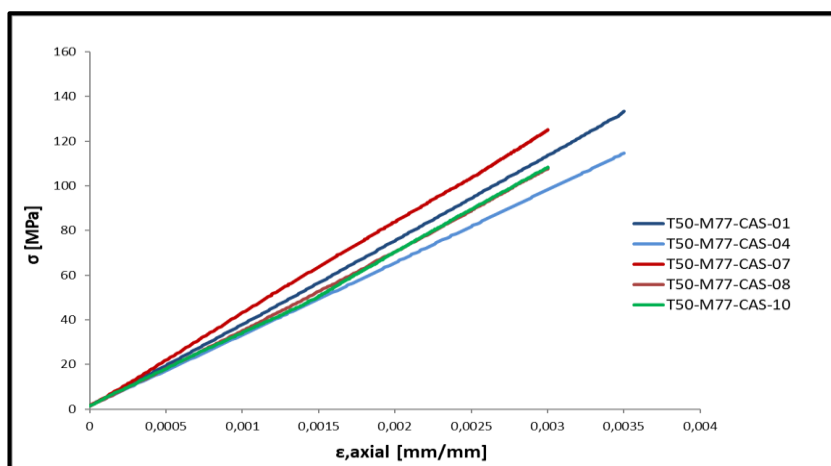


Figura 5.10: curve σ - ϵ per campioni T50-M77-CAS nell'intervallo di definizione 0-3500 μ strain.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra i 10 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). La *Figura 5.10* illustra le curve σ - ϵ ottenute per i campioni T50-M77-CAS considerati: risulta visibile la perfetta linearità delle stesse a conferma di una buona esecuzione delle prove. Anche in questo caso l'intervallo di interesse nella valutazione del modulo elastico si limita a 0-3500 μ strain per evitare il distacco dell'estensometro al momento della rottura. La *Tabella 5.4* raccoglie i dati numerici in output dalle prove mostrando come questi campioni abbiano una resistenza a rottura media di 330 MPa ed un modulo elastico medio di circa 37 GPa. E' interessante notare come le deviazioni standard, sia per la resistenza a rottura (8,31 MPa) che per il modulo elastico (2,98 GPa), siano contenute rispetto ai campioni T-M77-CAS. In questo caso il coefficiente di variazione (CoV %) è molto ridotto, ad indicazione di una bassa dispersione dei dati rispetto alla media.

T100-M77-CAS

Le prove sono state condotte su campioni di larghezza 100 mm secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel *Capitolo 3.6.1* dedicato. Anche se questa larghezza non è prevista dalla normativa, le prove sono state condotte seguendo la ASTM D 3039. Come per i T50-M77-CAS, a causa della larghezza dei campioni, non è stato possibile valutare il modulo di Poisson.

ID campione	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]	E [GPa]
T100-M77-CAS 01	345	1,04	37,19
T100-M77-CAS 02	350	0,93	42,32
T100-M77-CAS 04	250	0,68	42,01
T100-M77-CAS 05	346	0,81	47,95
T100-M77-CAS 06	430	1,06	47,22
Media	344	0,91	43,34
Dev.Std	63,91	0,16	4,39
CoV %	18,58	17,58	10,13

Tabella 5.5: risultati prove di trazione T100-M77-CAS.

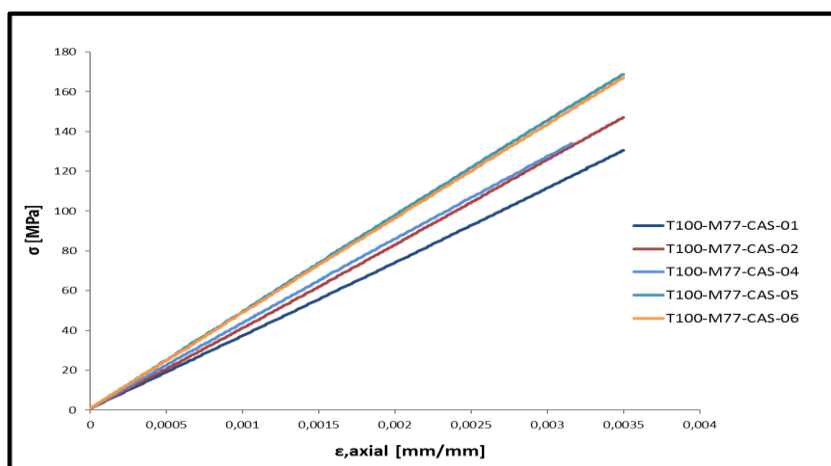


Figura 5.11: curve σ - ϵ per campioni T100-M77-CAS nell'intervallo di definizione 0-3500 μ strain.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra gli 8 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). Come per i campioni T-M77-CAS e T50-M77-CAS le prove sono state eseguite correttamente: la conferma deriva dalla perfetta linearità nell'andamento delle curve σ - ε come illustrato in *Figura 5.11*. Per evitare la presenza dell'estensometro sul campione al momento della rottura, anche in questo caso, il modulo elastico è stato definito nel range 0-3500 μ strain. La *Tabella 5.5* raccoglie i dati numerici ottenuti per questo set di provini. Il modulo elastico medio risulta pari a 43,34 GPa con una deviazione standard (4,39 GPa) in linea con i casi precedenti. La resistenza a rottura media è pari a 344 MPa ma la deviazione standard (63,91 MPa) risulta superiore ai precedenti casi. L'elevata deviazione standard si traduce in un alto coefficiente di variazione (CoV circa 20%) e quindi in un'elevata dispersione dei dati rispetto alla media: in questo caso è tangibile come i risultati siano dipendenti dalla natura randomica del materiale.

Andamento di σ_r in funzione della larghezza

I dati ottenuti e descritti nei precedenti paragrafi sono stati raccolti in modo da poter analizzare l'andamento della resistenza a rottura con la larghezza dei campioni. Le larghezze a confronto sono 25 mm, 50 mm e 100 mm.

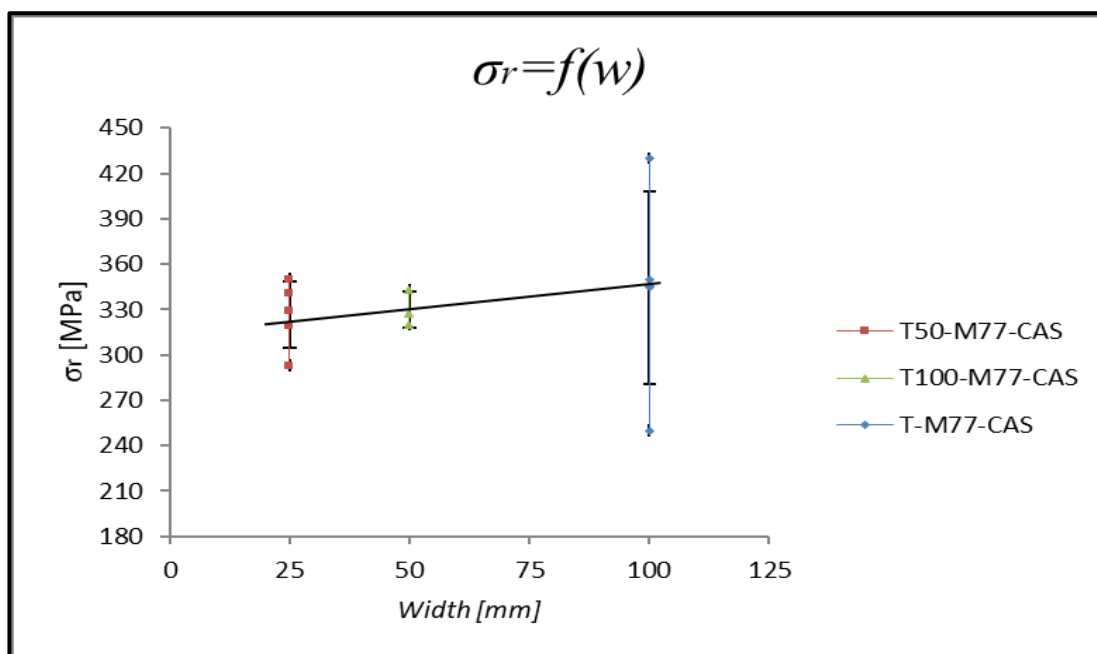


Figura 5.12: andamento di σ_r in funzione della larghezza dei campioni.

La *Figura 5.12* mostra l'andamento della resistenza a rottura in funzione di w , larghezza dei campioni. Nel grafico, gli indicatori in rosso si riferiscono ai dati ottenuti dalle prove su campioni T-M77-CAS, quelli in verde ai dati ottenuti su campioni T50-M77-CAS e quelli in blu ai dati ottenuti su campioni T100-M77-CAS. Per ogni serie di dati è visibile una linea di tendenza nera che ne esplicita la deviazione standard. A conferma di quanto esposto nei precedenti paragrafi sui risultati delle prove UNT è graficamente visibile l'ampia deviazione standard dei campioni T100-M77-CAS. Considerando i valori medi ottenuti per ogni set di prova, l'andamento della resistenza a rottura risulta essere crescente con l'aumento della larghezza, ossia i campioni risultano essere

più resistenti quanto più sono larghi, anche se la deviazione standard maggiore si registra per i campioni più larghi (probabilmente per la maggior probabilità di avere più zone a minor percentuale di fibra). Tendenzialmente, i dati ottenuti per i set T-M77-CAS (25 mm) e T50-M77-CAS (50 mm) risultano confrontabili, mentre per il set T100-M77-CAS (100 mm) la resistenza aumenta di circa il 6% rispetto a T-M77-CAS: una larghezza 3 volte superiore quella standard comporta un aumento di resistenza a rottura media del 6%.

Andamento di E in funzione della larghezza

I dati ottenuti e descritti nei precedenti paragrafi sono stati raccolti in modo da poter analizzare anche l'andamento del modulo elastico con la larghezza dei campioni. Le larghezze a confronto sono 25 mm, 50 mm e 100 mm.

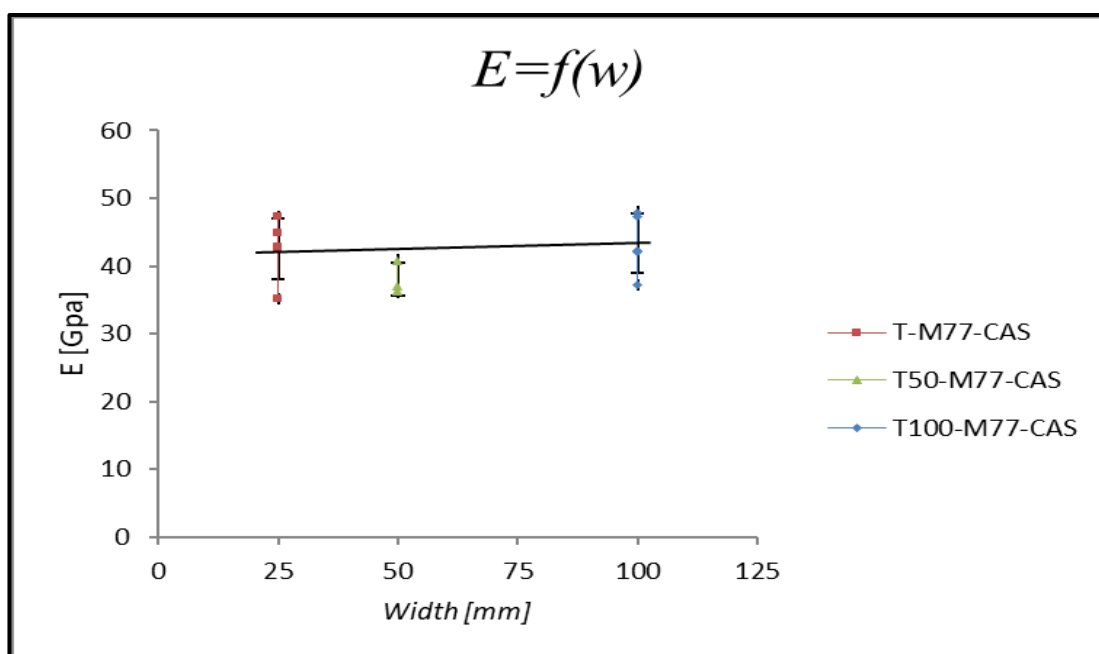


Figura 5.13: andamento di E in funzione della larghezza dei campioni.

La Figura 5.13 mostra l'andamento del modulo elastico in funzione di w, larghezza dei campioni. Anche in questo caso, gli indicatori rossi si riferiscono ai dati ottenuti nelle prove T-M77-CAS, quelli in verde ai dati ottenuti nelle prove T50-M77-CAS e quelli in blu ai dati ottenuti nelle prove T100-M77-CAS. Per ogni serie di dati è visibile una linea di tendenza nera che ne esplicita la deviazione standard. Dal grafico è possibile notare come, indipendentemente dalla serie di dati considerata, la deviazione standard si mantiene contenuta, a differenza di quanto visto per la resistenza a rottura. Inoltre è visibile come il modulo elastico rimanga pressoché costante al crescere di w. Sostanzialmente, per il materiale considerato, il modulo elastico risulta essere indipendente dalla larghezza del campione, a conferma di quanto presente in letteratura [6].

5.4.2 Trazione OH (Open Hole)

TOH-M77-CAS

Le prove sono state condotte su provini di larghezza 25 mm forati secondo un rapporto w/d pari a 6 (d = 8,33 mm) come previsto dalla normativa ASTM D 5766, secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel *Capitolo 3.6.1* dedicato. In questo caso la larghezza dei campioni ha permesso l'utilizzo di un estensometro biassiale e quindi la valutazione del modulo di Poisson oltre che del modulo elastico.

ID campione	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]	E [GPa]	ν_{12}
TOH-M77-CAS 02	366	1,03	37,53	0,26
TOH-M77-CAS 03	324	0,94	36,40	0,25
TOH-M77-CAS 04	326	0,62	53,87	0,60
TOH-M77-CAS 05	258	0,67	39,36	0,39
TOH-M77-CAS 06	288	0,82	37,56	0,40
Media	312	0,82	40,94	0,38
Dev.Std	41,16	0,17	7,31	0,14
CoV %	13,19	20,73	17,86	36,84

Tabella 5.6: risultati prove di trazione TOH-M77-CAS.

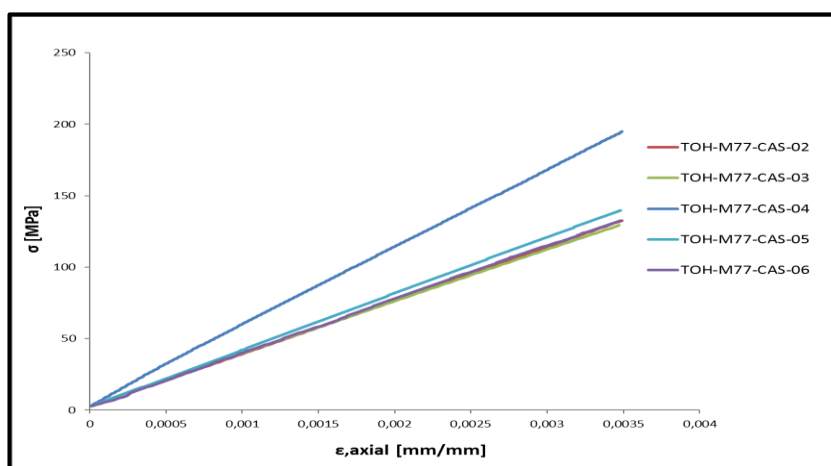


Figura 5.14: curve σ - ϵ per campioni TOH-M77-CAS nell'intervallo di definizione 0-3500 μ strain.

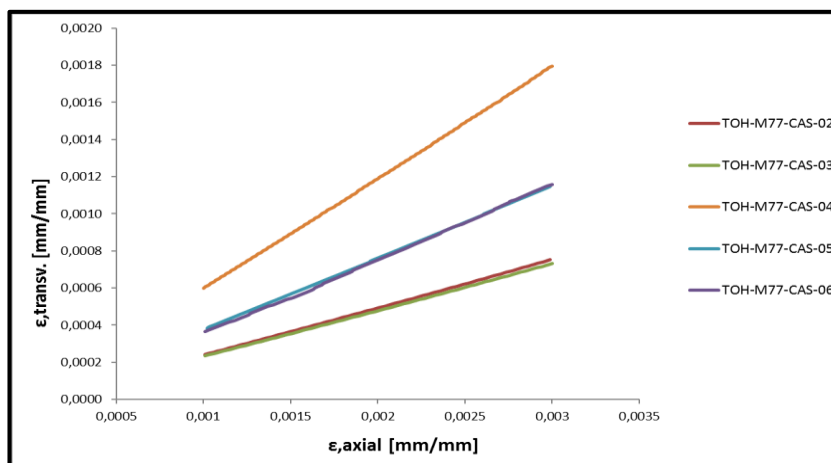


Figura 5.15: curve ε_a - ε_t per campioni TOH-M77-CAS nell'intervallo di definizione 1000-3000 μ strain.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra i 7 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). La *Figura 5.14* si riferisce alle curve σ - ε ottenute e mostra il loro andamento lineare, a conferma della buona conduzione delle prove. In particolare, le curve definiscono il comportamento lineare in campo elastico nel range di definizione 0-3500 μ strain, scelto per evitare il potenziale distacco dell'estensometro al momento della rottura. La *Figura 5.15* illustra invece l'andamento del modulo di Poisson nel range di definizione 1000-3000 μ strain: anche in questo caso gli andamenti delle curve risultano lineari a conferma di una buona esecuzione dei test. La *Tabella 5.6* raccoglie i dati numerici in output dai test. Per i campioni in esame il valore di resistenza a rottura medio risulta di 312 MPa con una deviazione standard di 41,16 MPa. Il modulo elastico invece presenta un valor medio di 40,94 GPa con una deviazione standard notevolmente più ridotta (7,31 GPa) rispetto a quella della resistenza a rottura. I valori medi di σ_r ed E risultano in linea con quelli ottenuti nelle prove di trazione UNT. Non sono state registrate durante le prove particolari anomalie ad eccezione del campione TOH-M77-CAS 06: nella parte iniziale delle curve illustrate in *Figure 5.15-16* l'andamento si discosta leggermente dalla linearità probabilmente a causa di uno scivolamento dell'estensometro. Infine, si può notare come, osservando il CoV %, ci sia una sostanziale dispersione dei dati rispetto alla media: circa il 13% per la resistenza a rottura e circa il 18% per il modulo elastico. Questa dispersione è riconducibile alla tipologia di materiale in cui la disposizione delle fibre è casuale e la percentuale fibra/matrice non è potenzialmente la stessa in ogni zona delle piastre.

T500H-M77-CAS-A

Le prove sono state condotte su provini di larghezza 50 mm forati secondo un rapporto w/d pari a 6 (d = 8,33 mm) come previsto dalla normativa ASTM D 5766, secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel *Capitolo 3.6.1* dedicato. In questo caso è stato utilizzato un estensometro monoassiale a causa della dimensione dei campioni e quindi non è stato possibile valutare il modulo di Poisson.

ID campione	σ_r [MPa]	ε_r [%]	E [GPa]
T50OH-M77-CAS-A 02	332	0,62	57,03
T50OH-M77-CAS-A 03	333	0,83	42,61
T50OH-M77-CAS-A 04	361	0,80	47,20
T50OH-M77-CAS-A 05	355	0,59	61,75
T50OH-M77-CAS-A 06	356	0,66	57,70
Media	347	0,70	53,26
Dev.Std	13,76	0,11	8,00
CoV %	3,96	15,71	15,02

Tabella 5.7: risultati prove di trazione T50OH-M77-CAS-A.

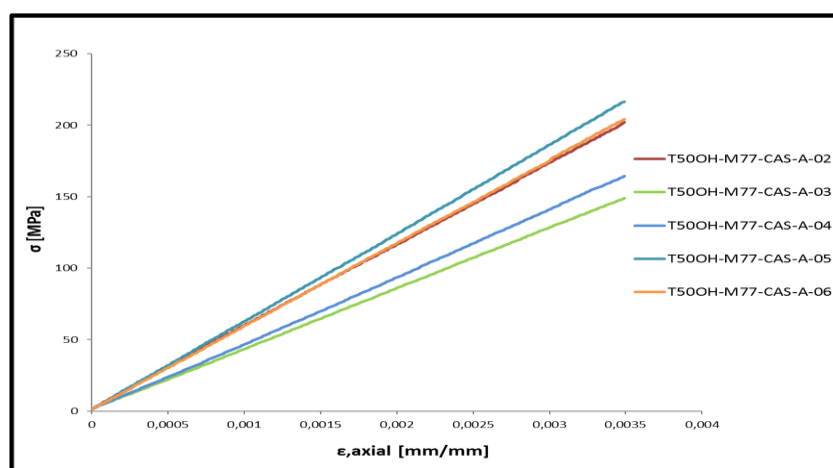


Figura 5.16: curve σ - ε per campioni T50OH-M77-CAS-A nell'intervallo di definizione 0-3500 μ strain.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra i 10 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). La Figura 5.16 mostra le curve σ - ε ottenute per il set di provini T50OH-M77-CAS-A: l'andamento perfettamente lineare delle curve conferma una corretta esecuzione dei test. Per evitare la presenza dell'estensometro sul campione al momento della rottura il modulo elastico è stato definito nel range 0-3500 μ strain. La Tabella 5.7 raccoglie i dati numerici in output dai test. La resistenza a rottura media risulta essere 347 MPa, in linea con i risultati ottenuti per i campioni UNT, con una deviazione standard contenuta (13,76 MPa) e una bassa dispersione dei dati rispetto alla media (CoV % circa 4%). Il modulo elastico medio invece presenta un valore elevato (53,26 GPa), non in linea con quanto ottenuto per le prove UNT e per i campioni TOH-M77-CAS, con una deviazione standard (8,00 GPa) ed una dispersione dei dati elevata (CoV % circa 15% in linea con quanto ottenuto per i campioni TOH-M77-CAS con lo stesso rapporto w/d). Il fatto che la resistenza a rottura ed il modulo elastico abbiano rispettivamente una bassa ed un'alta dispersione dei dati rispetto alla media è ancora una volta indice e conseguenza della randomicità del materiale.

T50OH-M77-CAS-B

Le prove sono state condotte su provini di larghezza 50 mm forati secondo un rapporto w/d pari a 3 (d = 16,66 mm) non previsto dalla normativa ASTM D 5766, secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel Capitolo 3.6.1

dedicato. In questo caso è stato utilizzato un estensometro monoassiale a causa della dimensione dei campioni e quindi non è stato possibile valutare il modulo di Poisson.

ID campione	σ_r [MPa]	ε_r [%]	E [GPa]
T50OH-M77-CAS-B 01	228	0,62	37,66
T50OH-M77-CAS-B 02	267	0,60	45,42
T50OH-M77-CAS-B 03	267	0,46	59,60
T50OH-M77-CAS-B 05	223	0,71	33,95
T50OH-M77-CAS-B 06	144	0,48	31,18
Media	226	0,60	42,13
Dev.Std	50,18	0,10	11,41
CoV %	22,20	16,66	27,08

Tabella 5.8: risultati prove di trazione T50OH-M77-CAS-B.

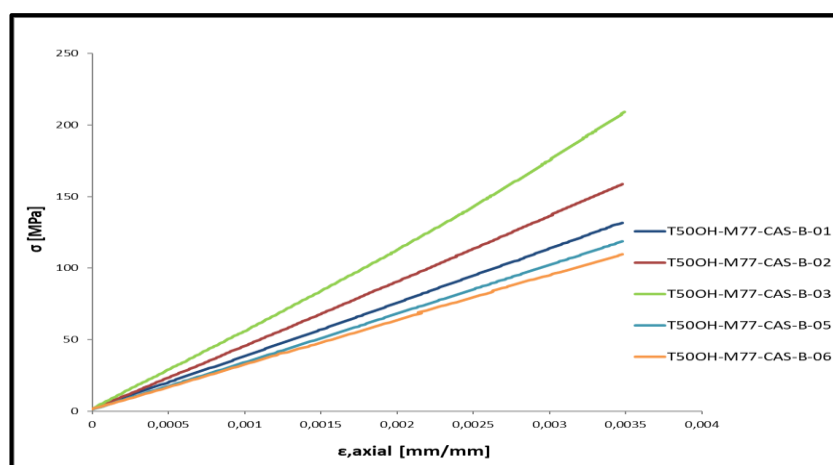


Figura 5.17: curve σ - ε per campioni T50OH-M77-CAS-B nell'intervallo di definizione 0-3500 μ strain.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra i 10 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). La Figura 5.17 mostra le curve σ - ε ottenute per il set di provini T50OH-M77-CAS-B: l'andamento lineare delle curve conferma una corretta esecuzione dei test. Per evitare il potenziale distacco dell'estensometro al momento della rottura il modulo elastico è stato definito nel range 0-3500 μ strain. La Tabella 5.8 mostra i risultati ottenuti dalle prove sul set di campioni TOH50-M77-CAS-B: si può notare subito come la resistenza a rottura media sia notevolmente inferiore rispetto alle prove di trazione UNT e OH finora analizzate. Essa risulta pari a 226 MPa con una deviazione standard (50,18 MPa) ed una dispersione dei dati rispetto alla media molto elevate (22,20 %). Il valor medio del modulo elastico (42,13 GPa) è invece in linea con i risultati ottenuti finora con una deviazione standard accettabile (11,41 GPa) ed una dispersione dei dati abbastanza elevata (CoV % circa 27%). Probabilmente la presenza del foro, per un w/d pari a 3, influenza negativamente la resistenza a rottura causandone un notevole calo rispetto al caso w/d pari a 6. Il modulo elastico non risente invece della presenza del foro indipendentemente dal rapporto w/d utilizzato.

Selected Failure Strength

Una volta eseguiti i test di trazione OH è stato condotto uno studio della resistenza in relazione alla zona di rottura. Dalle immagini legate alle zone e alle modalità di frattura dei campioni, riportate in seguito, è possibile notare come, nella maggior parte dei casi, la rottura avvenga lontano dal foro, ad eccezione dei campioni T50OH-M77-CAS-B ($w/d=3$) in cui avvengono tutte in corrispondenza dei fori a causa della loro dimensione: ciò è legato banalmente ad una minor sezione resistente nella zona centrale dei campioni che favorisce la frattura. Lo studio in questione si basa sulla *Selected Failure Strength (SFS)*, ossia un approccio di valutazione della resistenza in funzione della zona di rottura. L'approccio prevede l'utilizzo di relazioni che depurano il dato di resistenza dalla presenza del foro. In particolare, vengono definite la *Net Section Strength (NST)* e la *Gross Section Strength (GSS)*, secondo le relazioni:

$$NST \quad \sigma_{OHT}^N = \frac{P}{(w - d) \cdot t} \quad (1)$$

$$GSS \quad \sigma_{OHT}^{inf} = \sigma_{UNT} = \frac{P}{w \cdot t} \quad (2)$$

dove:

- P è il carico massimo applicato [N];
- w è la larghezza del campione [mm];
- d è il diametro del foro [mm];
- t è lo spessore del campione [mm].

I dati ottenuti da questa analisi secondo (1) e (2) vengono raccolti in *Tabella 5.9-11*:

ID campione	σ_r [MPa]	Failure Mode
TOH-M77-CAS 02	366	GSS
TOH-M77-CAS 03	369	NST
TOH-M77-CAS 04	326	GSS
TOH-M77-CAS 05	258	GSS
TOH-M77-CAS 06	329	NST

Tabella 5.9: risultati Selected Failure Strength per campioni TOH-M77-CAS.

ID campione	σ_r [MPa]	Failure Mode
T50OH-M77-CAS-A 02	332	GSS
T50OH-M77-CAS-A 03	333	GSS
T50OH-M77-CAS-A 04	433	NST
T50OH-M77-CAS-A 05	350	GSS
T50OH-M77-CAS-A 06	426	NST

Tabella 5.10: risultati Selected Failure Strength per campioni T50OH-M77-CAS-A.

ID campione	σ_r [MPa]	Failure Mode
T50OH-M77-CAS-B 02	341	NST
T50OH-M77-CAS-B 03	399	NST
T50OH-M77-CAS-B 04	400	NST
T50OH-M77-CAS-B 05	335	NST
T50OH-M77-CAS-B 06	216	NST

Tabella 5.11: risultati Selected Failure Strength per campioni T50OH-M77-CAS-B.

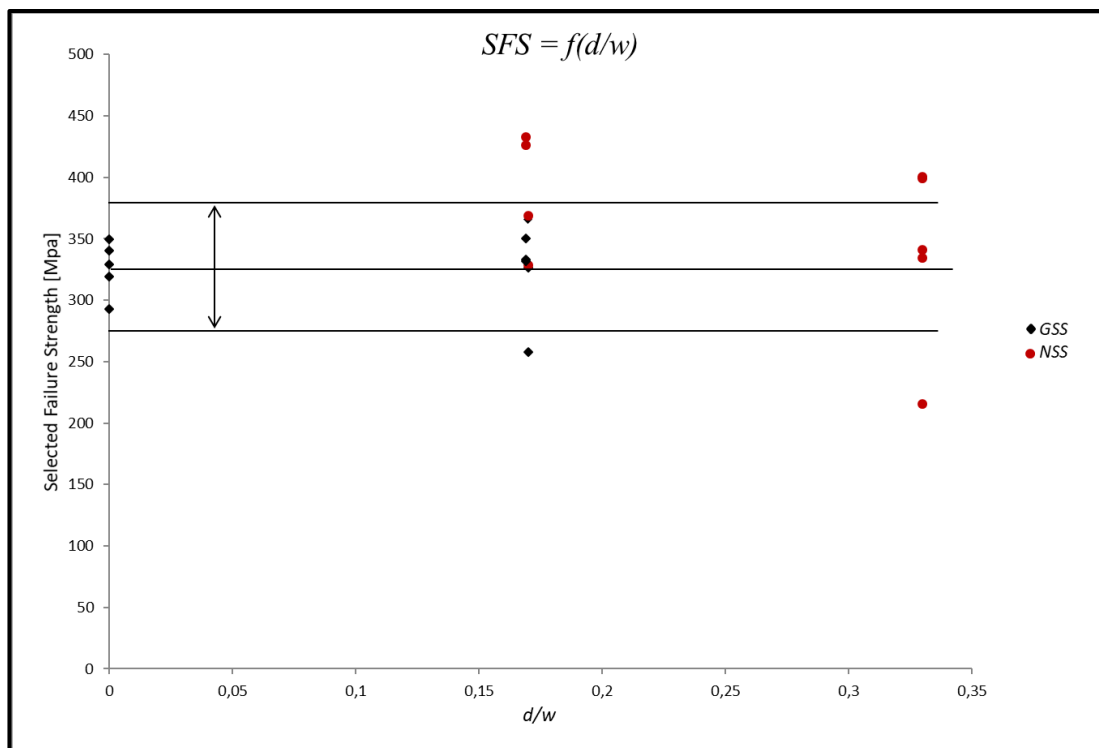


Figura 5.18: Selected failure strength.

I dati raccolti in Tabelle 5.9-11 mostrano i risultati ottenuti secondo il criterio SFS. I failure mode confermano come la rottura sia dipendente da w/d e quindi dalla sezione resistente: in particolare, per w/d pari a 6 le fratture avvengono maggiormente lontano dal foro mentre per w/d pari a 3 avvengono tutte in corrispondenza dello stesso. Sviluppando i risultati in un grafico (Figura 5.18) che analizza l'andamento della SFS con d/w ed escludendo alcuni dati isolati (variabilità dei dati dovuta alla natura randomica del materiale) si può notare come la resistenza sia praticamente costante (circa 325 ± 55 MPa). Questo indica che la resistenza di questo materiale non decresce e perciò può essere considerato insensibile al foro.

5.5 Compressione

Compression Modulus

Le prove sono state condotte in accordo con la normativa SACMA SRM 1R-94 su provini di larghezza 15 mm secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel Capitolo 3.6.2 dedicato. I campioni sono stati montati in un dispositivo antibuckling al fine di evitare fenomeni flessionali ed il modulo elastico è stato valutato grazie all'utilizzo di un estensometro monoassiale.

ID campione	E (0,1-0,3%) [GPa]	E (0,05-0,25%) [GPa]
CM-M77-CAS 01	37,98	38,10
CM-M77-CAS 02	34,03	35,72
CM-M77-CAS 03	35,24	37,86
CM-M77-CAS 04	35,80	37,09
CM-M77-CAS 07	52,80	53,27
Media	39,17	40,41
Dev.Std	7,75	7,25
CoV %	19,79	17,94

Tabella 5.12: risultati prove di compressione CM-M77-CAS.

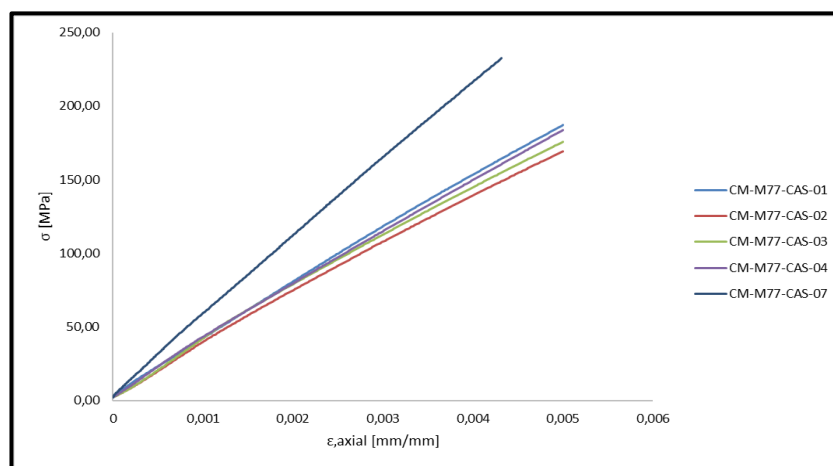


Figura 5.19: curve σ - ϵ per campioni CM-M77-CAS.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra i 10 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). La Figura 5.19 mostra le curve σ - ϵ per i campioni analizzati: è visibile la linearità delle curve a conferma di una buona esecuzione dei test ed ottenimento dati. Le curve risultano interrotte ad un certo livello di deformazione in quanto lo scopo è stato quello di valutare il solo modulo elastico. La Tabella 5.12 contiene i dati numerici ottenuti dalle prove di compressione. Il modulo elastico è stato valutato in due intervalli di deformazione: tra 1000-3000 μ strain e tra 500-2500 μ strain. I dati ottenuti nei due intervalli di definizione sono perfettamente confrontabili, sia in termini di valor medio che di deviazione standard e CoV %. Infatti in entrambi i casi i valori medi si aggirano attorno ai 40 GPa, le deviazioni standard attorno ai 7,5 GPa e i CoV% tra il 17-19%. Da questi dati si può desumere come, anche rispetto alla compressione, il modulo elastico di questo materiale conserva valori in linea con le caratteristiche a trazione, sostanzialmente con una deviazione standard contenuta. Anche in questo caso però, il coefficiente di variazione è abbastanza elevato: ciò si traduce in un'alta dispersione dei dati ricollegabile alla natura randomica del materiale.

Compression Strength

Le prove sono state condotte in accordo con la normativa SACMA SRM 1R-94 su provini di larghezza 15 mm secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel Capitolo 3.6.2 dedicato. I campioni sono stati posti in un dispositivo antibuckling al fine di evitare fenomeni flessionali senza l'utilizzo di un estensometro.

ID campione	σ_r [MPa]
CS-M77-CAS 02	406,42
CS-M77-CAS 03	380,32
CS-M77-CAS 04	393,56
CS-M77-CAS 05	422,49
CS-M77-CAS 07	414,56
Media	403,47
Dev.Std	16,79
CoV %	4,16

Tabella 5.13: risultati prove di compressione CS-M77-CAS.

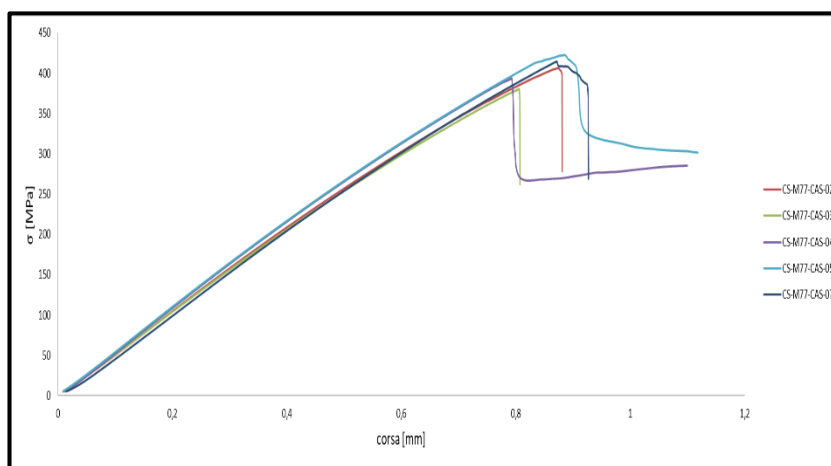


Figura 5.19: curve σ - ε per campioni CS-M77-CAS.

I dati raccolti si riferiscono a 5 campioni selezionati tra i 10 testati secondo il normale svolgimento delle prove (5 è il numero minimo previsto dalla normativa). La Figura 5.19 mostra la linearità delle curve ottenute per il set di campioni CS-M77-CAS in output dalla macchina di carico. A differenza dei test Compression Modulus, in questo caso non è stato utilizzato un estensometro per cui il grafico si riferisce alla corsa della traversa della macchina di carico. Dalla normalizzazione dei dati della corsa rispetto allo zero iniziale è possibile ricavare la deformazione. In ogni caso, le curve ottenute risultano sostanzialmente lineari a conferma di una buona esecuzione dei test. La Tabella 5.13 contiene i dati numerici in output dalle prove. La resistenza a compressione presenta un valor medio pari a 403,5 MPa, con una deviazione standard di 16,8 GPa. Il coefficiente di variazione risulta molto ridotto rispetto al caso CM-M77-CAS: ciò si traduce in una buona affidabilità del dato ottenuto e in sua una bassa dispersione rispetto alla media.

5.6 Osservazioni riassuntive su trazione e compressione

Dall'analisi delle proprietà meccaniche a trazione è emerso sostanzialmente che la resistenza a rottura di questo materiale (HexMC M77 i2000 RA) si mantiene superiore ai 300 MPa come dichiarato dal datasheet del fornitore. La considerazione è valida sia nel caso di campioni UNT che di campioni OH ad eccezione del set T50OH-M77-CAS-B per cui la resistenza a trazione è risultata notevolmente inferiore alla media riscontrata negli altri casi: probabilmente a causa del diametro del foro troppo elevato e quindi di una bassa sezione resistente. La resistenza a trazione aumenta, mentre il modulo elastico rimane costante con l'incremento della larghezza dei campioni. Dall'analisi SFS è emerso che la resistenza, considerata sulla base della zona di rottura (NST e

GSS), rimane pressoché costante per cui è possibile considerare il materiale insensibile al foro. E' da precisare però il fatto che per w/d pari a 6 la maggior parte delle rotture avviene lontano dal foro, mentre per w/d pari a 3 tutte le rotture avvengono in corrispondenza dello stesso: probabilmente esiste un rapporto w/d limite per cui il materiale è insensibile alla presenza del foro. La resistenza a compressione è superiore a quella dichiarata dal fornitore con una media di 403,5 MPa. Il modulo elastico, sia in trazione (UNT e OH) che in compressione, si mantiene intorno ai 40 GPa in linea con i dati dei precedenti report^[6] di laboratorio e di datasheet. Una importante considerazione va fatta sulla elevata variabilità delle deviazioni standard e dei CoV% ottenuti. In alcuni casi la deviazione standard è molto contenuta, mentre in altri molto elevata, come anche il coefficiente di variazione. Questo si traduce in una dispersione dei dati variabile legata alla natura randomica del materiale. La percentuale di fibre e matrice, oltre che l'orientamento delle fibre, nei campioni testati è differente e determinante. Considerando i valori medi di resistenza a rottura e modulo elastico si può quindi affermare che il processo di cura del materiale porta all'ottenimento di proprietà simili ma la singolarità dei dati conferma che bisogna ancora lavorare sul maggior controllo dello scorrimento del materiale in pressa e sul conseguente posizionamento delle fibre.

5.7 Fatica

5.7.1 Curva di Woehler

Le prove sono state condotte in accordo con la normativa ASTM D 3479 su campioni di larghezza 25 mm secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel *Capitolo 3.7.1* dedicato.

R = 0,1
f = 5 Hz
$\sigma_{\max} = 304 \text{ MPa}$

Tabella 5.14: parametri di prova.

ID campione	% σ_{\max} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	F _{max} [N]	F _{min} [N]	F _{medio} [N]	F _{amp} [N]	Cicli Rottura
F-M77-CAS 01	100	304,0	23016,0	2301,6	12658,8	10357,2	Set-Up
F-M77-CAS 02	90	273,6	20719,8	2072,0	11395,9	9323,9	175
F-M77-CAS 03	75	228,0	17263,2	1726,3	9494,8	7768,4	1353
F-M77-CAS 04	60	182,4	13827,9	1382,8	7605,3	6222,5	377
F-M77-CAS 05	50	152,0	11543,8	1154,4	6349,1	5194,7	6233
F-M77-CAS 06	40	121,6	9279,8	928,0	5103,9	4175,9	2320
F-M77-CAS 07	30	91,2	6971,8	697,2	3834,5	3137,3	812646
F-M77-CAS 08	20	60,8	4642,2	464,2	2553,2	2089,0	2000000
F-M77-CAS 09	20	60,8	4674,2	467,4	2570,8	2103,4	2000000
F-M77-CAS 10	30	91,2	6938,2	693,8	3816,0	3122,2	2000000
F-M77-CAS 11	40	121,6	9265,7	926,6	5096,1	4169,6	2000000
F-M77-CAS 12	50	152	11597,1	1159,7	6378,4	5218,7	1340000
F-M77-CAS 13	50	152	11627,9	1162,8	6395,4	5232,6	1023888
F-M77-CAS 14	50	152	11664,1	1166,4	6415,2	5248,8	160221
F-M77-CAS 15	40	121,6	9372,1	937,2	5154,7	4217,4	2000000
F-M77-CAS 16	30	91,2	7033,6	703,4	3868,5	3165,1	2000000
F-M77-CAS 17	20	60,8	4698,5	469,8	2584,2	2114,3	2000000
F-M77-CAS 18	60	182,4	14181,2	1418,1	7799,7	6381,6	30428
F-M77-CAS 19	30	91,2	6937,5	693,8	3815,6	3121,9	2000000
F-M77-CAS 20	60	182,4	13874,1	1387,4	7630,7	6243,3	247034
F-M77-CAS 21	60	182,4	13875,0	1387,5	7631,3	6243,8	56567
F-M77-CAS 22	60	182,4	13830,3	1383,0	7606,7	6223,6	67945
F-M77-CAS 23	20	60,8	4613,7	461,4	2537,5	2076,2	2000000
F-M77-CAS 24	30	91,2	6927,5	692,7	3810,1	3117,4	2000000
F-M77-CAS 25	50	152	11547,6	1154,8	6351,2	5196,4	728126
F-M77-CAS 26	40	121,6	9188,8	918,9	5053,8	4134,9	2000000
F-M77-CAS 27	50	152	11563,3	1156,3	6359,8	5203,5	1166503

Tabella 5.15: risultati prove di fatica F-M77-CAS 01-27.

La *Tabella 5.14* contiene i parametri di prova principali utilizzati nelle prove dinamiche. Le prove sono state condotte impostando un rapporto di carico R=0,1 (condizione di trazione-trazione) ed una frequenza di carico di 5Hz. Il valore $\sigma_{\max} = 304 \text{ MPa}$ rappresenta il punto di partenza nella scelta dei livelli di carico da applicare e deriva dal valor medio di resistenza a rottura meno la

deviazione standard ottenuto in prove di trazione su provini geometricamente analoghi (T-M77-CAS; $\sigma_{max} = 326 - 22$ MPa). La scelta di sottrarre la deviazione standard nasce allo scopo di considerare la condizione di carico meno stringente secondo i dati a disposizione.

La *Tabella 5.15* schematizza i risultati ottenuti nelle prove dinamiche. Esse sono state condotte su 26 provini più F-M77-CAS 01 utilizzato per il set-up della macchina di carico e non considerato come dato utile. Dalla σ_{max} , tramite il rapporto di carico $R=0.1$, sono stati ricavati i parametri relativi ai livelli di carico investigati.

A titolo di esempio viene riportato il procedimento seguito per ottenere i dati presenti in *Tabella 5.14* relativi al campione F-M77-CAS 02.

Partendo da:

$$\sigma_{max} = \sigma_r - Dev.Std = 326 - 22 = 304 \text{ MPa}$$

è stato scelto di testare, ad esempio, il 90% di σ_{max}

$$90\% \sigma_{max} = 273,6 \text{ MPa}$$

tramite

$$R = 0,1 = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{273,6}$$

è stato ottenuto

$$\sigma_{min} = 27,36 \text{ MPa}$$

e quindi

$$\sigma_{medio} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{273,6 + 27,36}{2} = 150,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{amp} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{273,6 - 27,36}{2} = 123,12 \text{ MPa}$$

Moltiplicando per l'area resistente ($w*t$), secondo le dimensioni dei campioni indicate nel *Capitolo 3*, sono stati ottenuti i dati presenti in *Tabella 5.14* da utilizzare nel software di controllo delle prove dinamiche: F_{max} , F_{min} , F_{medio} , F_{amp} . Nell'ultima colonna sono presenti i dati relativi al numero di cicli a rottura per ciascun provino testato.

Le percentuali scelte e su cui investigare maggiormente sono state 60%, 50%, 40%, 30% e 20% di σ_{max} . Il runout è stato fissato a 2×10^6 cicli.

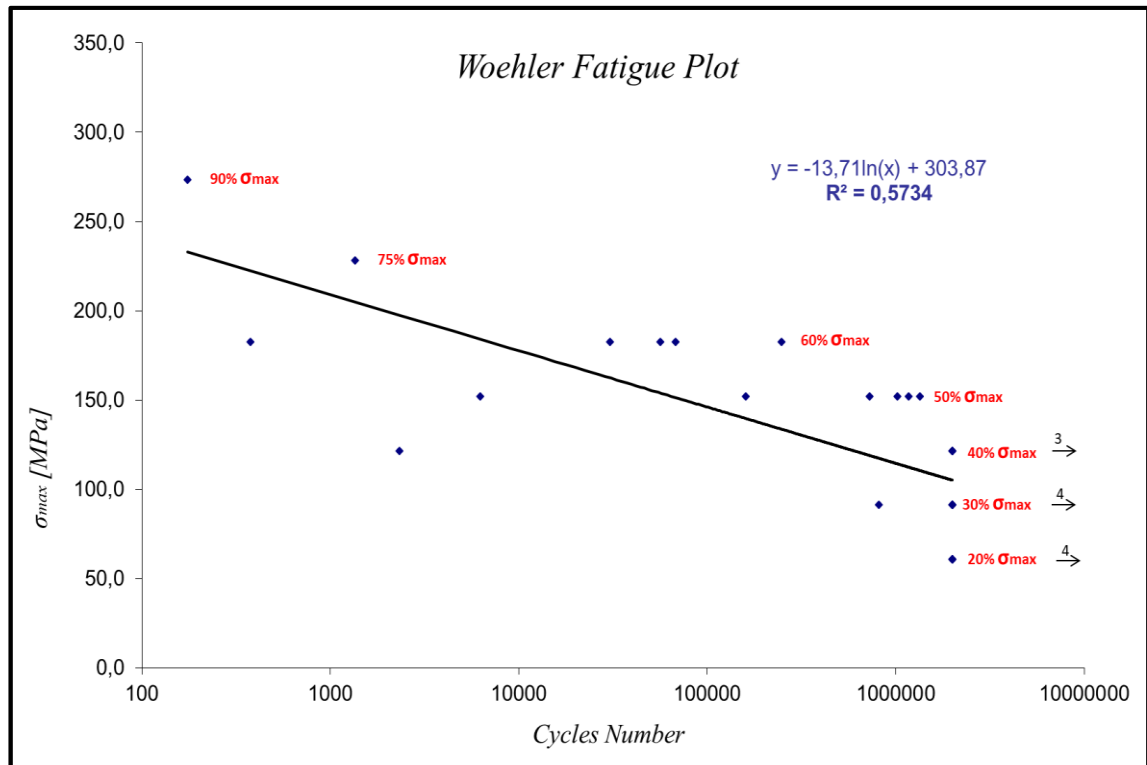


Figura 5.20: curva di Woehler per campioni F-M77-CAS 02-27.

La *Figura 5.20* illustra la curva di Woehler ottenuta dai test sui campioni F-M77-CAS 02-27, considerando il numero di cicli a rottura sull'asse delle ascisse e la σ_{max} sull'asse delle ordinate. Ogni indicatore nel grafico rappresenta un provino e per ogni serie di indicatori è indicata di fianco la % σ_{max} relativa. Alcuni punti nel grafico, in corrispondenza del runout, si sovrappongono: a tal proposito le frecce a destra stanno ad indicare il numero di provini in runout per quella percentuale di carico. L'indice R^2 è il coefficiente di determinazione. Esso indica la vicinanza dei punti rispetto alla retta che li interpola: più è alto migliore è la bontà della curva. In generale, questo coefficiente risulta soddisfacente se superiore a 0,9. In questo caso esso è pari a circa 0,6 e rispecchia quanto visibile nel grafico, ossia che i dati ottenuti hanno un'elevata dispersione. Ciò si traduce in numeri di cicli a rottura dei campioni, anche testati alle stesse condizioni di carico, in alcuni casi molto diversi tra loro. La dispersione dei dati e quindi l'andamento della curva segue la natura del materiale: la disposizione random delle fibre crea un'alta probabilità di avere nella stessa piastra provini con caratteristiche meccaniche differenti di cui è difficile prevedere il comportamento.

Dai risultati ottenuti è possibile osservare che:

- per il 20% della σ_{max} , che corrisponde ad una $\sigma_a = 27,36$ MPa, il 100% dei campioni testati è arrivato a runout (4 su 4);
- per il 30% della σ_{max} , che corrisponde ad una $\sigma_a = 41,04$ MPa, l'80% dei campioni testati è arrivato a runout (4 su 5);
- per il 40% della σ_{max} , che corrisponde ad una $\sigma_a = 54,72$ MPa, il 75% dei campioni testati è arrivato a runout (3 su 4);
- per il 50% della σ_{max} , che corrisponde ad una $\sigma_a = 68,40$ MPa, lo 0% dei campioni testati è arrivato a runout (0 su 6);

- per il 60% della σ_{\max} , che corrisponde ad una $\sigma_a = 82,08$ MPa, lo 0% dei campioni testati è arrivato a runout (0 su 5);

La σ_{\max} all'altezza del ginocchio della curva è di circa 110 MPa, a cui corrisponde una σ_{amp} a vita a fatica infinita di circa 50 MPa. È importante notare alcuni dati significativi che mettono in evidenza la dispersione dei dati dovuta alla randomicità del materiale: ad esempio i test eseguiti al 50% della σ_{\max} hanno evidenziato, nella maggior parte dei casi, una rottura mediamente intorno a 10^6 cicli eccetto che per i provini F-M77-CAS 05 e F-M77-CAS 14, i quali hanno esibito rottura rispettivamente a circa 6000 e 160000 cicli. Questo è un esempio che mette in evidenza come sia possibile avere dei campioni che, testati alle stesse condizioni, mostrino un comportamento meccanico a fatica completamente differente, probabilmente a causa della percentuale fibra/matrice e dell'orientamento delle fibre non controllabile durante il processo di produzione.

5.7.2 Analisi della rigidità durante i test dinamici

Un'ulteriore analisi è stata condotta sull'andamento della rigidità durante le prove di fatica. Dai dati in output dalla macchina di carico è stato possibile ricavare il valore di rigidità del materiale in vari istanti dei test dinamici. Correlando l'istante di tempo di acquisizione del dato al numero di cicli è stato possibile ricavare le curve illustrate nei grafici seguenti. Ad ogni istante di acquisizione è stato valutato il rapporto tra il valore della forza applicata dalla cella in corrispondenza del picco di oscillazione del carico e l'allungamento secondo la traversa, che corrisponde alla rigidità del materiale [N/mm]. Le curve illustrate presentano sull'asse delle ascisse il numero di cicli ad un dato istante normalizzato rispetto al numero di cicli a rottura (N/N_f), mentre sull'asse delle ordinate il valore di rigidità allo stesso istante normalizzato rispetto al valore di rigidità iniziale (K/K_0).

I dati sono poi stati elaborati allo scopo di ricavare il calo di rigidità percentuale dopo il 20%, tra il 20% e l'80% e tra l'80% e la fine della prova. Di conseguenza, dalla somma dei tre contributi è stato possibile risalire al calo totale di rigidità tra l'inizio e la fine della prova. I grafici e le tabelle seguenti si distinguono secondo un'analisi per livelli di carico applicati, runout/no runout e totalità delle prove.

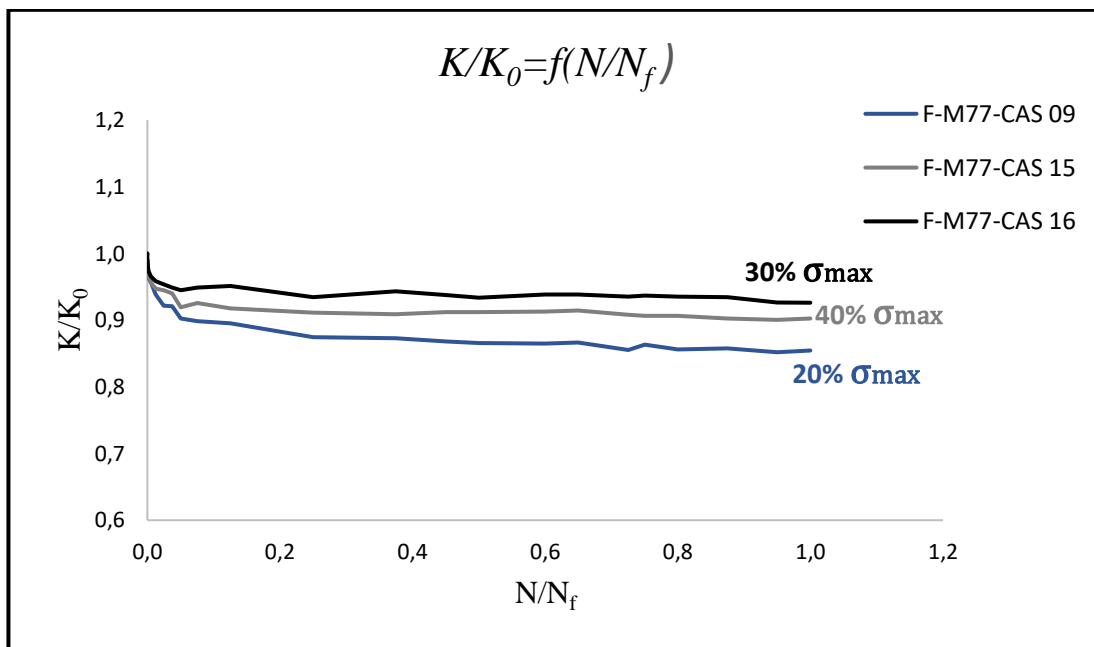


Figura 5.27: curve di rigidezza tipiche per campioni in runout.

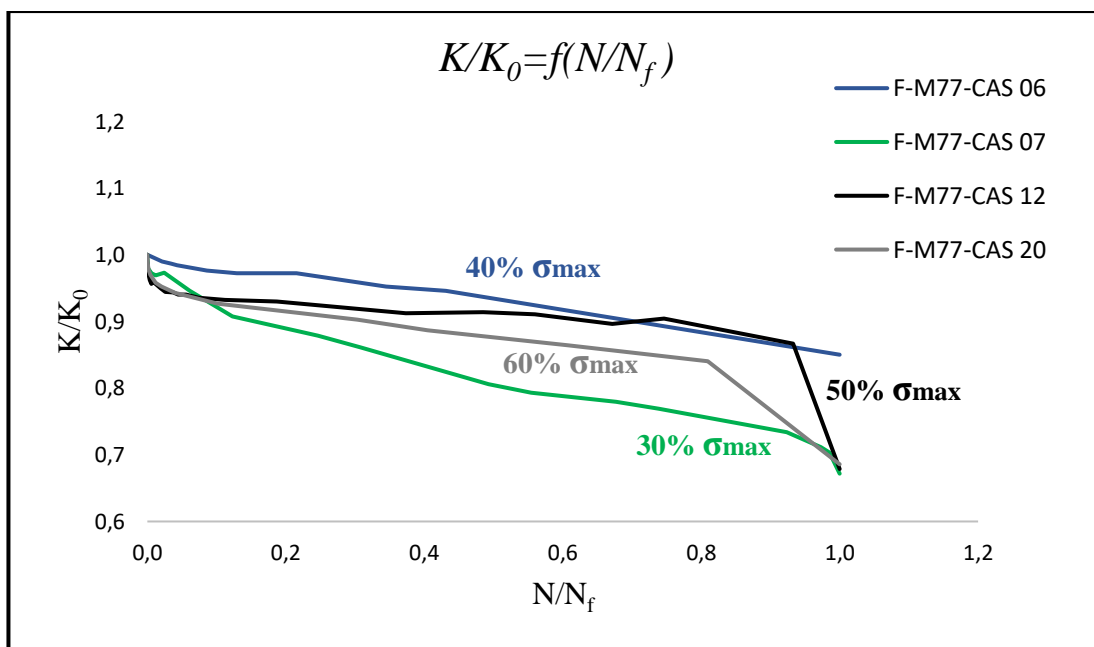


Figura 5.28: curve di rigidezza tipiche per campioni non in runout.

Le Figure 5.27 e 5.28 contengono alcune curve significative allo scopo di illustrare i due andamenti tipici della rigidezza rilevati durante i test di fatica. Il primo, tipico delle prove di fatica con runout e visibile in Figura 5.27, in cui si distingue una prima fase iniziale caratterizzata da un rapido calo della rigidezza ed una seconda fase che, fino a fine prova, manifesta un andamento costante della stessa. Il secondo, tipico delle prove di fatica in cui si registra una rottura prima del runout e visibile in Figura 5.28 (soprattutto nelle curve relative al 50% e 60% della σ_{max}), in cui si distinguono 3 fasi:

1. Rapido calo della rigidezza nella prima parte della vita a fatica (generalmente nel primo 10-20% della vita a fatica);
2. Andamento costante della rigidezza (generalmente tra il 20% e l'80% della vita a fatica);
3. Rapido calo della rigidezza negli istanti precedenti alla rottura (tipicamente tra l'80% della vita a fatica e la rottura).

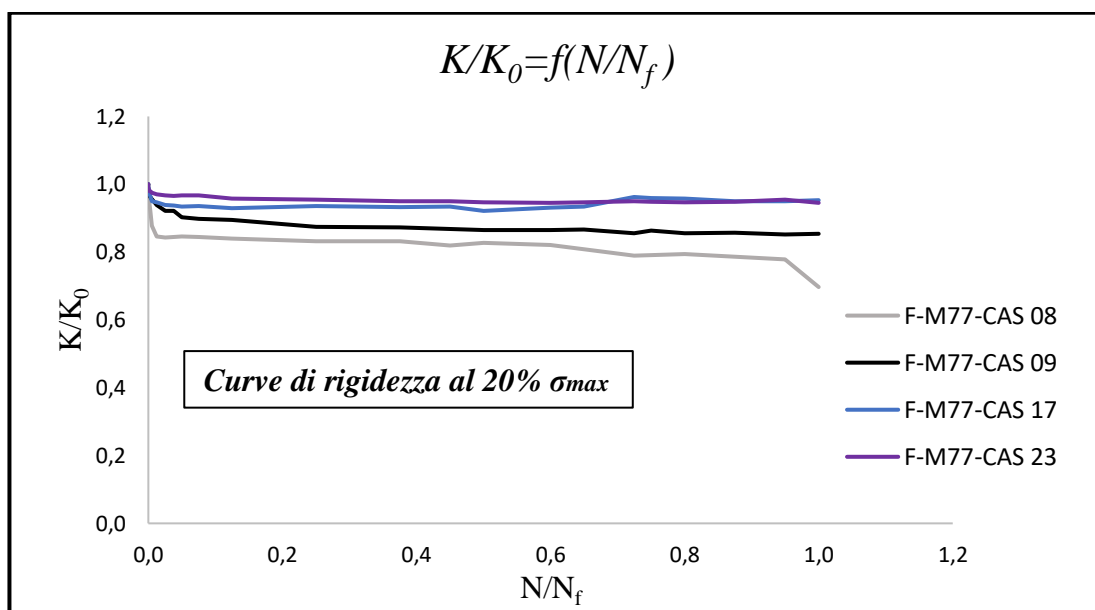


Figura 5.29: curve di rigidezza per test di fatica al 20% di σ_{max} .

La Figura 5.29 illustra l'andamento delle curve di rigidezza ricavate nei test a fatica condotti al 20% della σ_{max} . Come descritto nel paragrafo dedicato alla curva di Woehler, tutti i campioni testati in queste condizioni di carico sono arrivati a runout. Infatti, le curve mostrano il classico andamento a due fasi della rigidezza, quindi un rapido calo iniziale seguito da un andamento costante fino a fine prova. A differenza degli altri campioni, dal grafico è possibile notare come il provino F-M77-CAS 08 manifesti un ulteriore calo della rigidezza nella parte finale della prova pur non avendo avuto rottura.

ID	20%	20-80%	80%-end	end
F-M77-CAS 08	16,87	3,75	9,69	30,31
F-M77-CAS 09	12,54	1,89	0,13	14,55
F-M77-CAS 17	6,41	0,24	0,87	7,52
F-M77-CAS 23	4,47	0,87	0,38	5,72
Media	10,07	1,69	2,77	14,53
Dev.Std	5,69	1,54	4,62	11,19

Tabella 5.16: dati relativi al calo percentuale della rigidezza in test di fatica al 20% di σ_{max} .

La Tabella 5.16 riassume i dati numerici ricavati dalle curve di rigidezza e quindi il suo calo percentuale nel primo 20%, tra il 20-80% e tra l'80% e la fine della prova. E' possibile notare come la deviazione standard, in ognuno dei tre range considerati, sia abbastanza elevata rispetto alla media. Ciò è dovuto soprattutto al campione F-M77-CAS 08 che manifesta un comportamento anomalo rispetto agli altri campioni. Poiché i provini in questione hanno raggiunto il runout la fase

di maggior interesse risulta essere la prima, in cui si manifesta un calo medio di rigidità del 10,07% rispetto al valore iniziale. A fine prova, in queste condizioni di carico, il calo medio di rigidità è del 14,53% rispetto al valore iniziale, tenendo però in considerazione il dato anomalo in output per il provino F-M77-CAS 08 (30,31%). Nonostante le condizioni di carico fossero le stesse, i dati ottenuti confermano quanto già esposto per i test precedentemente descritti: la randomicità del materiale aumenta la probabilità di avere campioni della stessa geometria con caratteristiche meccaniche molto differenti ed un'alta dispersione di dati.

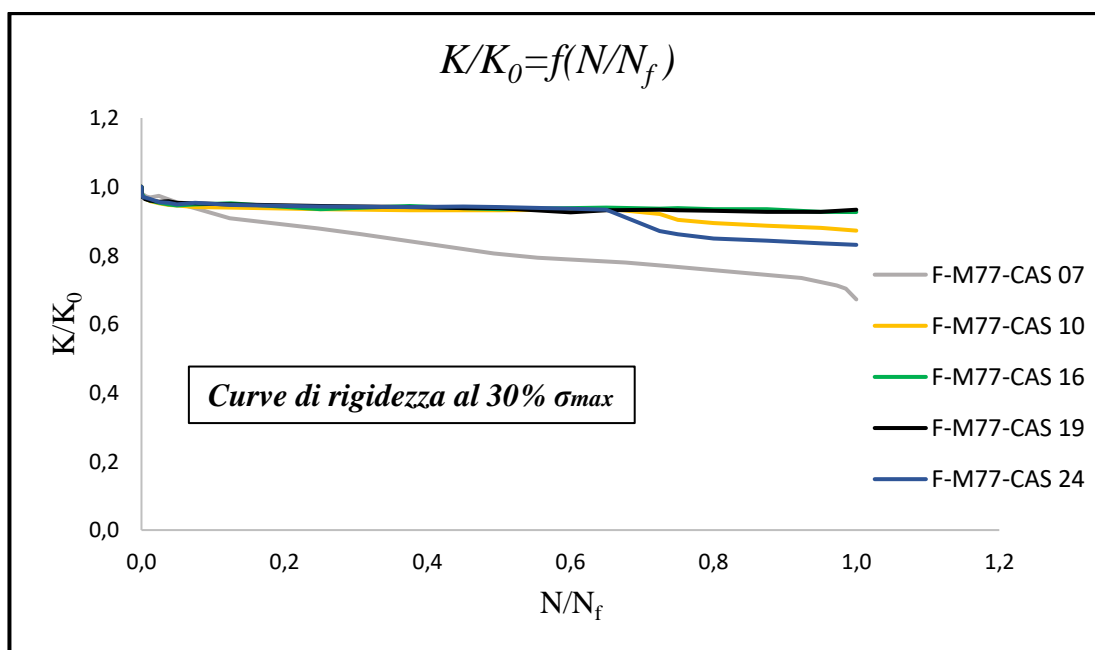


Figura 5.30: curve di rigidità per test di fatica al 30% di σ_{max} .

La Figura 5.30 illustra l'andamento delle curve di rigidità ricavate nei test a fatica condotti al 30% della σ_{max} . Come descritto nel paragrafo dedicato alla curva di Woehler, tutti i campioni testati in queste condizioni di carico sono arrivati a runout eccetto uno (F-M77-CAS 07). Infatti, le curve di rigidità manifestano il tipico andamento a due fasi ad eccezione del campione F-M77-CAS 07, in cui è visibile un calo di rigidità costante fino alla rottura. Anche il campione F-M77-CAS 24 presenta un'anomalia: nella parte centrale della prova si manifesta un'improvviso abbassamento della rigidità che poi torna ad essere costante fino a runout.

ID	20%	20-80%	80%-end	end
F-M77-CAS 07	12,14	10,99	9,70	32,83
F-M77-CAS 10	4,18	1,93	0,79	6,90
F-M77-CAS 16	6,59	0,77	0,02	7,38
F-M77-CAS 19	5,60	1,30	0,14	7,05
F-M77-CAS 24	5,85	0,88	4,05	10,78
Media	6,87	3,17	2,94	12,99
Dev.Std	3,07	4,39	4,12	11,20

Tabella 5.17: dati relativi al calo percentuale della rigidità in test di fatica al 30% di σ_{max} .

La Tabella 5.17 riassume i dati numerici ricavati dalle curve di rigidezza. Anche in questo caso è possibile notare come la deviazione standard, in ognuno dei tre range considerati, sia abbastanza elevata rispetto alla media. Ciò è sicuramente dovuto all'influenza del campione F-M77-CAS 07 che, a differenza degli altri, ha manifestato rottura. Infatti, escludendo questo dato, si avrebbe un calo medio di rigidezza nella prima fase di circa il 5,7% del valore iniziale con una deviazione standard nettamente inferiore. Inoltre, è possibile notare come il calo della rigidezza prima della rottura (80%-end) sia contenuto per i campioni che hanno manifestato runout (circa 1,5%) mentre sia più elevato nel caso di F-M77-CAS 07 (9,70%). Dalla tabella emerge un calo medio di rigidezza totale del 12,99% con un'elevata deviazione standard (11,20): anche questo dato è influenzato dal campione rotto (32,83%). Il fatto che per campioni testati alle stesse condizioni vi siano diversi comportamenti conferma che la randomicità del materiale è strettamente legata alla dispersione dei dati.

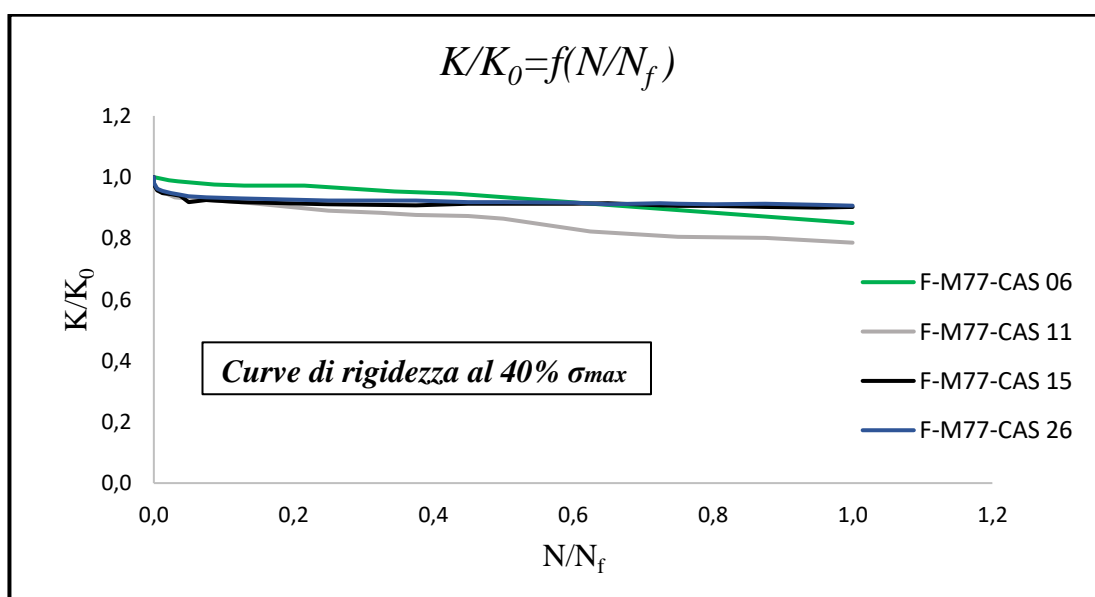


Figura 5.31: curve di rigidezza per test di fatica al 40% di σ_{max} .

La Figura 5.31 illustra l'andamento delle curve di rigidezza ricavate nei test a fatica condotti al 40% della σ_{max} . Tra i campioni considerati 3 sono arrivati a runout (F-M77-CAS 11-15-26) ed uno no (F-M77-CAS 06). E' da considerare il fatto che il campione F-M77-CAS 06 ha manifestato rottura dopo solo 2320 cicli probabilmente a causa di difettosità nella zona della piastra di riferimento dovute al processo di produzione e, che nonostante ciò, non manifesta un evidente andamento a tre fasi tipico.

ID	20%	20-80%	80%-end	end
F-M77-CAS 06	2,78	2,63	9,57	14,99
F-M77-CAS 11	11,04	8,44	1,95	21,43
F-M77-CAS 15	8,90	0,47	0,40	9,77
F-M77-CAS 26	7,60	1,19	0,80	9,59
Media	7,58	3,18	3,18	13,95
Dev.Std	3,50	3,62	4,31	5,58

Tabella 5.18: dati relativi al calo percentuale della rigidezza in test di fatica al 40% di σ_{max} .

La Tabella 5.18 riassume i dati ricavati dalle curve di rigidezza. Anche in questo caso è possibile notare come la deviazione standard, in ognuno dei tre range considerati, sia abbastanza elevata rispetto alla media. Ciò è sicuramente dovuto all'influenza del campione F-M77-CAS 06, i cui dati risultano anomali rispetto agli altri abbassando la media del calo di rigidezza nella prima fase e alzandola nell'ultima. A questo proposito sarebbe corretto considerare i dati senza 06: in questo modo si ottiene sia nella prima fase che nell'ultima una media rispettivamente di circa il 9% e di circa 1% ma soprattutto una deviazione standard inferiore che rende concordi i dati considerati. Un'altra particolarità riscontrabile dai dati in tabella è l'eccessivo calo di rigidezza del campione F-M77-CAS 11 nella seconda fase nonostante, avendo raggiunto il runout, avrebbe dovuto avere un andamento costante. La totalità della prova manifesta un calo medio di rigidezza del 13,95 % con una deviazione standard abbastanza elevata rispetto alla media. Anche in questo caso i dati sono difficilmente analizzabili in quanto i campioni manifestano comportamenti differenti seppur testati nelle stesse condizioni di carico. Ciò conferma, ancora una volta, quanto visto nelle precedenti analisi: la dispersione e l'incongruenza dei dati è indice di un materiale randomico che aumenta la possibilità di avere campioni di stessa geometria ma con diverse proprietà meccaniche.

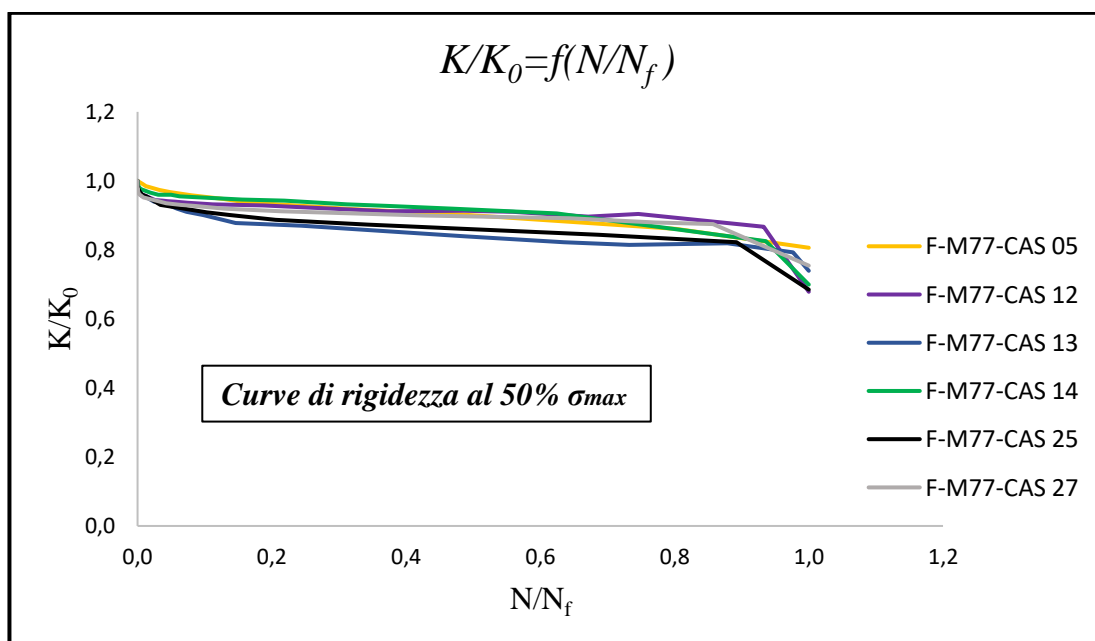


Figura 5.32: curve di rigidezza per test di fatica al 50% di σ_{max} .

La Figura 5.32 illustra l'andamento delle curve di rigidezza ricavate nei test a fatica condotti al 50% della σ_{max} . Tutti i campioni considerati hanno manifestato rottura prima di raggiungere il runout. L'andamento della rigidezza è conforme al comportamento mostrato, ossia presenta le tipiche tre fasi. In questo caso, sull'evoluzione delle curve non ci sono particolari anomalie da segnalare.

ID	20%	20-80%	80%-end	end
F-M77-CAS 05	6,11	7,80	5,46	19,37
F-M77-CAS 12	7,05	2,53	22,56	32,13
F-M77-CAS 13	13,04	5,07	7,94	26,05
F-M77-CAS 14	5,76	3,72	20,57	30,06
F-M77-CAS 25	11,35	4,20	15,96	31,51
F-M77-CAS 27	8,81	3,17	12,57	24,56
Media	8,69	4,42	14,18	27,28
Dev.Std	2,97	1,87	6,81	4,91

Tabella 5.19: dati relativi al calo percentuale della rigidezza in test di fatica al 50% di σ_{max} .

La Tabella 5.19 riassume i dati ricavati dalle curve di rigidezza. Poiché i campioni hanno manifestato lo stesso comportamento, ossia rottura prima del runout, i dati vengono considerati nella loro totalità. In questo caso, le fasi più importanti risultano essere la prima (20%) e la terza (80%-end), ossia quelle in cui si ha la più consistente diminuzione della rigidezza. Il calo medio della rigidezza nella prima fase è di circa l'8,7%, mentre negli istanti precedenti alla rottura di circa il 14,20 %. Alla fine della prova, nella totalità delle tre fasi, il calo di rigidezza medio risulta di circa il 27,3%. Rispetto alle condizioni di carico precedentemente testate le deviazioni standard risultano più contenute ed è anche visibile una concordanza dei dati, quindi una dispersione inferiore. Questa potrebbe essere dovuta al fatto che tutti i dati derivano da provini che hanno mostrato un comportamento simile. Le uniche anomalie da segnalare nei dati sono i cali di rigidezza ridotti nella terza fase per i provini F-M77-CAS 05 e F-M77-CAS 13 che abbassano la media generale. Nonostante i dati siano sostanzialmente concordi tra loro, le anomalie riscontrate confermano come la randomicità del materiale sia un fattore determinante nelle proprietà dello stesso.

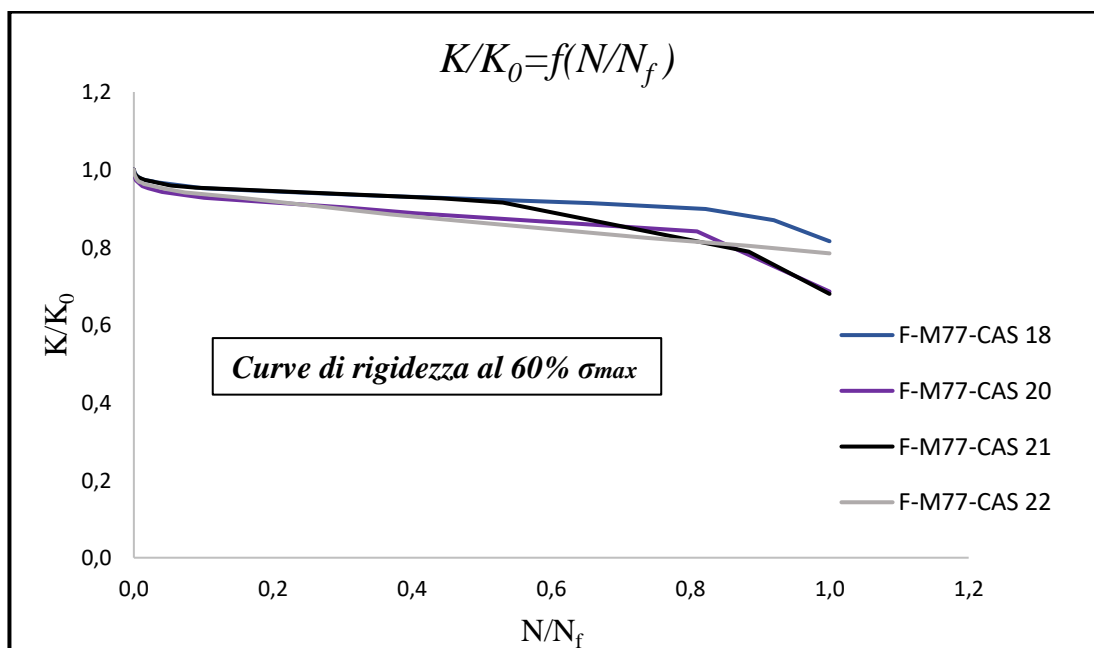


Figura 5.33: curve di rigidezza per test di fatica al 60% di σ_{max} .

La *Figura 5.33* illustra l'andamento delle curve di rigidezza ricavate nei test a fatica condotti al 60% della σ_{max} . Tutti i campioni considerati hanno manifestato rottura prima di raggiungere il runout. L'andamento della rigidezza è conforme al comportamento mostrato, ossia presenta le tipiche tre fasi. In questo caso, sull'evoluzione delle curve non ci sono particolari anomalie da segnalare se non per il campione F-M77-CAS 22 che non manifesta nell'andamento il tipico rapido calo nella terza fase.

ID	20%	20-80%	80%-end	end
F-M77-CAS 18	5,31	7,69	5,46	18,46
F-M77-CAS 20	8,55	7,40	15,47	31,42
F-M77-CAS 21	5,30	15,78	10,94	32,02
F-M77-CAS 22	7,11	10,47	4,01	21,58
Media	6,57	10,33	8,97	25,87
Dev.Std	1,57	3,88	5,26	6,88

Tabella 5.20: dati relativi al calo percentuale della rigidezza in test di fatica al 60% di σ_{max} .

La *Tabella 5.20* riassume i dati ricavati dalle curve di rigidezza. Poiché i campioni hanno manifestato lo stesso comportamento, ossia rottura prima del runout, i dati vengono considerati nella loro totalità. Anche in questo caso, le fasi più importanti risultano essere la prima (20%) e la terza (80%-end), ossia quelle in cui si ha la più consistente diminuzione di rigidezza. La situazione risulta analoga al caso precedente. Il calo medio della rigidezza nella prima fase è del 6,57%, mentre negli istanti precedenti la rottura di circa il 9%. Alla fine della prova, nella totalità delle 3 fasi, la diminuzione media della rigidezza risulta di circa il 25,9%. Rispetto alle condizioni di carico precedentemente testate le deviazioni standard risultano più contenute ed è anche visibile una concordanza dei dati, quindi una dispersione inferiore. Questa potrebbe essere dovuta al fatto che tutti i dati derivano da provini che hanno mostrato un comportamento simile. Il calo di rigidezza totale risulta simile a quello manifestato nel caso precedente. Le uniche anomalie da segnalare sono i cali di rigidezza ridotti nella terza fase per i provini F-M77-CAS 18 e F-M77-CAS 22 che abbassano la media generale e, in particolare, che la media nella seconda fase è superiore a quella della terza. Nonostante la sostanziale concordanza tra i dati, anche in questo caso risultano influenzati dalla randomicità del materiale.

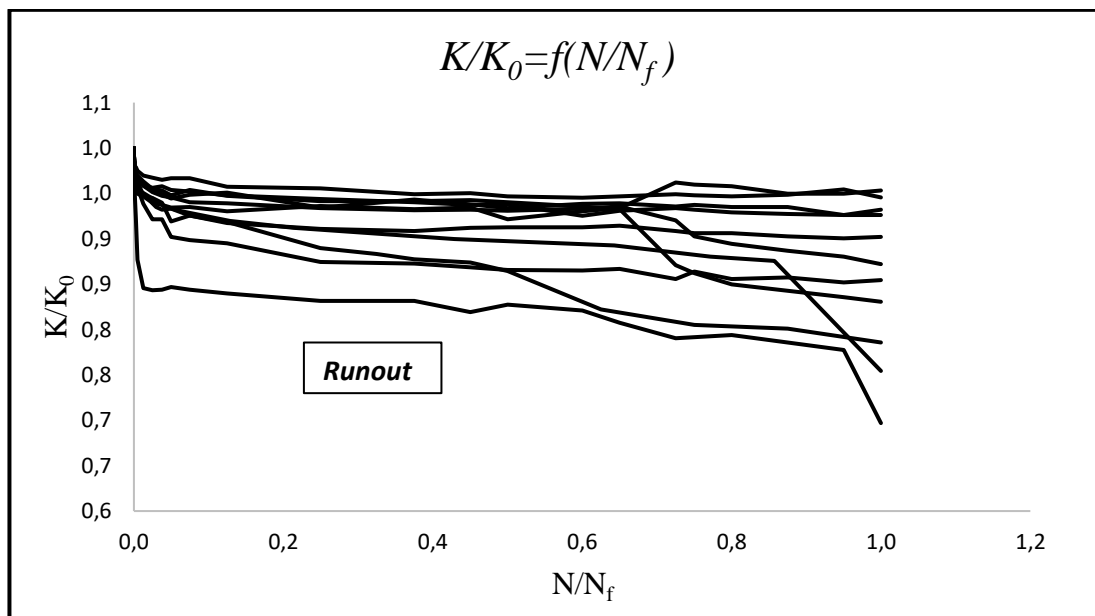


Figura 5.34: curve di rigidezza per test di fatica su campioni in runout.

La Figura 5.34 illustra l'andamento delle curve di rigidezza durante i test di fatica sui campioni che non hanno manifestato rottura fino a runout. Ad eccezione di un paio di casi, gli andamenti risultano tipici di questo comportamento e presentano due fasi principali: un rapido calo della rigidezza seguito da un andamento costante fino a runout.

ID campione	20%	20-80%	80%- end	end
F-M77-CAS 08	16,87	3,75	9,69	30,31
F-M77-CAS 09	12,54	1,89	0,13	14,55
F-M77-CAS 10	4,18	1,93	0,79	6,90
F-M77-CAS 11	11,04	8,44	1,95	21,43
F-M77-CAS 15	8,90	0,47	0,40	9,77
F-M77-CAS 16	6,59	0,77	0,02	7,38
F-M77-CAS 17	6,41	0,24	0,87	7,52
F-M77-CAS 19	5,60	1,30	0,14	7,05
F-M77-CAS 23	4,47	0,87	0,38	5,72
F-M77-CAS 24	5,85	0,88	4,05	10,78
F-M77-CAS 27	8,81	3,17	12,57	24,56
Media	8,30	2,16	2,82	13,27
Dev. Std	3,88	2,36	4,32	8,42

Tabella 5.21: dati relativi al calo percentuale della rigidezza in test di fatica su campioni in runout.

La Tabella 5.21 riassume i dati ottenuti dalle curve di rigidezza dei campioni arrivati a runout. Poiché i campioni considerati hanno manifestato lo stesso comportamento è possibile confrontare in egual modo la totalità dei dati. In questo caso, la prima fase è quella che assume maggior rilevanza poiché si manifesta la maggior diminuzione della rigidezza. Infatti, dai dati è possibile notare come per la seconda e la terza fase il calo sia sostanzialmente contenuto (rispettivamente

2,16% e 2,82%) mentre nella prima fase la media sia pari a 8,3%. Le deviazioni standard ottenute per ogni fase risultano elevate e, se rapportate ai rispettivi valori medi di riferimento, ciò si traduce in un'elevata dispersione dei dati. E' visibile come nella prima fase siano presenti valori percentuali dal 17% (F-M77-CAS 08) al 4,2% (F-M77-CAS 10), a conferma di dati dispersi influenzati dalla natura del materiale, la quale rende difficile prevedere il comportamento dei campioni. Nonostante tutti abbiano raggiunto il runout, i campioni F-M77-CAS 08 e F-M77-CAS 27 mostrano un calo di rigidezza eccessivo che aumenta notevolmente la deviazione standard della terza fase. Nella totalità della prova comunque il calo di rigidezza risulta sostanzialmente contenuto e pari al 13,27% del valore iniziale. Come conseguenza di quanto descritto, anche quest'ultimo dato presenta un'elevata deviazione standard che si traduce in un alto coefficiente di variazione e quindi in un'alta dispersione. Inoltre, è da notare come alcuni dati nella seconda e terza fase portano ad avere deviazioni standard superiori al valor medio e quindi coefficienti di variazione superiori al 100%. Tendenzialmente, non considerando le anomalie descritte, i dati risultano concordi, ma la loro presenza testimonia ancora una volta come la natura randomica del materiale ne renda difficilmente prevedibile il comportamento.

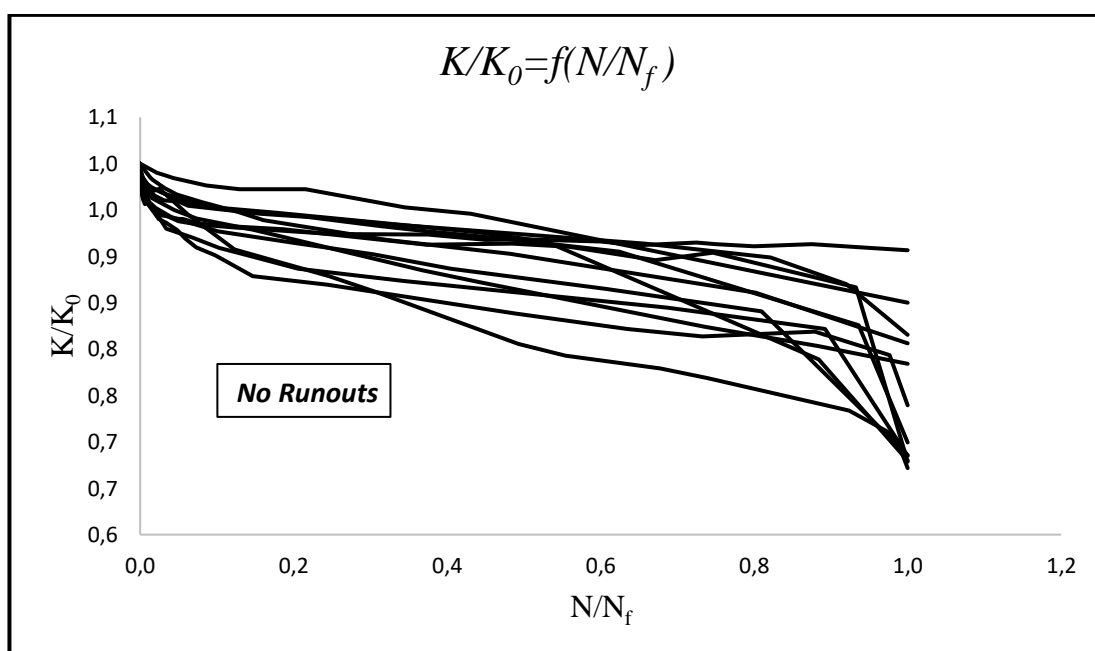


Figura 5.35: curve di rigidezza per test di fatica su campioni non in runout.

La Figura 5.35 illustra l'andamento delle curve di rigidezza durante i test di fatica sui campioni che hanno manifestato rottura prima di raggiungere il runout. Ad eccezione di qualche caso, in cui non è ben visibile il rapido calo della rigidezza prima della rottura, gli andamenti risultano tipici di questo comportamento e presentano 3 fasi principali: una diminuzione iniziale, un andamento costante e un rapido calo della rigidezza fino a rottura.

ID	20%	20-80%	80%- end	end
F-M77-CAS 05	6,11	7,80	5,46	19,37
F-M77-CAS 06	2,78	2,63	9,57	14,99
F-M77-CAS 07	12,14	10,99	9,70	32,83
F-M77-CAS 12	7,05	2,53	22,56	32,13
F-M77-CAS 13	13,04	5,07	7,94	26,05
F-M77-CAS 14	5,76	3,72	20,57	30,06
F-M77-CAS 18	5,31	7,69	5,46	18,46
F-M77-CAS 20	8,55	7,40	15,47	31,42
F-M77-CAS 21	5,30	15,78	10,94	32,02
F-M77-CAS 22	7,11	10,47	4,01	21,58
F-M77-CAS 25	11,35	4,20	15,96	31,51
F-M77-CAS 26	7,60	1,19	0,80	9,59
Media	7,67	6,62	10,70	25,00
Dev.Std	3,09	4,26	6,72	7,95

Tabella 5.22: dati relativi al calo percentuale della rigidità in test di fatica su campioni non in runout.

La Tabella 5.22 riassume i dati ottenuti dalle curve di rigidità dei campioni che non hanno raggiunto il runout. Poiché i campioni considerati hanno manifestato lo stesso comportamento è possibile confrontare in egual modo la totalità dei dati. In questo caso, le fasi che assumono più rilevanza e in cui si manifesta la maggior diminuzione della rigidità sono la prima e la terza: ciò è confermato da quanto riassunto in Tabella 5.22 per cui la media delle due fasi menzionate risulta essere rispettivamente del 7,67% e 10,7%, a differenza della seconda fase in cui la media è inferiore e pari a 6,62%. Questi risultati sono in linea con quanto previsto dalla teoria e dall'esperienza sull'andamento a 3 fasi della rigidità in caso di rottura. Nonostante tutti i campioni abbiano raggiunto la rottura, è visibile come nella terza fase vi siano provini che hanno manifestato un calo di rigidità pari a 0,8% (F-M77-CAS 26) a conferma di un dato disperso e influenzato dalla natura del materiale. Nella totalità della prova la diminuzione media della rigidità risulta comunque elevata e pari al 25%. In tutte le fasi, è riscontrabile un'elevata deviazione standard che, rapportata al valor medio ottenuto, si traduce in alti coefficienti di variazione e quindi alte dispersione dei dati. A differenza del caso in cui in tutti i campioni hanno manifestato runout, i coefficienti di variazione non superano mai il 100%. Tendenzialmente, non considerando le anomalie descritte, la maggior parte dei dati risulta concorde ma la loro presenza testimonia di nuovo come la natura randomica del materiale ne renda difficilmente prevedibile il comportamento.

ID	20%	20-80%	80%- end	end
F-M77-CAS 05	6,11	7,80	5,46	19,37
F-M77-CAS 06	2,78	2,63	9,57	14,99
F-M77-CAS 07	12,14	10,99	9,70	32,83
F-M77-CAS 08	16,87	3,75	9,69	30,31
F-M77-CAS 09	12,54	1,89	0,13	14,55
F-M77-CAS 10	4,18	1,93	0,79	6,90
F-M77-CAS 11	11,04	8,44	1,95	21,43
F-M77-CAS 12	7,05	2,53	22,56	32,13
F-M77-CAS 13	13,04	5,07	7,94	26,05
F-M77-CAS 14	5,76	3,72	20,57	30,06
F-M77-CAS 15	8,90	0,47	0,40	9,77
F-M77-CAS 16	6,59	0,77	0,02	7,38
F-M77-CAS 17	6,41	0,24	0,87	7,52
F-M77-CAS 18	5,31	7,69	5,46	18,46
F-M77-CAS 19	5,60	1,30	0,14	7,05
F-M77-CAS 20	8,55	7,40	15,47	31,42
F-M77-CAS 21	5,30	15,78	10,94	32,02
F-M77-CAS 22	7,11	10,47	4,01	21,58
F-M77-CAS 23	4,47	0,87	0,38	5,72
F-M77-CAS 24	5,85	0,88	4,05	10,78
F-M77-CAS 25	11,35	4,20	15,96	31,51
F-M77-CAS 26	7,60	1,19	0,80	9,59
F-M77-CAS 27	8,81	3,17	12,57	24,56
Media	7,97	4,49	6,93	19,39
Dev.Std	3,42	4,10	6,87	9,99

Tabella 5.23: dati relativi al calo percentuale della rigidezza in test di fatica su tutti i campioni.

La Tabella 5.23 illustra la totalità dei dati senza distinzioni tra condizioni di carico e comportamenti. Da questi è possibile osservare come la maggior diminuzione media della rigidezza si ottenga nella prima e nella terza fase della prova e che il materiale, durante tutta la prova, perda mediamente circa il 19,5% della propria rigidezza. Globalmente, le deviazioni standard e i loro rapporti con i valori medi (CoV%) sono elevati: la natura randomica del materiale ne rende difficile la comprensione del comportamento.

5.8 Osservazioni riassuntive Woehler e andamenti della rigidezza nei test dinamici

Dall'analisi dei livelli di carico investigati è stato possibile notare come, al 20%,30% e 40% di σ_{\max} la quasi totalità dei campioni abbia manifestato runout mentre, al 50% e al 60% di σ_{\max} la totalità dei campioni sia arrivato a rottura. Ciò si traduce in un valore della σ_{\max} corrispondente al ginocchio della curva di Woehler (vita infinita) di circa 110MPa. Inoltre, è stato possibile riscontrare come il coefficiente di determinazione della curva ($R^2=0,6$) sia di molto inferiore al valore minimo (0,9) affinché essa possa essere considerata affidabile. Questo testimonia come la

natura randomica del materiale porti l'ottenimento di dati, in alcuni casi, molto dispersi e differenti tra loro.

L'analisi sulla rigidezza ha messo in evidenza un andamento della stessa concorde con quanto presente in letteratura^[4]: l'andamento a tre fasi per i campioni che hanno manifestato rottura e quello a due fasi per i campioni che sono giunti a runout. I dati ottenuti dall'analisi svolta distinguendo le condizioni di carico ha portato alle seguenti osservazioni:

- per i campioni che hanno raggiunto il runout (20%,30%,40% di σ_{max}) la diminuzione di rigidezza nella prima fase risulta fundamentalmente costante e di circa il 9% rispetto al valore iniziale, mentre nella seconda e nella terza fase risulta crescente con l'aumento della percentuale di carico;
- per i campioni che hanno manifestato rottura (50% e 60% di σ_{max}) la diminuzione di rigidezza nella prima fase è sostanzialmente costante e di circa l'8% rispetto al valore iniziale, ma nella seconda e nella terza fase non risulta legata alla condizione di carico;

Da queste osservazioni è possibile affermare che, nella prima fase, indipendentemente dalla percentuale di carico, la diminuzione media della rigidezza risulta sostanzialmente costante. La seconda e la terza fase risultano legate alla condizione di carico solo per i campioni che hanno raggiunto il runout: in questo caso la diminuzione media della rigidezza risulta crescente con la percentuale di carico. Per i campioni giunti a rottura la seconda e la terza fase non risultano connesse alla percentuale di carico. In particolare, nei test al 50% di σ_{max} , rispetto a quelli al 60%, la diminuzione media di rigidezza risulta minore nella seconda fase e maggiore nella terza. In ogni caso, il calo medio di rigidezza è risultato essere predominante nella terza fase per i campioni che sono giunti a rottura, mentre nella prima fase per i campioni che hanno raggiunto il runout. In particolare, nei test al 60% di σ_{max} , la diminuzione di rigidezza nella seconda fase è superiore a quella nella terza.

Distinguendo l'analisi per comportamento (runout/rottura) è stata confermata la tendenza degli andamenti. Considerando la totalità delle prove, la diminuzione media della rigidezza dei campioni giunti a rottura è risultata essere il doppio di quella dei campioni che hanno raggiunto il runout (rispettivamente 25% e 13,27%).

In tutte le analisi sono state riscontrate delle anomalie che hanno influenzato la media e dato origine ad elevate deviazioni standard. Ciò si è tradotto in elevati coefficienti di variazione e quindi in un'ampia dispersione dei dati ottenuti. La causa di questa dispersione è strettamente legata alla natura del materiale. L'orientamento randomico delle fibre, la percentuale fibra/matrice differente nelle varie zone delle piastre non controllabile durante il processo di produzione, danno origine a provini geometricamente analoghi che, pur testati nelle stesse condizioni di carico mostrano comportamenti meccanici differenti. La scarsa padronanza in fase di produzione dei parametri che influenzano i dati rende quindi difficile prevedere ed analizzare con precisione il comportamento del materiale.

5.9 Analisi dei test dinamici tramite termografia e limite di fatica

L'analisi sui test dinamici è proseguita utilizzando la termografia allo scopo di monitorare l'andamento della temperatura e collegarla al limite di fatica. Le prove sono state eseguite analogamente ai casi precedenti, in accordo con la normativa ASTM D 3479 su provini di larghezza 25 mm secondo le procedure di preparazione dei provini, i parametri e le condizioni, la strumentazione illustrate nel *Capitolo 3.7.1* dedicato.

Tipicamente, l'andamento della temperatura in una prova di fatica si compone di tre fasi principali. La prima fase prevede un rapido incremento della temperatura che, tendenzialmente, si manifesta tra il 5 e il 10% della vita a fatica. La seconda fase, che si estende per gran parte della vita a fatica, prevede una stabilizzazione costante della temperatura: il campione in esame e l'ambiente circostante raggiungono l'equilibrio termico. Infine, la terza fase, che si manifesta in prossimità della frattura, prevede un rapido incremento della temperatura. Per i campioni che raggiungono il runout non è teoricamente prevista la presenza di una terza fase significativa. La *Figura 5.36* presenta esempi illustrativi del tipico andamento a tre fasi della temperatura durante un test dinamico.

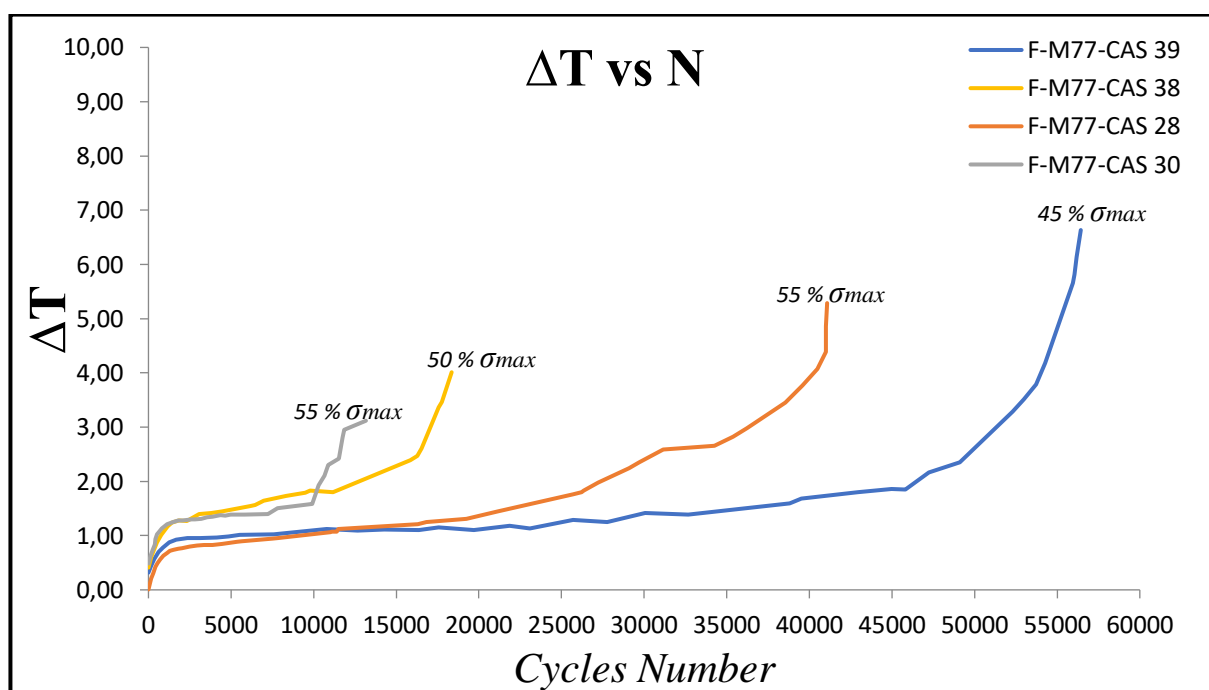


Figura 5.36: andamento a tre fasi della temperatura durante un test dinamico.

In *Figura 5.36* è possibile notare come, indipendentemente dal livello di carico considerato, la temperatura segue l'andamento a tre fasi precedentemente descritto.

L'analisi delle prove di fatica tramite l'ausilio della termografia è stata condotta secondo due metodi allo scopo di generare un confronto. Il primo ha previsto l'utilizzo di n provini, ognuno corrispondente ad un certo livello di carico e ad un singolo dato termico. Il secondo ha previsto l'utilizzo di un solo campione testato secondo una prova di fatica ad ampiezza variabile. Le curve ottenute correlano il numero di cicli al ΔT_s , ottenuto come differenza tra la temperatura superficiale

del campione testato e la temperatura superficiale del campione di riferimento, allo scopo di depurare i dati dalle condizioni ambientali del laboratorio. I dati si riferiscono ad una media delle temperature locali eseguita dal software sull'area di una faccia del campione.

Per ogni campione, se il livello di carico è né eccessivamente alto né eccessivamente basso, la curva di temperatura presenta una fase di stabilizzazione ad uno specifico ΔT_s , parametro fondamentale dell'analisi in questione secondo quanto descritto nel paragrafo dedicato del *Capitolo 4*.

5.9.1 Metodo *n* provini

Con questo metodo è stato valutato l'andamento della temperatura su un certo numero di provini, testati separatamente a diversi livelli di carico. Ogni provino costituisce un dato termico. Per rendere maggiormente affidabile l'analisi, per ogni livello di carico, sono stati testati minimo due campioni, ad eccezione del 52%, 63% e 65% della σ_{max} : questi livelli di carico sono stati analizzati soltanto per avere una conferma di quanto ottenuto.

L'andamento della temperatura è stato monitorato in real time fino alla stabilizzazione della stessa. I ΔT_s sono stati ottenuti da test condotti a livelli di carico progressivi, dal 35% al 60% della σ_{max} , tra i quali è stato possibile individuare quello corrispondente al limite di fatica. In alcuni casi, grazie alla possibilità del software FLIR di monitorare la temperatura in tempo reale, non è stato necessario attendere la fine della prova ma è stato possibile interrompere il test una volta raggiunta la temperatura di stabilizzazione, guadagnando ulteriore tempo. L'acquisizione è stata effettuata registrando filmati tramite la termocamera a certi intervalli di tempo: il valore del ΔT_s è il risultato dell'interpolazione dei dati relativi alle fasi di stabilizzazione della temperatura visibili nei grafici seguenti. Le curve sono il risultato della congiunzione dei dati ricavati da ogni filmato, della durata di 17,5 secondi (40 fps per 700 frames).

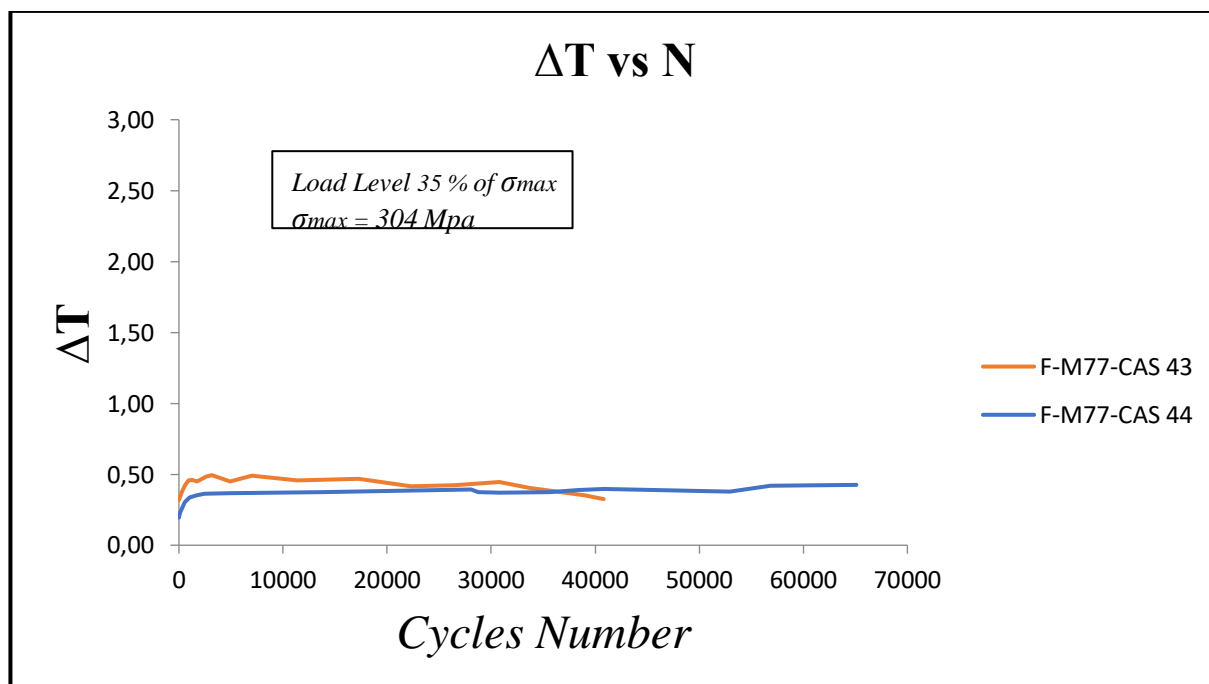


Figura 5.37: curve di temperatura per campioni F-M77-CAS 43 e F-M77-CAS 44 (35% di σ_{max}).

La Figura 5.37 illustra le curve di temperatura ottenute per i campioni F-M77-CAS 43 e F-M77-CAS 44 testati ad un livello di carico pari al 35% della σ_{max} . Le prove sono state interrotte dopo un certo numero di cicli dalla stabilizzazione della temperatura, parametro di interesse e necessario per questa analisi. Dal grafico, è possibile notare l'aumento di temperatura nella prima fase e l'andamento costante della stessa una volta raggiunto l'equilibrio termico.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 43	304	35	3,274	25,02	81,92	3922,51	47,88	0,44
F-M77-CAS 44	304	35	3,279	25,08	82,25	3937,92	47,88	0,38

Tabella 5.24: dati ricavati dalle curve di temperatura al 35% di σ_{max} .

La Tabella 5.24 riassume i dati ricavati dalle curve di temperatura per i campioni F-M77-CAS 43 e F-M77-CAS 44. Dall'interpolazione delle curve in Figura 5.37 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT pari a 0,44 per il campione F-M77-CAS 43 e 0,38 per il campione F-M77-CAS 44. I valori ottenuti del ΔT_s per i due campioni risultano sostanzialmente concordi tra loro.

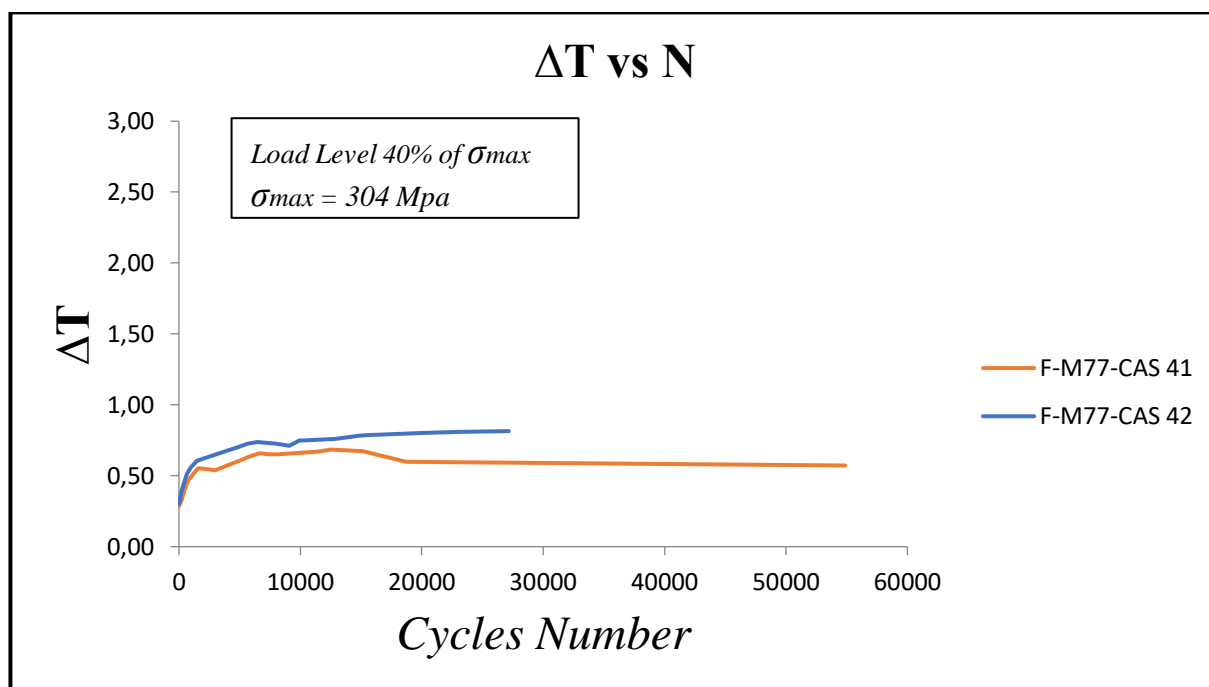


Figura 5.38: curve di temperatura per campioni F-M77-CAS 41 e F-M77-CAS 42 (40% di σ_{max}).

La Figura 5.38 illustra le curve di temperatura ottenute per i campioni F-M77-CAS 41 e F-M77-CAS 42 testati ad un livello di carico pari al 40% della σ_{max} . Anche in questo caso, le prove sono state interrotte dopo un certo numero di cicli dalla stabilizzazione della temperatura, parametro di interesse e necessario per questa analisi. Dal grafico, è possibile notare l'aumento di temperatura nella prima fase e l'andamento costante della stessa una volta raggiunto l'equilibrio termico.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 41	304	40	3,231	25,07	81,01	4432,84	54,72	0,62
F-M77-CAS 42	304	40	3,253	25,05	81,49	4459,00	54,72	0,75

Tabella 5.25: dati ricavati dalle curve di temperatura al 40% di σ_{max} .

La Tabella 5.25 riassume i dati ricavati dalle curve di temperatura per i campioni F-M77-CAS 41 e F-M77-CAS 42. Dall'interpolazione delle curve in Figura 5.38 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 0,62 per il campione F-M77-CAS 41 e 0,75 per il campione F-M77-CAS 42. I valori ottenuti del ΔT_s per i due campioni risultano sostanzialmente concordi tra loro e superiori a quelli ottenuti nel caso precedente.

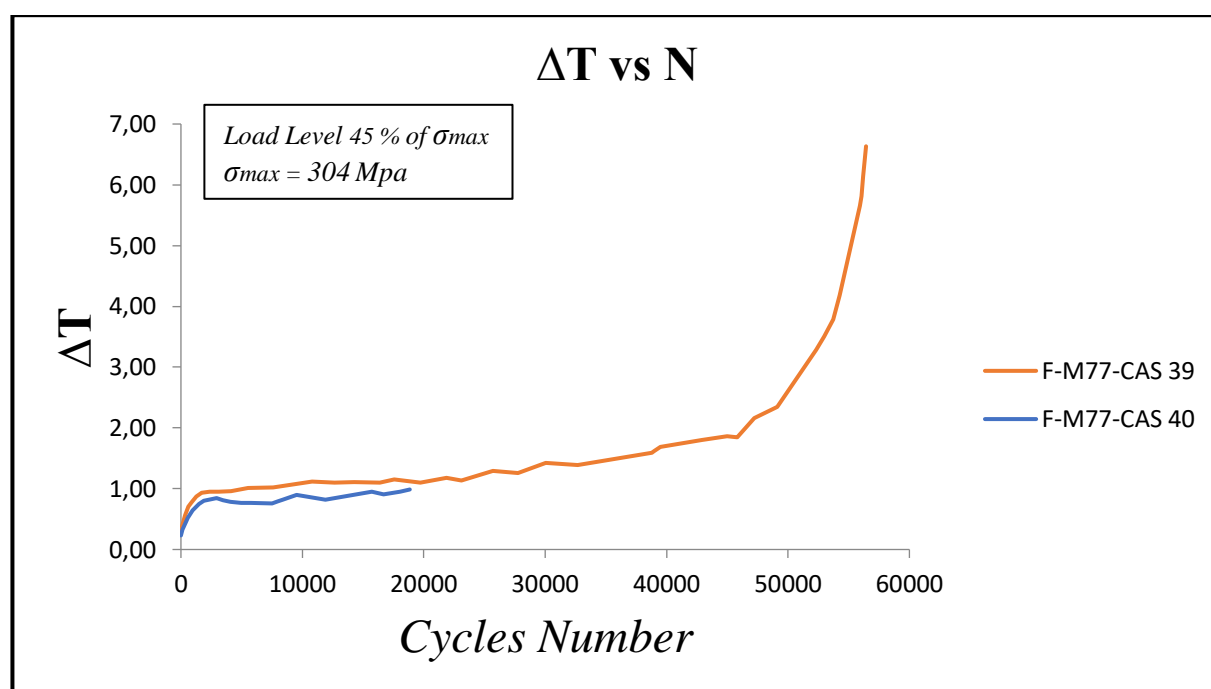


Figura 5.39: curve di temperatura per campioni F-M77-CAS 39 e F-M77-CAS 40 (45% di σ_{max}).

La Figura 5.39 illustra le curve di temperatura ottenute per i campioni F-M77-CAS 39 e F-M77-CAS 40 testati ad un livello di carico pari al 45% della σ_{max} . La prova relativa al campione F-M77-CAS 40 è stata interrotta dopo un certo numero di cicli dal raggiungimento della temperatura di stabilizzazione come visibile dal grafico. Il provino F-M77-CAS 39 invece, è stato testato fino a rottura: è possibile notare dal grafico, infatti, il tipico andamento a tre fasi della temperatura.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 39	304	45	3,177	25,04	79,56	4897,74	61,56	1,11
F-M77-CAS 40	304	45	3,196	25,00	79,90	4918,64	61,56	0,82

Tabella 5.26: dati ricavati dalle curve di temperatura al 45% di σ_{max} .

La Tabella 5.26 riassume i dati ricavati dalle curve di temperatura per i campioni F-M77-CAS 39 e F-M77-CAS 40. Dall'interpolazione delle curve in Figura 5.39 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 1,11 per il campione F-M77-CAS 39 e 0,82 per il campione F-M77-CAS 40. I valori ottenuti del ΔT_s per i due campioni risultano meno concordi tra loro rispetto ai casi precedenti. Il rischio nell'utilizzo di ogni campione come singolo dato termico è quello di avere una variabilità nei dati dovuta alla randomicità del materiale e quindi alla possibilità di avere campioni geometricamente analoghi ma con proprietà meccaniche e termiche differenti. I ΔT_s calcolati risultano comunque superiori a quelli ottenuti nel caso precedente.

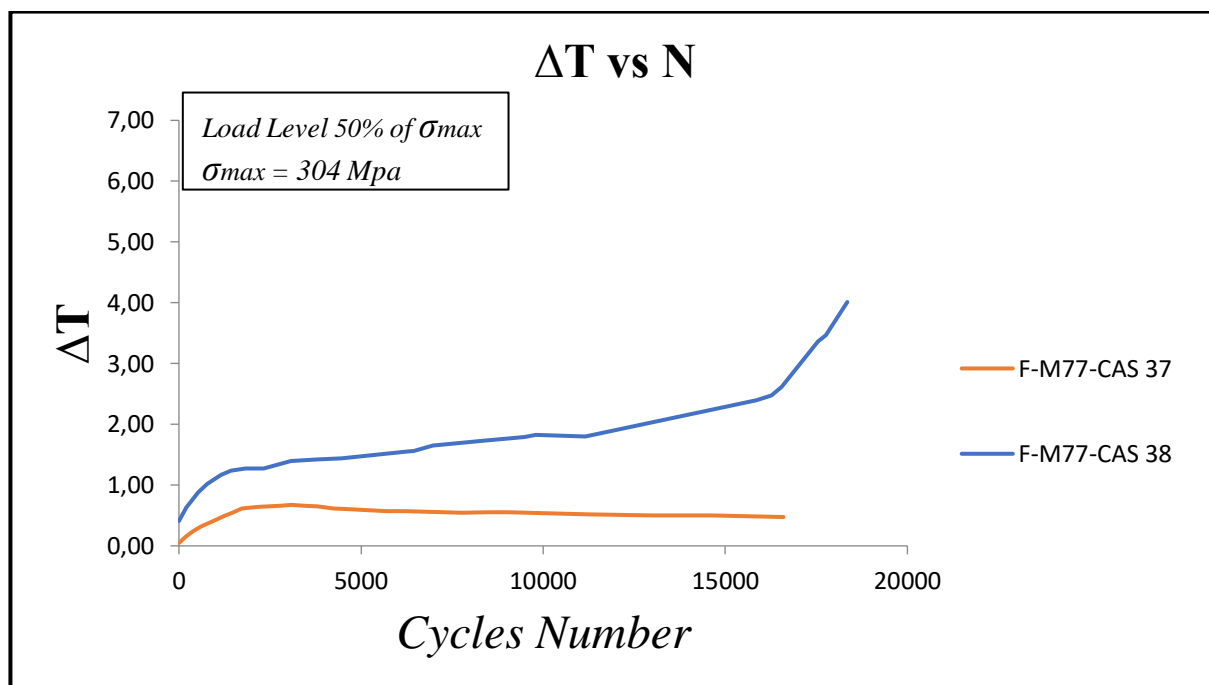


Figura 5.40: curve di temperatura per campioni F-M77-CAS 37 e F-M77-CAS 38 (50% di σ_{max}).

La Figura 5.40 illustra le curve di temperatura ottenute per i campioni F-M77-CAS 37 e F-M77-CAS 38 testati ad un livello di carico pari al 50% della σ_{max} . La prova relativa al campione F-M77-CAS 37 è stata interrotta dopo un certo numero di cicli dal raggiungimento della temperatura di stabilizzazione come visibile dal grafico. Il provino F-M77-CAS 38 invece, è stato testato fino a rottura: è possibile notare dal grafico, infatti, il tipico andamento a tre fasi della temperatura.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 37	304	50	3,174	25,04	79,47	5435,65	68,40	0,58
F-M77-CAS 38	304	50	3,170	25,05	79,42	5432,11	68,40	1,56

Tabella 5.27: dati ricavati dalle curve di temperatura al 50% di σ_{max} .

La Tabella 5.27 riassume i dati ricavati dalle curve di temperatura per i campioni F-M77-CAS 37 e F-M77-CAS 38. Dall'interpolazione delle curve in Figura 5.40 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 0,58 per il campione F-M77-CAS 37 e 1,56 per il campione F-M77-CAS 38. I valori ottenuti del ΔT_s

per i due campioni risultano discordanti tra loro rispetto ai casi precedenti. Questo è dovuto al fatto che le caratteristiche termiche e meccaniche dei singoli provini sono strettamente legate alla natura del materiale. L'orientamento e la percentuale delle fibre nelle varie zone della piastra non è controllabile durante il processo di produzione: questo porta ad ottenere campioni dalle caratteristiche diverse che danno origine, in alcuni casi, ad un'elevata dispersione dei dati.

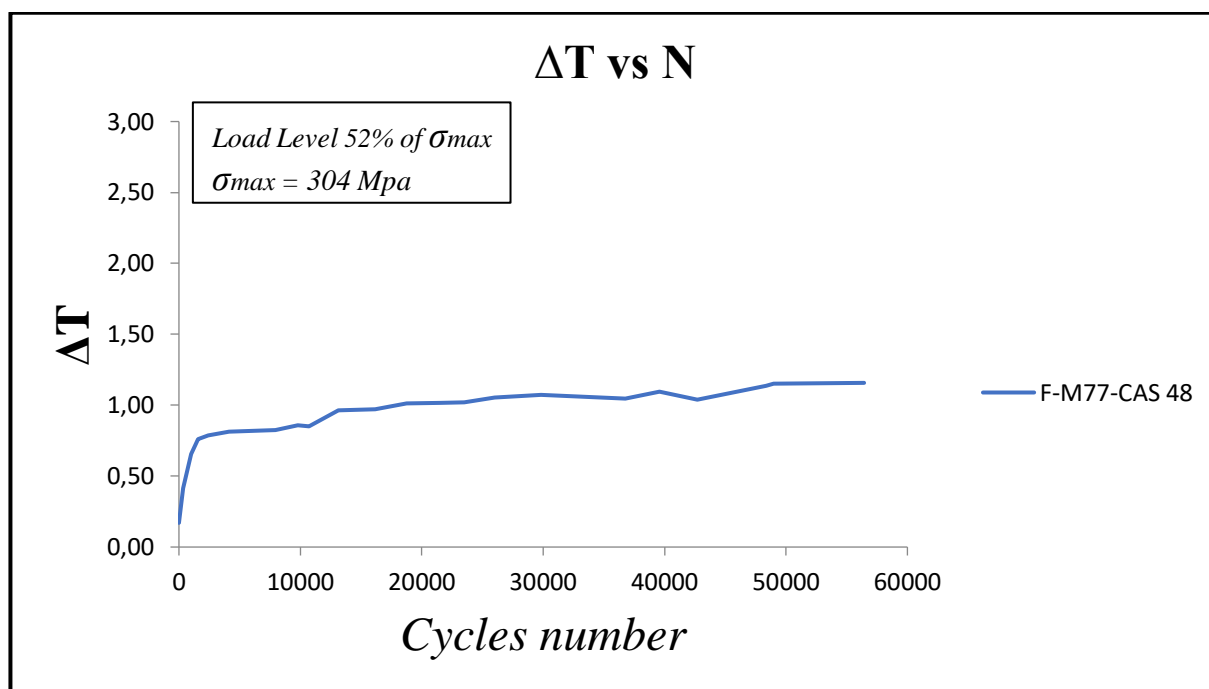


Figura 5.41: curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 48 (52% di σ_{max}).

La Figura 5.41 illustra la curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 48 testato ad un livello di carico pari al 52% della σ_{max} . Come precedentemente esposto, in questo caso, è stata effettuata una sola prova allo scopo di investigare livelli di carico vicini al limite di fatica e confermare quanto ottenuto. La prova relativa al campione F-M77-CAS 48 è stata interrotta dopo un certo numero di cicli dal raggiungimento della temperatura di stabilizzazione come visibile dal grafico.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 48	304	52	3,161	25,03	79,01	5620,55	71,14	1,10

Tabella 5.28: dati ricavati dalla curva di temperatura al 52% di σ_{max} .

La Tabella 5.28 riassume i dati ricavati dalla curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 48. Dall'interpolazione della curva in Figura 5.41 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, per il campione F-M77-CAS 48, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 1,10.

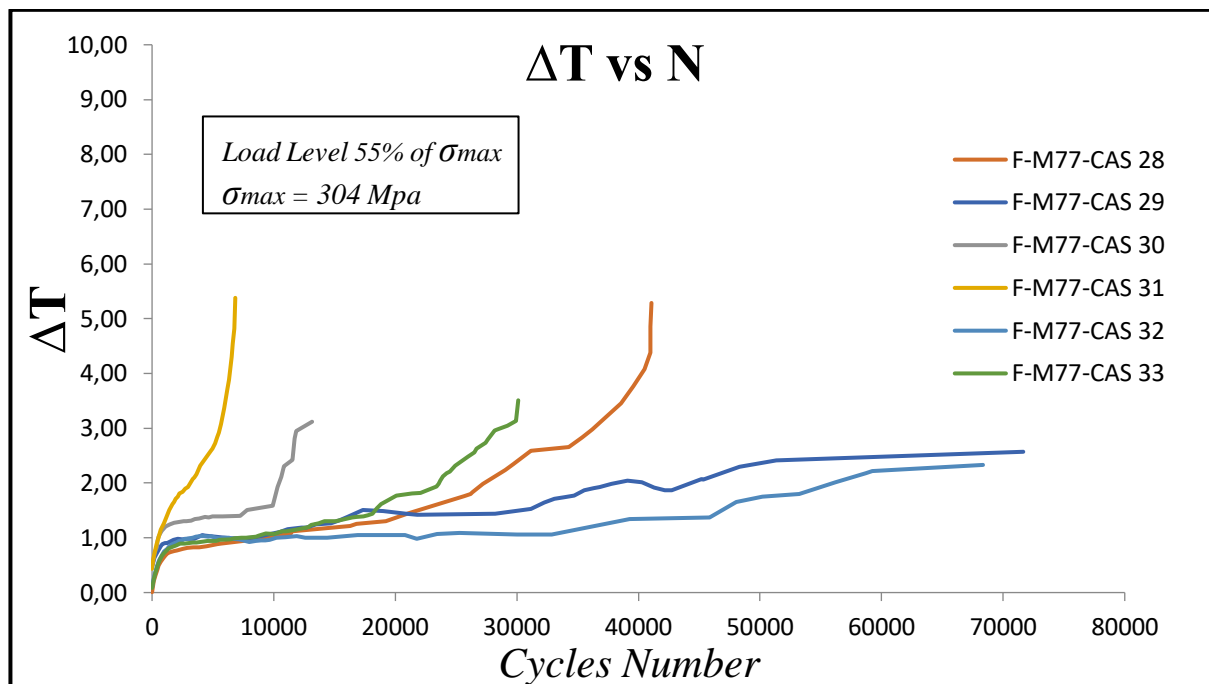


Figura 5.42: curve di temperatura per campioni F-M77-CAS 28-33 (55% di σ_{max}).

La Figura 5.42 illustra le curve di temperatura ottenute per i campioni F-M77-CAS 28-33 testati ad un livello di carico pari al 55% della σ_{max} . Le prove relative ai campioni F-M77-CAS 29 e F-M77-CAS 33 sono state interrotte dopo un certo numero di cicli dal raggiungimento della temperatura di stabilizzazione come visibile dal grafico. I provini F-M77-CAS 28, F-M77-CAS 30, F-M77-CAS 31 e F-M77-CAS 32, invece, sono stati testati fino a rottura: è possibile notare dal grafico, infatti, il tipico andamento a tre fasi della temperatura.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 28	304	55	3,091	25,04	77,39	5822,85	75,25	0,98
F-M77-CAS 29	304	55	3,123	24,99	78,05	5872,64	75,24	1,28
F-M77-CAS 30	304	55	3,151	25,08	79,02	5945,37	75,24	1,35
F-M77-CAS 31	304	55	3,160	25,01	79,02	5945,71	75,24	-
F-M77-CAS 32	304	55	3,172	25,02	79,37	5971,93	75,24	1,00
F-M77-CAS 33	304	55	3,205	25,03	80,22	6035,84	75,24	1,19

Tabella 5.29: dati ricavati dalle curve di temperatura al 55% di σ_{max} .

La Tabella 5.29 riassume i dati ricavati dalle curve di temperatura per i campioni F-M77-CAS 28-33. Dall'interpolazione delle curve in Figura 5.42 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 0,98 per il campione F-M77-CAS 28, a 1,28 per il campione F-M77-CAS 29, a 1,35 per il campione F-M77-CAS 30, a 1,00 per il campione F-M77-CAS 32 e a 1,19 per il campione F-M77-CAS 33. Il dato relativo al ΔT_s del campione F-M77-CAS 31 non è stato ricavabile: come visibile dal grafico, la curva ottenuta non presenta una fase di stabilizzazione della temperatura. Questo è dovuto alle caratteristiche variabili del materiale: probabilmente la percentuale di fibre/matrice del campione

F-M77-CAS 31 è risultata tale da rendere il livello di carico applicato troppo stringente, quindi da portare a una rottura prematura e a un'assenza di stabilizzazione della temperatura.

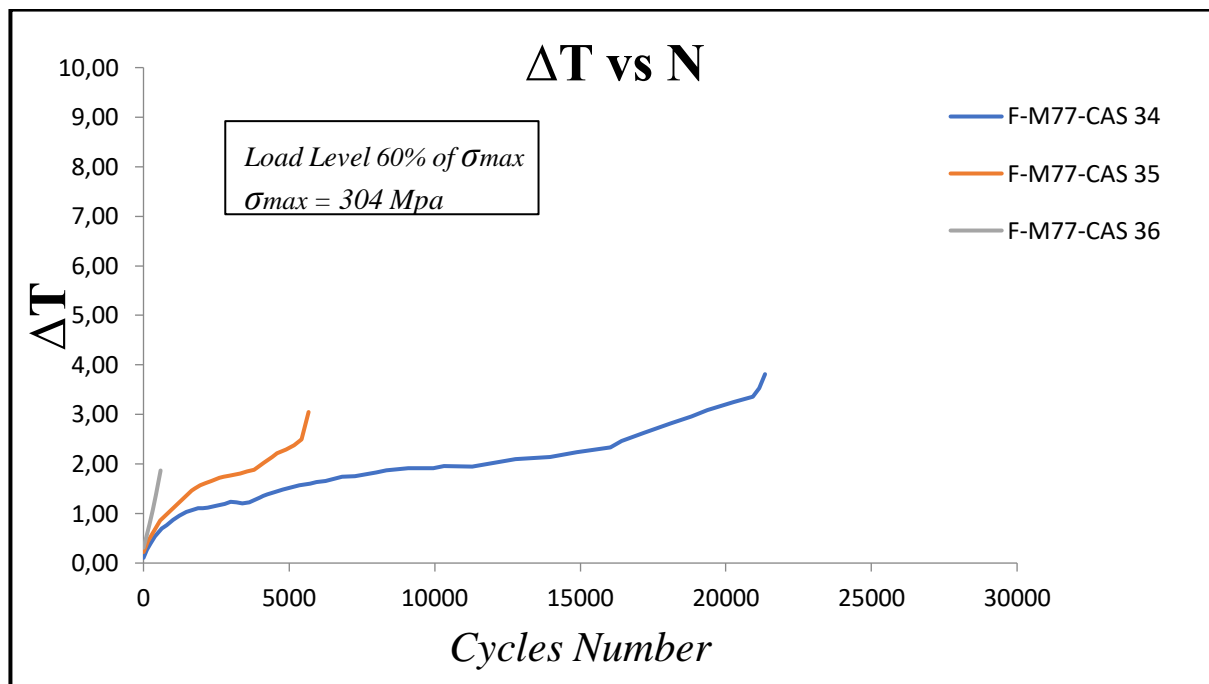


Figura 5.43: curve di temperatura per campioni F-M77-CAS 34-36 (60% di σ_{max}).

La Figura 5.43 illustra le curve di temperatura ottenute per i campioni F-M77-CAS 34-36 testati ad un livello di carico pari al 60% della σ_{max} . Tutti i provini sono stati testati fino a rottura: è possibile notare dal grafico, infatti, il tipico andamento a tre fasi della temperatura.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 34	304	60	3,230	25,01	80,79	6631,30	82,08	1,90
F-M77-CAS 35	304	60	3,275	25,06	82,07	6736,43	82,08	1,90
F-M77-CAS 36	304	60	3,314	25,00	82,84	6799,64	82,08	-

Tabella 5.30: dati ricavati dalle curve di temperatura al 60% di σ_{max} .

La Tabella 5.30 riassume i dati ricavati dalle curve di temperatura per i campioni F-M77-CAS 34-36. Dall'interpolazione delle curve in Figura 5.43 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 1,90 per il campione F-M77-CAS 34 e 1,90 per il campione F-M77-CAS 35. Il dato relativo al ΔT_s del campione F-M77-CAS 36 non è stato ricavabile: come visibile dal grafico, la curva ottenuta non presenta una fase di stabilizzazione della temperatura. Questo è dovuto alle caratteristiche variabili del materiale: probabilmente la percentuale di fibre/matrice del campione F-M77-CAS 36 è risultata tale da rendere il livello di carico applicato troppo stringente, quindi da portare a una rottura prematura e a un'assenza di stabilizzazione della temperatura. In ogni caso, la temperatura di stabilizzazione per gli altri due campioni risulta essere la stessa.

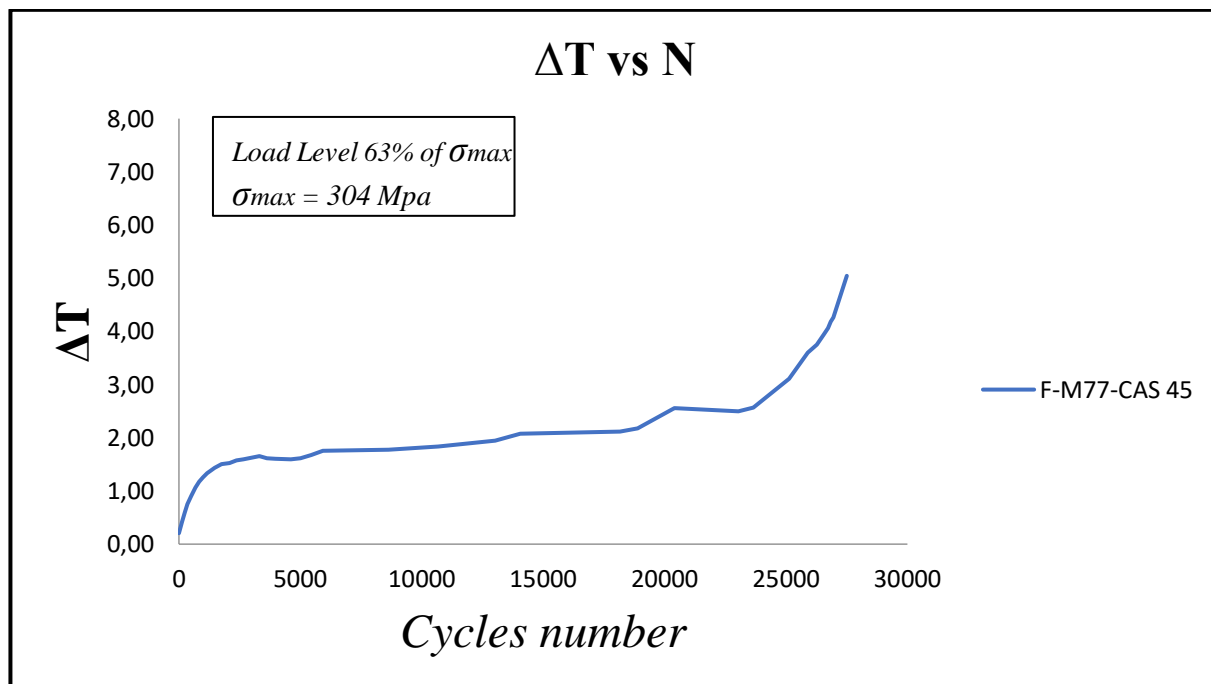


Figura 5.44: curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 45 (63% di σ_{max}).

La Figura 5.44 illustra la curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 45 testato ad un livello di carico pari al 63% della σ_{max} . Come precedentemente esposto, in questo caso, è stata effettuata una sola prova allo scopo di investigare livelli di carico vicini al limite di fatica e confermare quanto ottenuto. La prova relativa al campione F-M77-CAS 45 è stata condotta fino alla rottura: è possibile notare dal grafico, infatti, il tipico andamento a tre fasi della temperatura.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 45	304	63	3,124	25,07	78,31	6749,10	86,18	2,10

Tabella 5.31: dati ricavati dalla curva di temperatura al 63% di σ_{max} .

La Tabella 5.31 riassume i dati ricavati dalla curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 45. Dall'interpolazione della curva in Figura 5.44 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, per il campione F-M77-CAS 45, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 2,10.

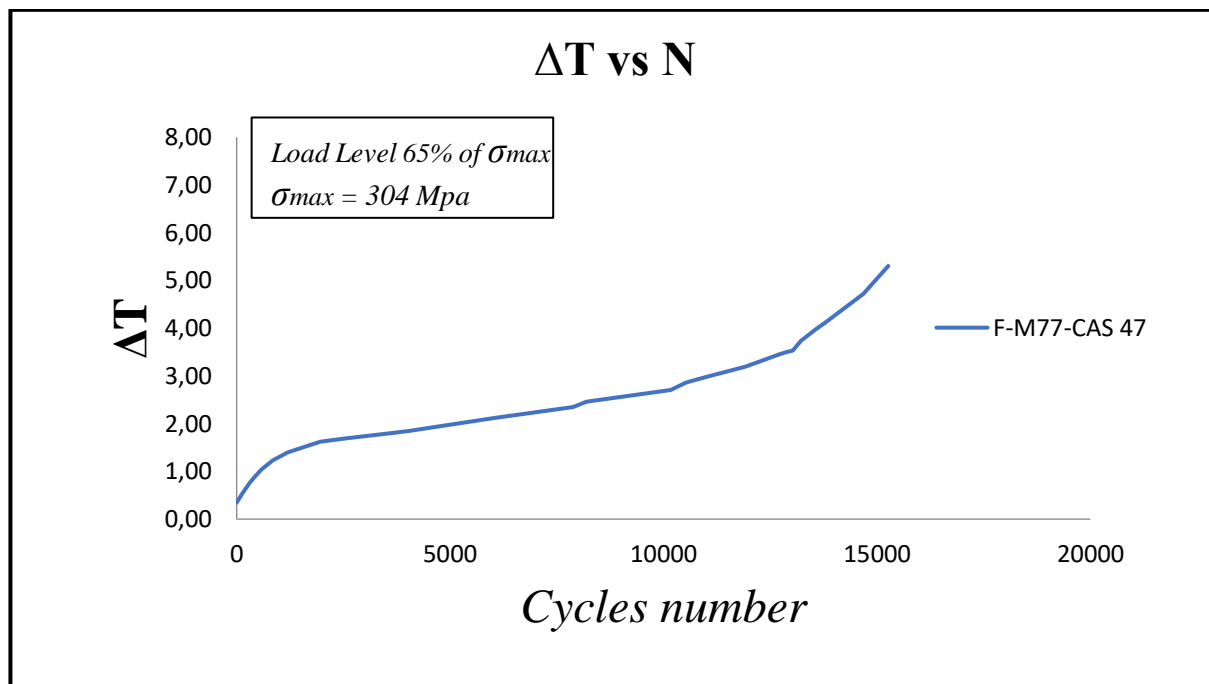


Figura 5.45: curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 47 (65% di σ_{max}).

La Figura 5.45 illustra la curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 47 testato ad un livello di carico pari al 65% della σ_{max} . Come precedentemente esposto, in questo caso, è stata effettuata una sola prova allo scopo di investigare livelli di carico vicini al limite di fatica e confermare quanto ottenuto. La prova relativa al campione F-M77-CAS 47 è stata condotta fino alla rottura: è possibile notare dal grafico, infatti, il tipico andamento a tre fasi della temperatura.

ID	σ_{max} [MPa]	Load level %	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 47	304	65	3,161	25,03	79,01	7032,37	89,00	2,91

Tabella 5.32: dati ricavati dalla curva di temperatura al 65% di σ_{max} .

La Tabella 5.32 riassume i dati ricavati dalla curva di temperatura per il campione F-M77-CAS 47. Dall'interpolazione della curva in Figura 5.45 è stato possibile risalire al ΔT_s medio. In questo caso, per il campione F-M77-CAS 47, la stabilizzazione della temperatura si manifesta ad un ΔT medio pari a 2,91.

Load level %	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
35	47,88	0,41
40	54,72	0,69
45	61,56	0,97
50	68,40	1,07
52	71,14	1,10
55	75,24	1,16
60	82,08	1,90
63	86,18	2,10
65	89,00	2,91

Tabella 5.33: tabella riassuntiva dei dati ottenuti dalle curve di temperatura per la valutazione del limite di fatica.

La Tabella 5.33 riassume quanto descritto in precedenza sulle curve di temperatura ottenute. In essa sono contenute le condizioni di carico oggetto dell'analisi, la σ_{amp} corrispondente e i ΔT_s come media dei singoli test effettuati.

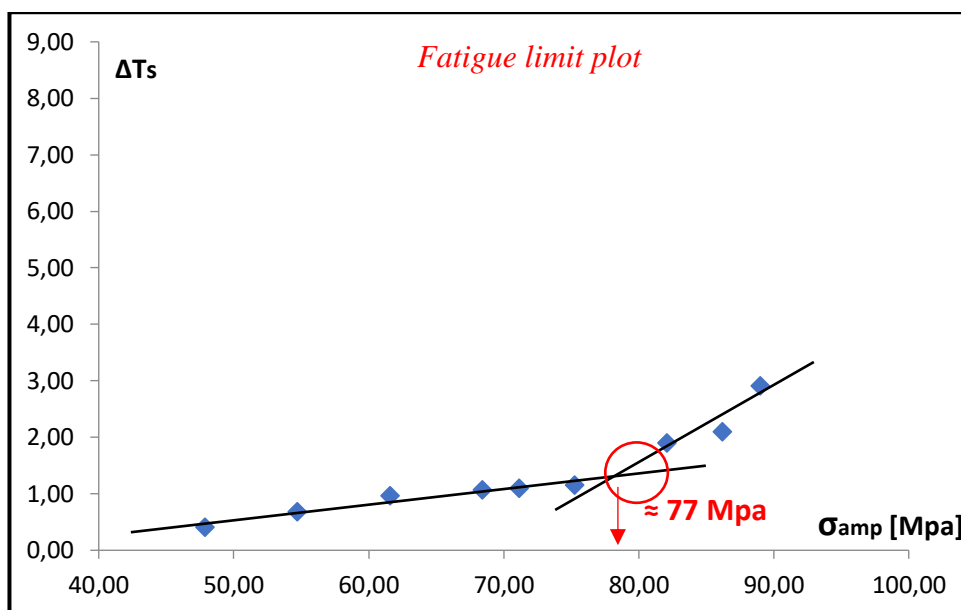


Figura 5.46: limite di fatica ottenuto tramite metodo n provini.

La Figura 5.46 illustra la curva ricavata relativa al limite di fatica, secondo il metodo n provini. Ogni indicatore nel grafico corrisponde ad un dato termico ottenuto dalla media dei vari campioni testati nelle stesse condizioni di carico. Il grafico correla la σ_{amp} , specifica per livello di carico, e la relativa variazione di temperatura al momento della sua stabilizzazione (equilibrio termico). E' possibile notare come la variazione di temperatura aumenti con il livello di carico, ma con andamenti differenti. I punti ottenuti sono disposti secondo due serie di dati ben distinte che descrivono il diverso comportamento del materiale. La regressione lineare tra le due rette ha permesso di ottenere il valore del limite di fatica cercato. L'intersezione tra le due rette, le cui pendenze descrivono un diverso comportamento del materiale, rappresenta il punto corrispondente al limite di fatica. La differenza di pendenza corrisponde all'inizio di un danneggiamento nel materiale. Infatti, prima del limite di fatica la variazione di temperatura aumenta linearmente ma

lievemente con il livello di carico, mentre dopo il limite di fatica il cambiamento di pendenza implica un aumento più repentino. Ciò si traduce nell'individuazione della condizione di carico per cui nel materiale si manifesta l'inizio del danneggiamento, che corrisponde al superamento del limite di fatica. In questo caso, il limite di fatica è pari a circa 77 MPa. Esso è definito come il punto al di sotto del quale teoricamente non si ha danneggiamento e quindi il materiale ha vita infinita. La considerazione da fare, legata anche a quanto precedentemente ottenuto dall'analisi della rigidità e della curva di Woehler, è che utilizzando ogni provino come singolo dato termico aumenta il rischio di avere campioni con proprietà meccaniche e termiche differenti e, quindi, di avere una certa dispersione nei dati. Infatti, a conferma di ciò, in alcuni casi, nell'analisi termografica sono state riscontrate delle differenze nei dati di stabilizzazione della temperatura ottenuti utilizzando stesse condizioni di carico.

5.9.2 Metodo 1 provino

L'analisi termografica è stata eseguita testando un solo provino, sia allo scopo di ridurre i tempi, sia nel tentativo di ridurre la variabilità dei dati ottenuta utilizzando n campioni. Con questo metodo, è stata condotta sul campione una prova di fatica ad ampiezza variabile secondo gli stessi livelli di carico, in sequenza crescente, applicati nel metodo n provini. I livelli di carico sono stati aumentati gradualmente ogni 20000 cicli, tempo sufficiente ad ottenere una stabilizzazione della temperatura. L'acquisizione è avvenuta in tempo reale tramite filmati registrati in tre momenti distinti dopo la stabilizzazione della temperatura ad ogni condizione di carico. Ogni filmato ha la durata di 13,207 secondi, corrispondenti a 700 frames acquisiti (53 fps). La temperatura di stabilizzazione, per ogni livello di carico, è la media ottenuta dalle 3 relative acquisizioni. Per una maggiore affidabilità il metodo è stato ripetuto su due campioni, F-M77-CAS 49 e F-M77-CAS 50. Di seguito vengono riportate le tabelle e i grafici contenenti i risultati ottenuti.

ID	σ_{\max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 49 A	304	20	3,171	24,97	79,17	2166,13	27,36	0,41
F-M77-CAS 49 B	304	25	3,171	24,97	79,17	2707,67	34,20	0,44
F-M77-CAS 49 C	304	30	3,171	24,97	79,17	3249,20	41,04	0,48
F-M77-CAS 49 D	304	35	3,171	24,97	79,17	3790,73	47,88	0,56
F-M77-CAS 49 E	304	40	3,171	24,97	79,17	4332,27	54,72	0,69
F-M77-CAS 49 F	304	45	3,171	24,97	79,17	4873,80	61,56	0,86
F-M77-CAS 49 G	304	50	3,171	24,97	79,17	5415,33	68,40	1,33
F-M77-CAS 49 H	304	52	3,171	24,97	79,17	5631,95	71,14	1,72
F-M77-CAS 49 I	304	55	3,171	24,97	79,17	5956,87	75,24	2,10

Tabella 5.34: dati per la valutazione del limite di fatica, secondo metodo 1 provino, del campione F-M77-CAS 49.

La Tabella 5.34 riassume quanto ottenuto per la valutazione del limite di fatica sul campione F-M77-CAS 49. Essa illustra i livelli di carico applicati sul campione e le σ_{amp} corrispondenti. Inoltre, contiene i valori relativi alla variazione di temperatura in corrispondenza della stabilizzazione per ogni condizione di carico. L'ultimo livello di carico presente (55% di σ_{\max}) è relativo alla rottura del campione.

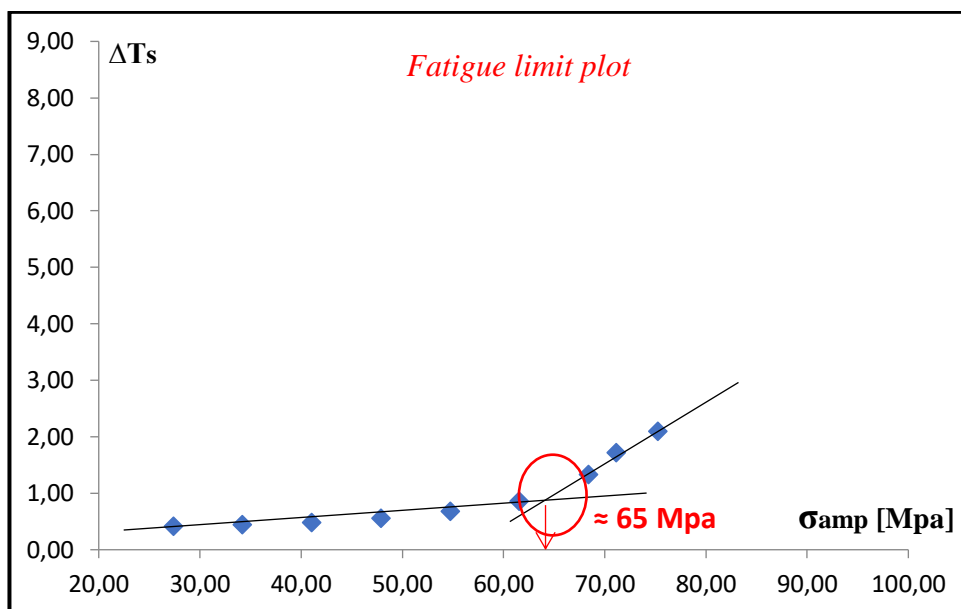


Figura 5.47: limite di fatica ottenuto tramite metodo 1 provino (F-M77-CAS 49).

La Figura 5.47 illustra la curva ricavata relativa al limite di fatica, secondo il metodo 1 provino, per il campione F-M77-CAS 49. Tutti gli indicatori nel grafico si riferiscono allo stesso campione. Il singolo indicatore è il ΔT_s medio derivante dai tre filmati acquisiti per la relativa condizione di carico. Il grafico correla la σ_{amp} , specifica per livello di carico, e la relativa variazione di temperatura al momento della sua stabilizzazione (equilibrio termico). E' possibile notare come la variazione di temperatura aumenti con il livello di carico, ma con andamenti differenti. I punti ottenuti sono disposti secondo due serie di dati ben distinte che descrivono il diverso comportamento del materiale. La regressione lineare tra le due rette ha permesso di ottenere il valore del limite di fatica cercato. L'intersezione tra le due rette, le cui pendenze descrivono un diverso comportamento del materiale, rappresenta il punto corrispondente al limite di fatica. La differenza di pendenza corrisponde ad un danneggiamento nel materiale. Infatti, prima del limite di fatica la variazione di temperatura aumenta linearmente ma lievemente con il livello di carico, mentre dopo il limite di fatica il cambiamento di pendenza implica un aumento più repentino. Ciò si traduce nell'individuazione della condizione di carico per cui nel materiale si manifesta l'inizio del danneggiamento, che corrisponde al superamento del limite di fatica. In questo caso, il limite di fatica è pari a circa 65 MPa. Esso è definito come il punto al di sotto del quale teoricamente non si ha danneggiamento e quindi il materiale ha vita infinita. In questo caso, a differenza del metodo n provini, la variabilità dovuta all'utilizzo di campioni differenti viene eliminata. Inoltre, essendo una prova continuativa sullo stesso provino, il dato risulta essere più affidabile perché fa riferimento ad una condizione di danneggiamento progressivo.

ID	σ_{\max} [MPa]	Load level%	t [mm]	w [mm]	A [mm ²]	F _{amp} [N]	σ_{amp} [MPa]	Avg. ΔT_s
F-M77-CAS 50 A	304	20	3,210	25,04	80,38	2199,15	27,36	0,34
F-M77-CAS 50 B	304	25	3,210	25,04	80,38	2748,94	34,20	0,39
F-M77-CAS 50 C	304	30	3,210	25,04	80,38	3298,73	41,04	0,42
F-M77-CAS 50 D	304	35	3,210	25,04	80,38	3848,52	47,88	0,47
F-M77-CAS 50 E	304	40	3,210	25,04	80,38	4398,31	54,72	0,64
F-M77-CAS 50 F	304	45	3,210	25,04	80,38	4948,09	61,56	0,77
F-M77-CAS 50 G	304	50	3,210	25,04	80,38	5497,88	68,40	0,97
F-M77-CAS 50 H	304	52	3,210	25,04	80,38	5717,80	71,14	1,16
F-M77-CAS 50 I	304	55	3,210	25,04	80,38	6047,67	75,24	1,56
F-M77-CAS 50 L	304	57	3,210	25,04	80,38	6267,59	77,98	2,64

Tabella 5.35: dati per la valutazione del limite di fatica, secondo metodo 1 provino, del campione F-M77-CAS 50.

La Tabella 5.35 riassume quanto ottenuto per la valutazione del limite di fatica sul campione F-M77-CAS 50. Essa illustra i livelli di carico applicati sul campione e le σ_{amp} corrispondenti. Inoltre, contiene i valori relativi alla variazione di temperatura in corrispondenza della stabilizzazione per ogni condizione di carico. L'ultimo livello di carico presente (57% di σ_{\max}) è relativo alla rottura del campione.

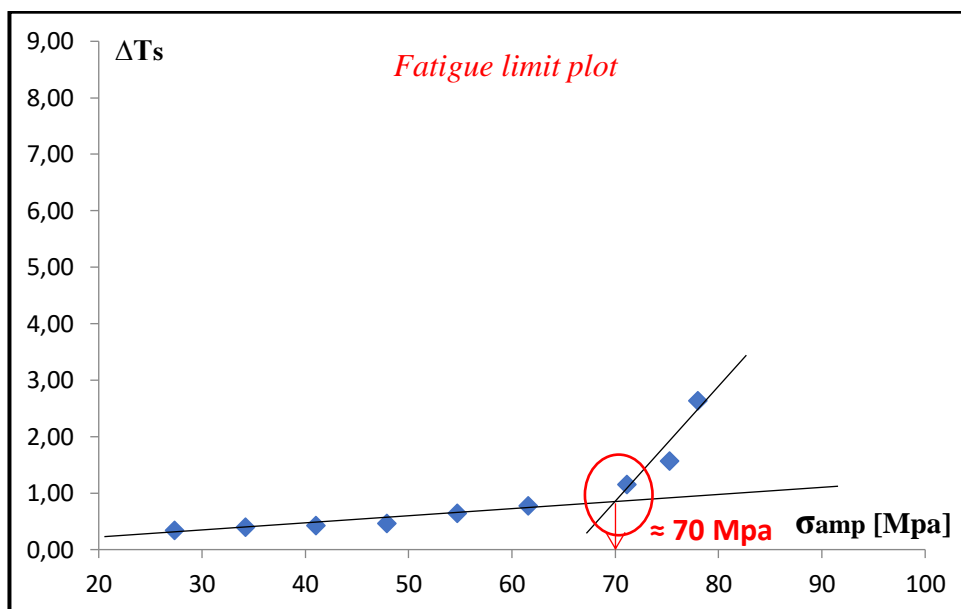


Figura 5.48: limite di fatica ottenuto tramite metodo 1 provino (F-M77-CAS 50).

La Figura 5.48 illustra la curva ricavata relativa al limite di fatica, secondo il metodo 1 provino, per il campione F-M77-CAS 50. Tutti gli indicatori nel grafico si riferiscono allo stesso campione. Il singolo indicatore è il ΔT_s medio derivante dai tre filmati acquisiti per la relativa condizione di carico. Il grafico correla la σ_{amp} , specifica per livello di carico, e la relativa variazione di temperatura al momento della sua stabilizzazione (equilibrio termico). E' possibile notare come la variazione di temperatura aumenti con il livello di carico, ma con andamenti differenti. I punti

ottenuti sono disposti secondo due serie di dati ben distinte che descrivono il diverso comportamento del materiale. La regressione lineare tra le due rette ha permesso di ottenere il valore del limite di fatica cercato. L'intersezione tra le due rette, le cui pendenze descrivono un diverso comportamento del materiale, rappresenta il punto corrispondente al limite di fatica. La differenza di pendenza corrisponde ad un danneggiamento nel materiale. Infatti, prima del limite di fatica la variazione di temperatura aumenta linearmente ma lievemente con il livello di carico, mentre dopo il limite di fatica il cambiamento di pendenza implica un aumento più repentino. Ciò si traduce nell'individuazione della condizione di carico per cui nel materiale si manifesta l'inizio del danneggiamento, che corrisponde al superamento del limite di fatica. In questo caso, il limite di fatica è pari a circa 70 MPa. Esso è definito come il punto al di sotto del quale teoricamente non si ha danneggiamento e quindi il materiale ha vita infinita. In questo caso, a differenza del metodo n provini, la variabilità dovuta all'utilizzo di campioni differenti viene eliminata. Inoltre, essendo una prova continuativa sullo stesso provino, il dato risulta essere più affidabile perché fa riferimento ad una condizione di danneggiamento progressivo.

5.10 Osservazioni riassuntive sull'analisi termografica

L'analisi termografica è stata condotta tramite due metodi differenti allo scopo di generare un confronto. La prima ha previsto l'utilizzo di n provini, ognuno considerato come dato termico, mentre la seconda di un solo campione. Nel primo caso, ogni dato termico è stato ricavato come media di almeno due test alla stessa condizione di carico, nel secondo caso l'analisi è stata condotta su due differenti provini per avere maggiore affidabilità. Le variazioni di temperatura al momento della stabilizzazione sono state correlate alla condizione di carico, in particolare alla σ_{amp} . In entrambi i casi, i punti ottenuti sono disposti secondo due serie ben distinte che descrivono il diverso comportamento del materiale. Il cambiamento repentino nella pendenza delle rette, che descrivono i diversi comportamenti del materiale, indica l'inizio del danneggiamento in corrispondenza di un preciso livello di carico, legato ad una σ_{amp} . Questo viene individuato dall'intersezione delle rette di diversa pendenza e corrisponde al limite di fatica. Teoricamente, al di sotto di questo limite non si manifesta danneggiamento e quindi il materiale ha vita infinita. Dal metodo n provini il limite di fatica è risultato pari a circa 77 MPa, mentre nel metodo 1 provino è risultato circa 65 MPa per il campione F-M77-CAS 49 e circa 70 MPa per il campione F-M77-CAS 50. Il motivo per cui il limite di fatica nel caso del metodo 1 provino sia inferiore è sicuramente dovuto al fatto che la condizione di test risulti più stringente: il danneggiamento del campione testato è progressivo e cumulativo. In ogni caso, il limite di fatica per entrambi i metodi è confrontabile in quanto è pari a circa 70 ± 5 MPa. Si può quindi affermare che entrambi i metodi risultano validi ma, utilizzando il metodo 1 provino, i tempi di test si accorciano ulteriormente e si elimina la possibilità di una dispersione nei dati: data la natura randomica del materiale, utilizzando n provini aumenta la probabilità di avere campioni geometricamente analoghi ma con caratteristiche meccaniche e termiche differenti. Inoltre, i risultati ottenuti tramite l'analisi termografica sul limite di fatica non si discostano molto da quelli ricavati secondo metodologia tradizionale. Infatti, la σ_{amp} in corrispondenza del ginocchio nella curva di Woehler risulta essere di circa 50 MPa, mentre quella in corrispondenza del limite di fatica secondo analisi termografica risulta di circa 70 ± 5 MPa. Da queste osservazioni è possibile considerare l'analisi termografica una tecnica valida come punto di partenza nella progettazione di componenti a fatica, che permette di avere un rapido confronto su un set più ampio di materiali e quindi di scegliere preventivamente i materiali migliori su cui condurre un'analisi di tipo tradizionale.

5.11 Modalità di rottura

E' stata condotta anche un'analisi sulle modalità di rottura al fine di riuscire a comprendere il comportamento del materiale. In questo paragrafo, vengono riportate le immagini che riportano, macroscopicamente, le zone di frattura dei campioni. Inoltre, sono anche presenti degli ingrandimenti al microscopio allo scopo di approfondire lo studio. La distinzione è stata fatta per tipo di test: trazione (UNT e OH), compressione, fatica. Sostanzialmente, sia a livello macroscopico che a livello microscopico, la modalità di rottura dei campioni risulta essere la stessa indipendentemente dal tipo di test.

5.11.1 Trazione

In questa sezione vengono illustrate le immagini relative alle modalità di rottura per i campioni testati a trazione, sia UNT che OH: T-M77-CAS, T50-M77-CAS, T100-M77-CAS, TOH-M77-CAS, T50OH-M77-CAS-A e T50OH-M77-CAS-B.

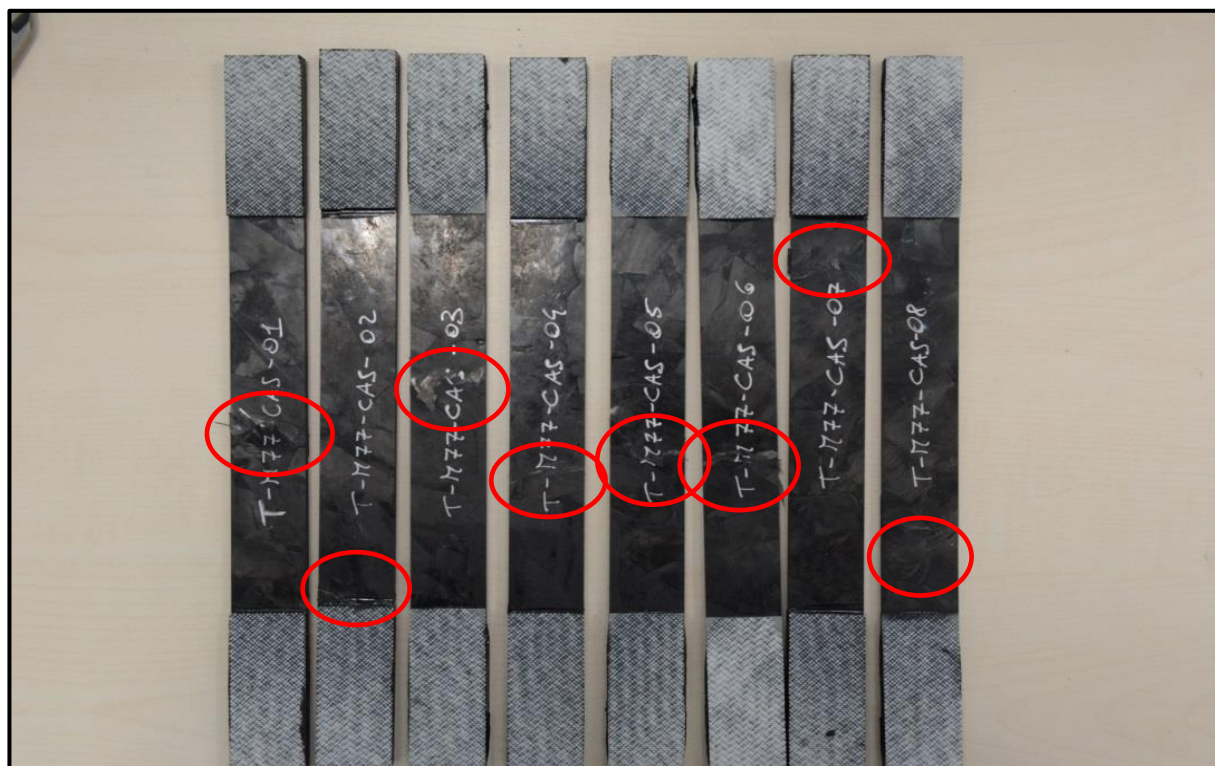


Figura 5.49: zone di frattura campioni T-M77-CAS 01-08 (fronte).

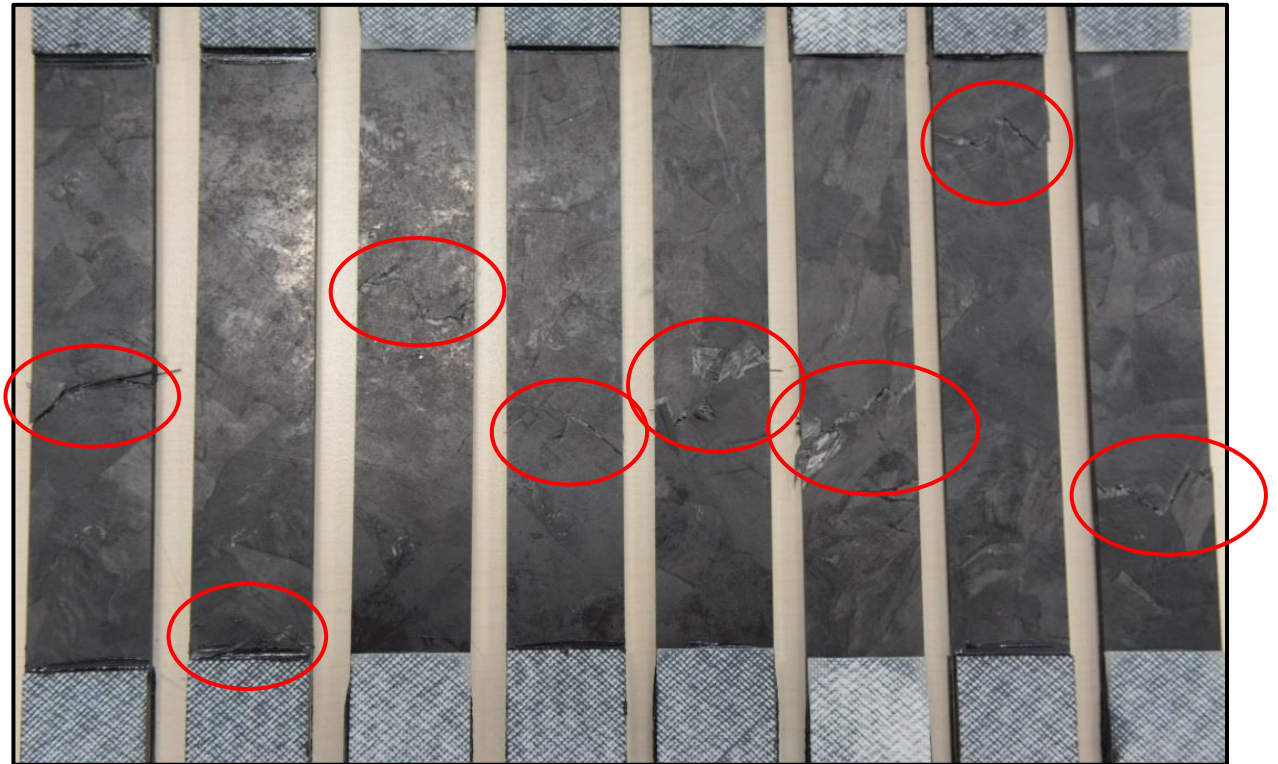


Figura 5.50: zone di frattura campioni T-M77-CAS 01-08 (retro).



Figura 5.51: zone di frattura campioni T50-M77-CAS 01-06 (fronte).

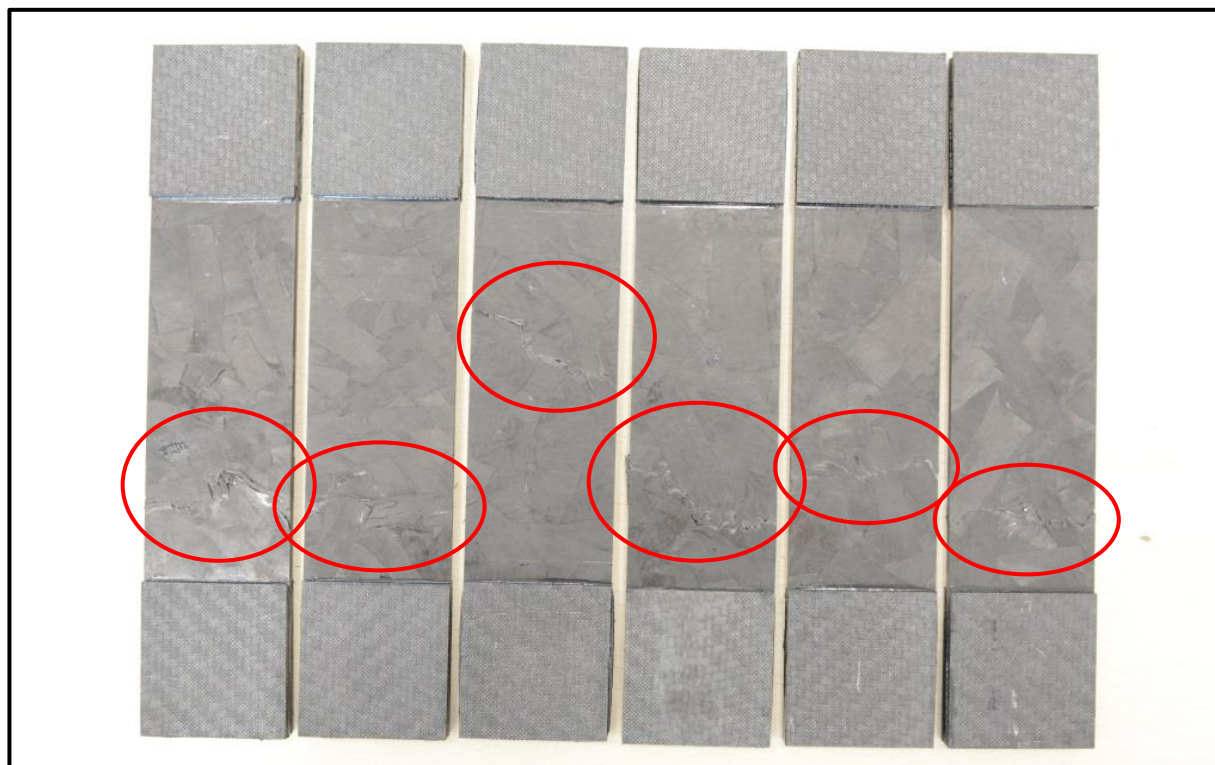


Figura 5.52: zone di frattura campioni T50-M77-CAS 01-06 (retro).

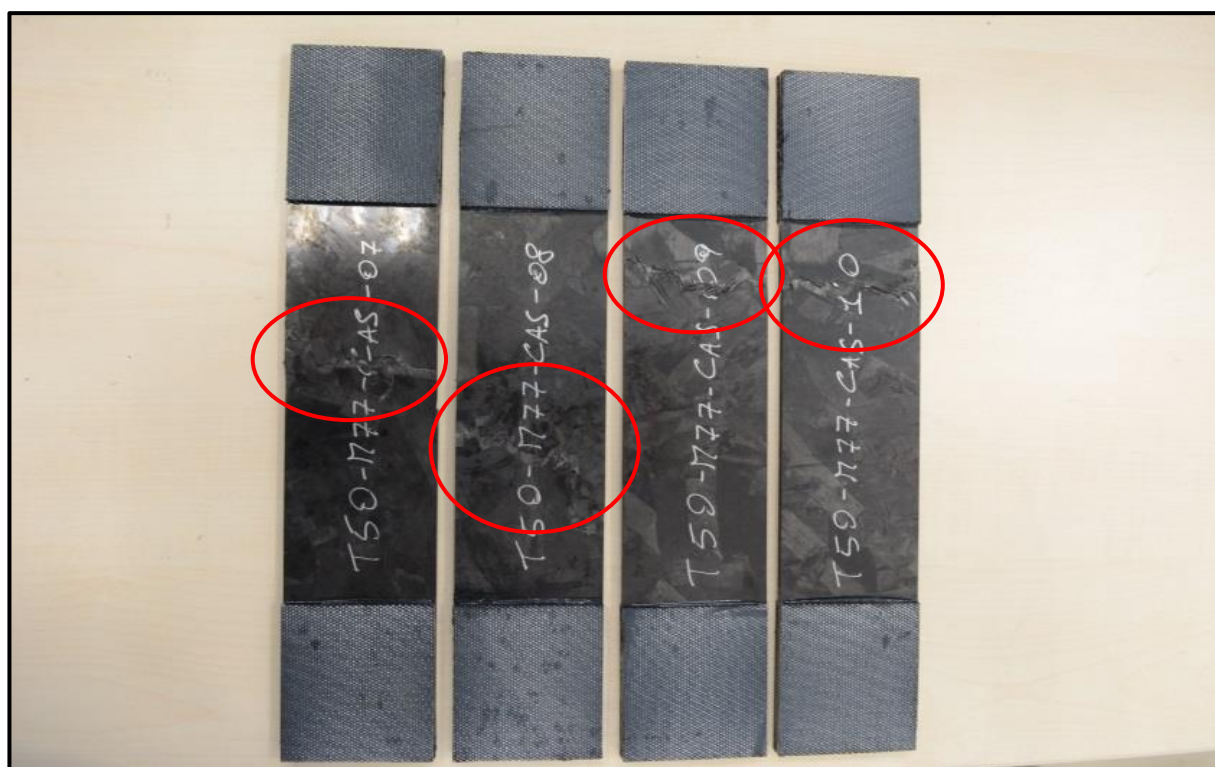


Figura 5.53: zone di frattura campioni T50-M77-CAS 07-10 (fronte).

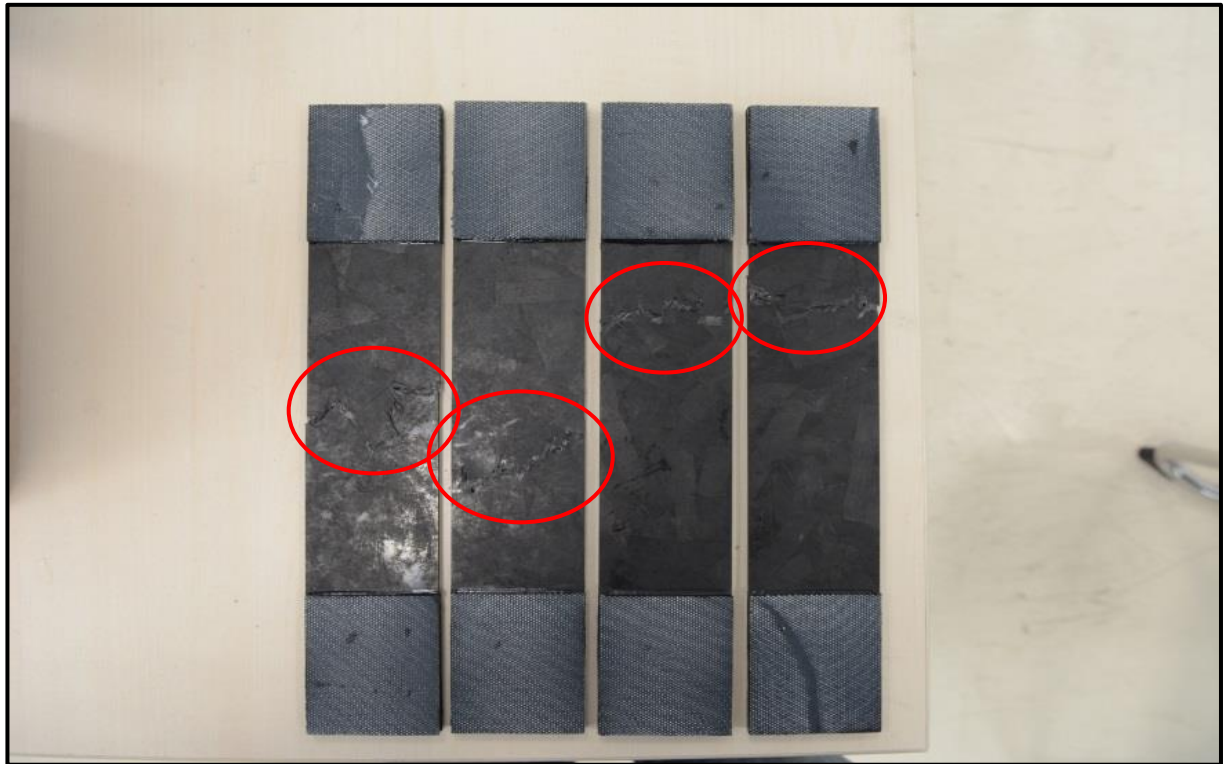


Figura 5.54: zone di frattura campioni T50-M77-CAS 07-10 (retro).

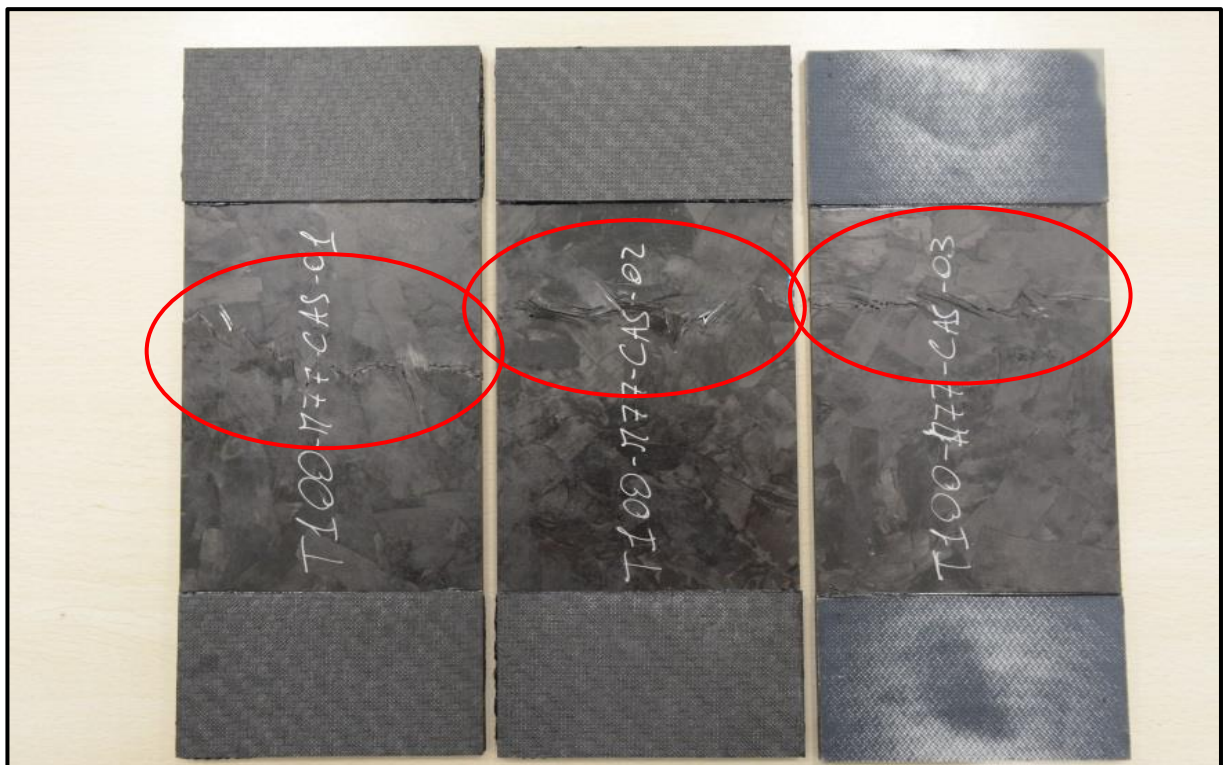


Figura 5.55: zone di frattura campioni T100-M77-CAS 01-03 (fronte).

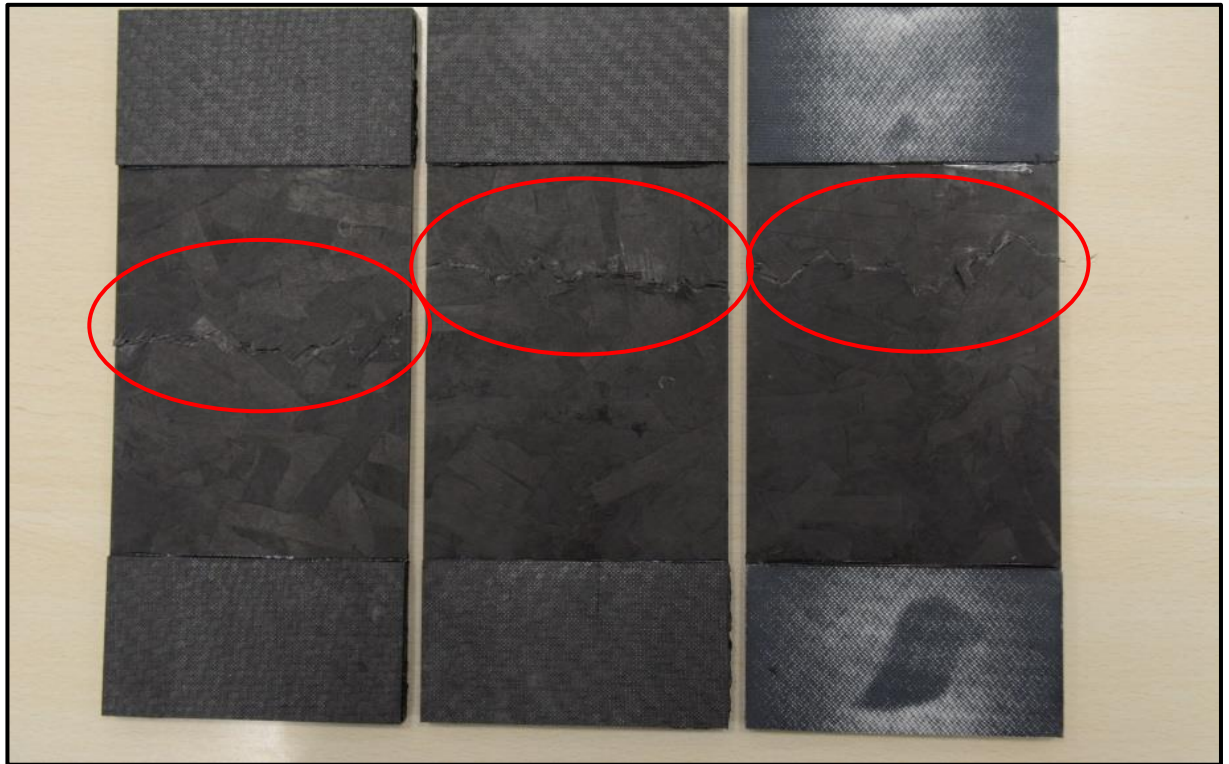


Figura 5.56: zone di frattura campioni T100-M77-CAS 01-03 (retro).

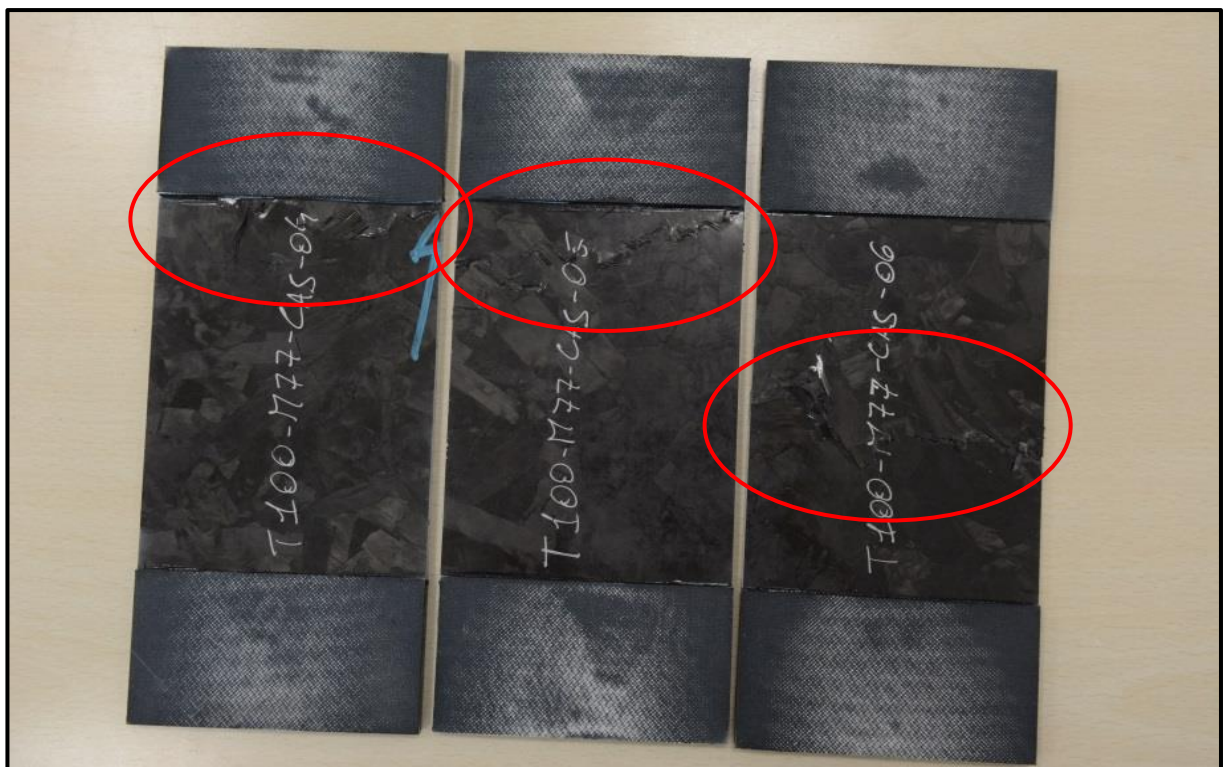


Figura 5.57: zone di frattura campioni T100-M77-CAS 04-06 (fronte).

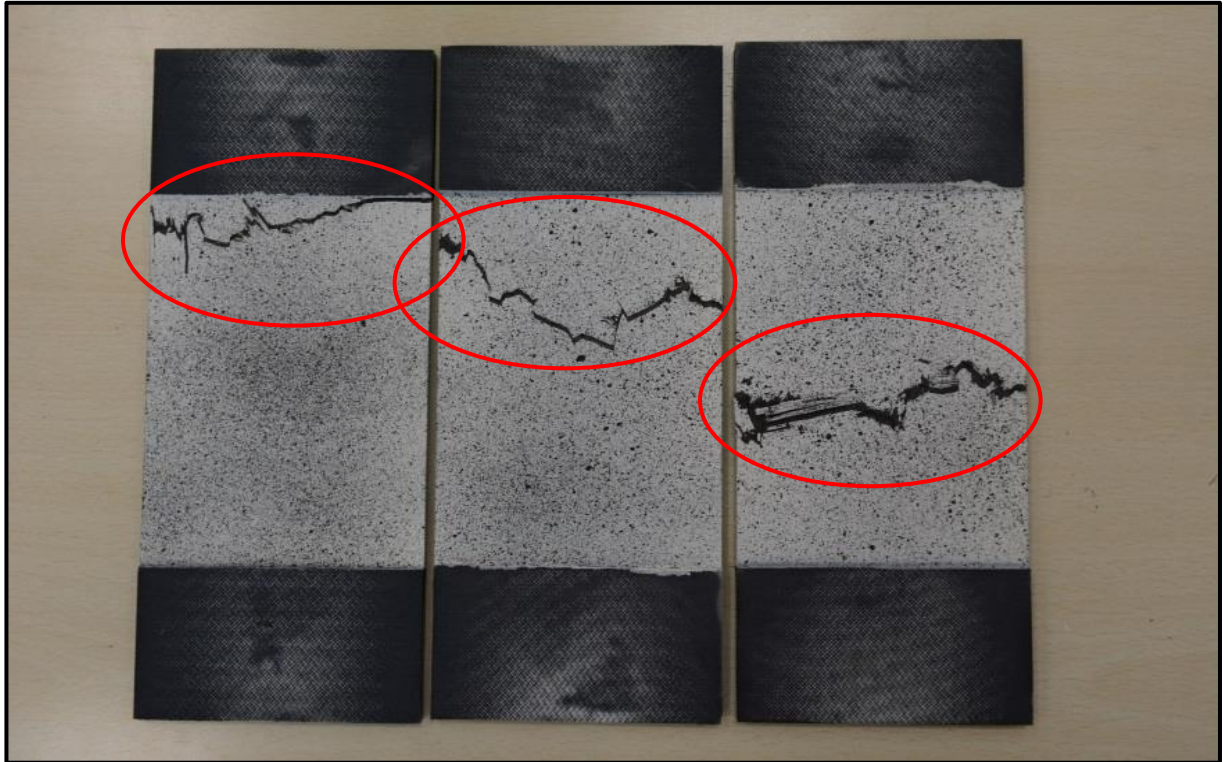


Figura 5.58: zone di frattura campioni T100-M77-CAS 04-06 (retro).

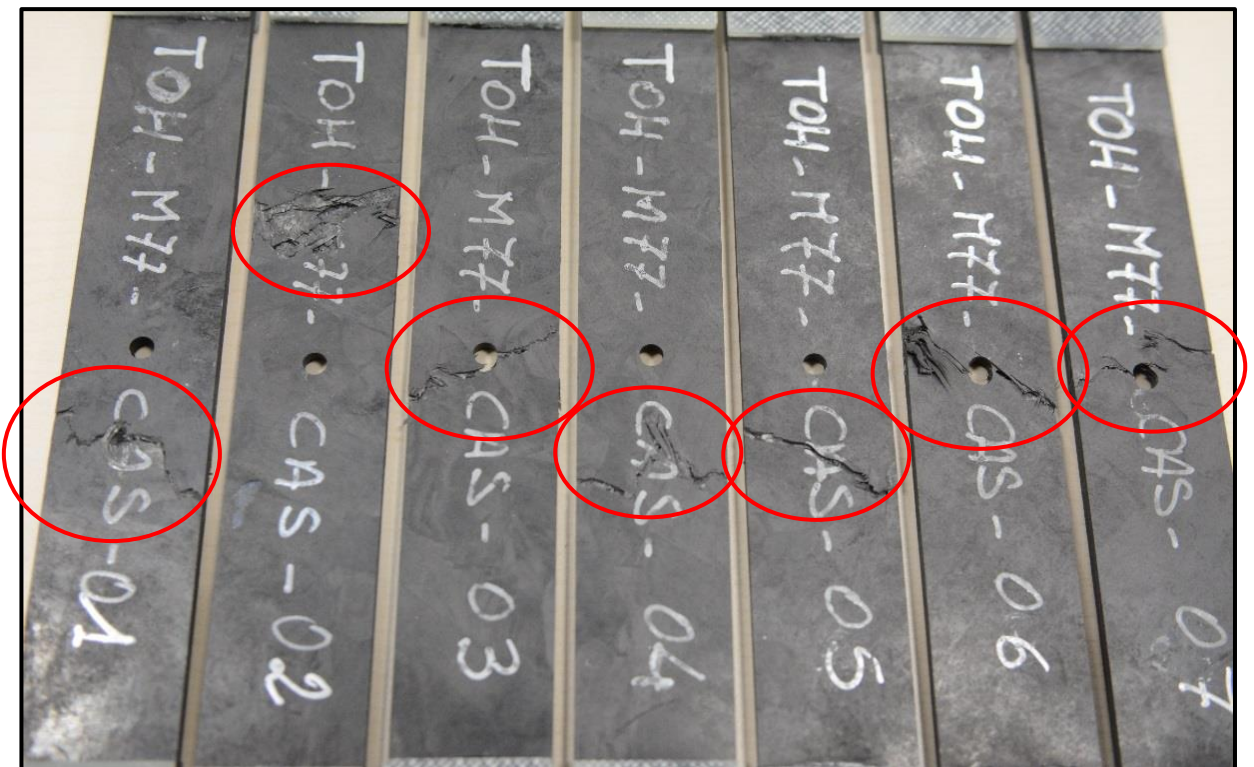


Figura 5.59: zone di frattura campioni TOH-M77-CAS 01-07 (fronte).

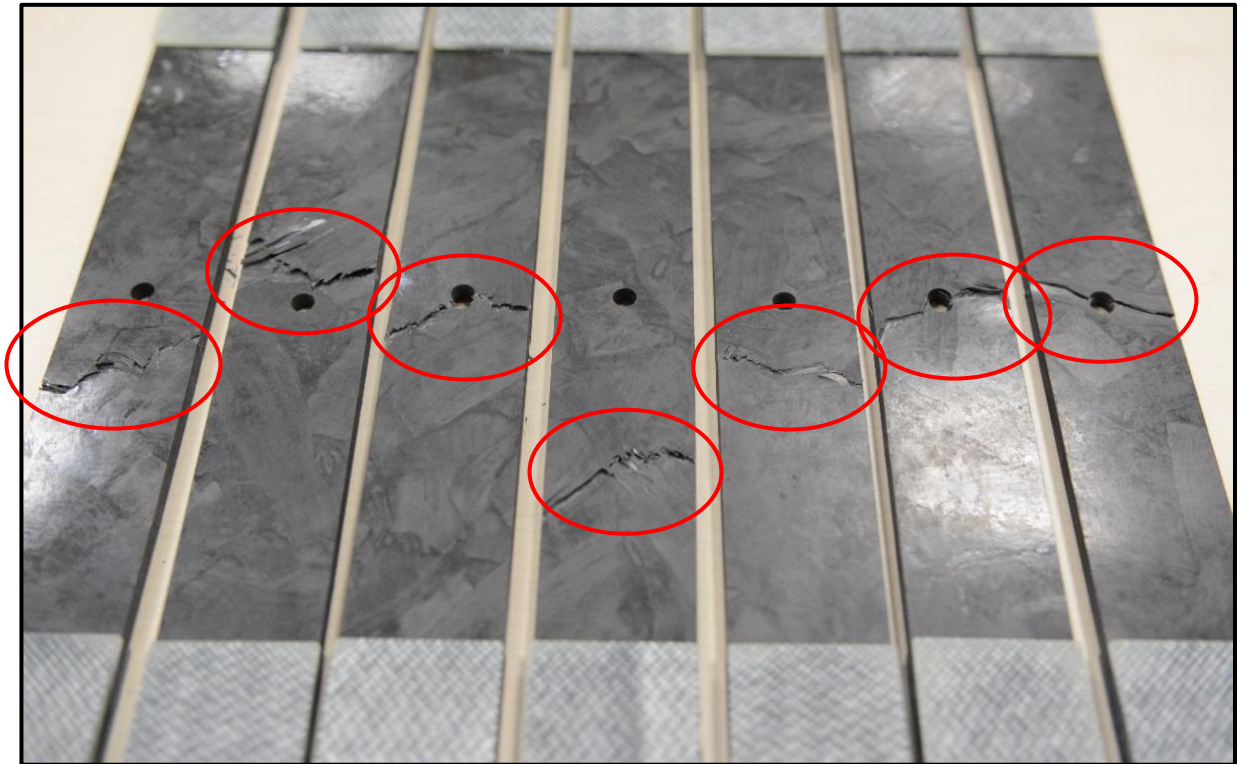


Figura 5.60: zone di frattura campioni TOH-M77-CAS 01-07 (retro).

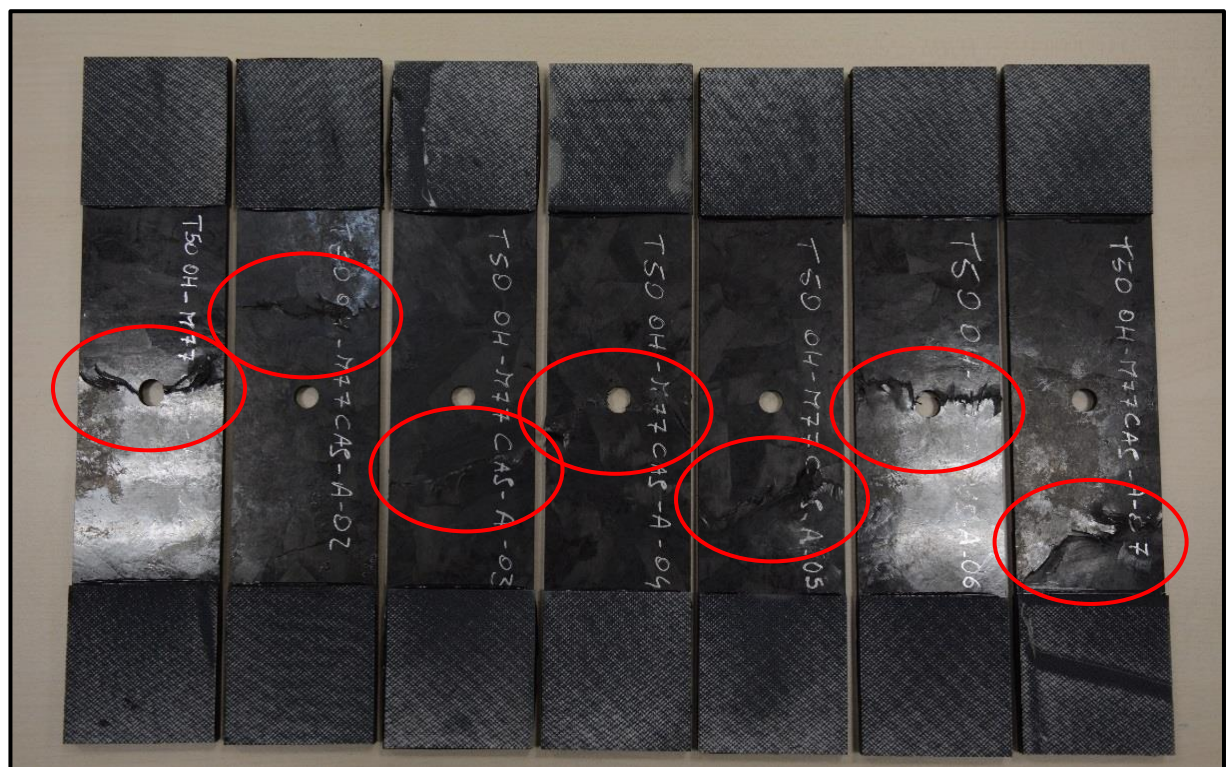


Figura 5.61: zone di frattura campioni T500H-M77-CAS-A 01-07 (fronte).

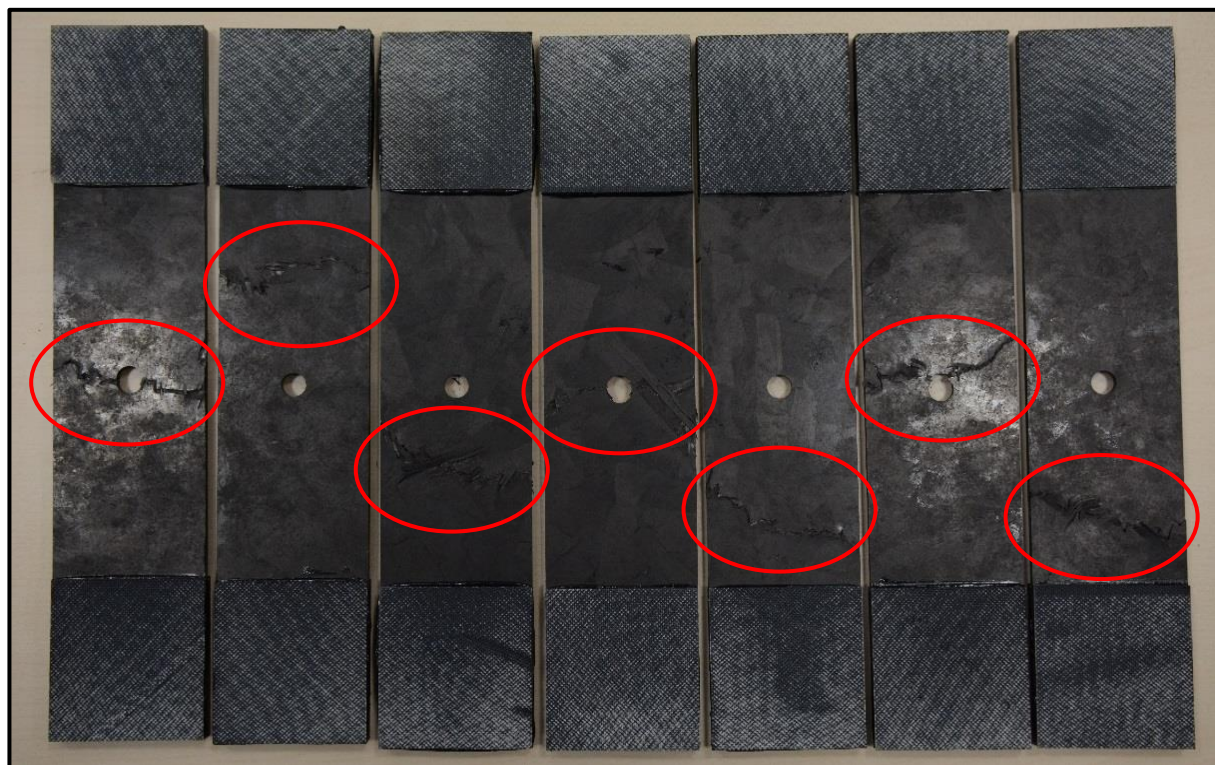


Figura 5.62: zone di frattura campioni T50OH-M77-CAS-A 01-07 (retro).

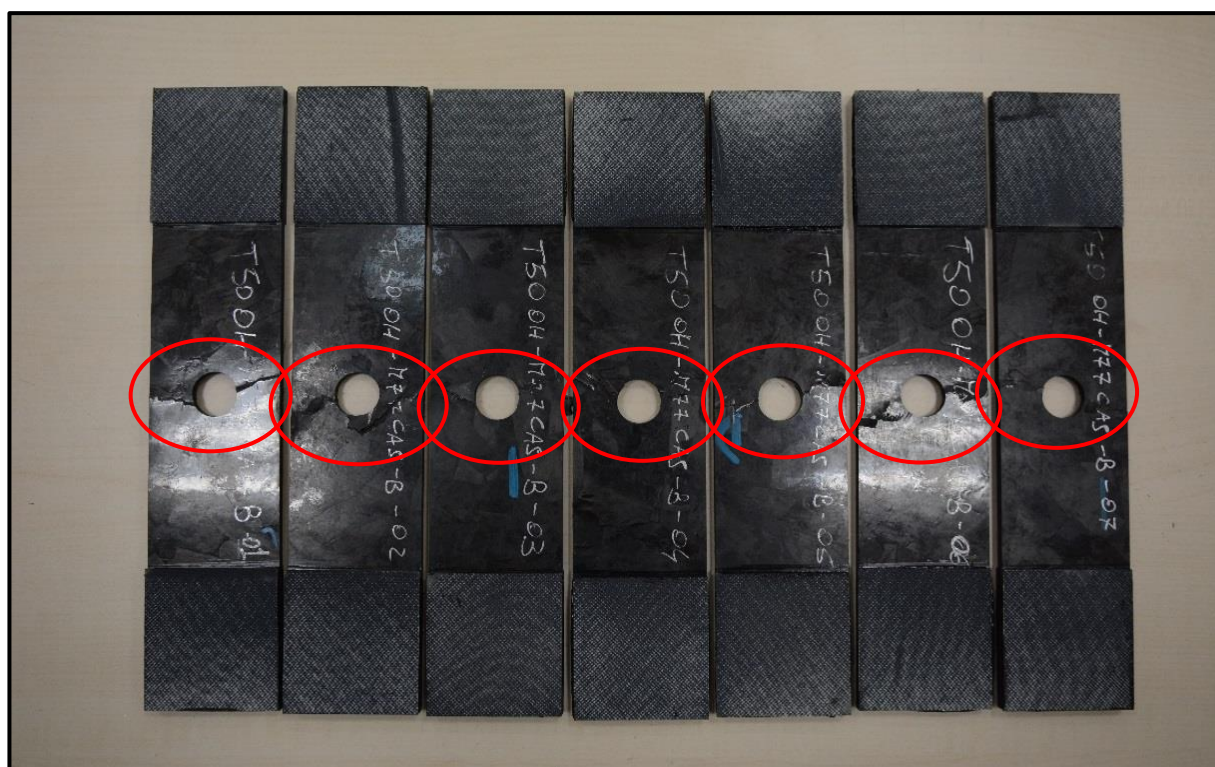


Figura 5.63: zone di frattura campioni T50OH-M77-CAS-B 01-07 (fronte).

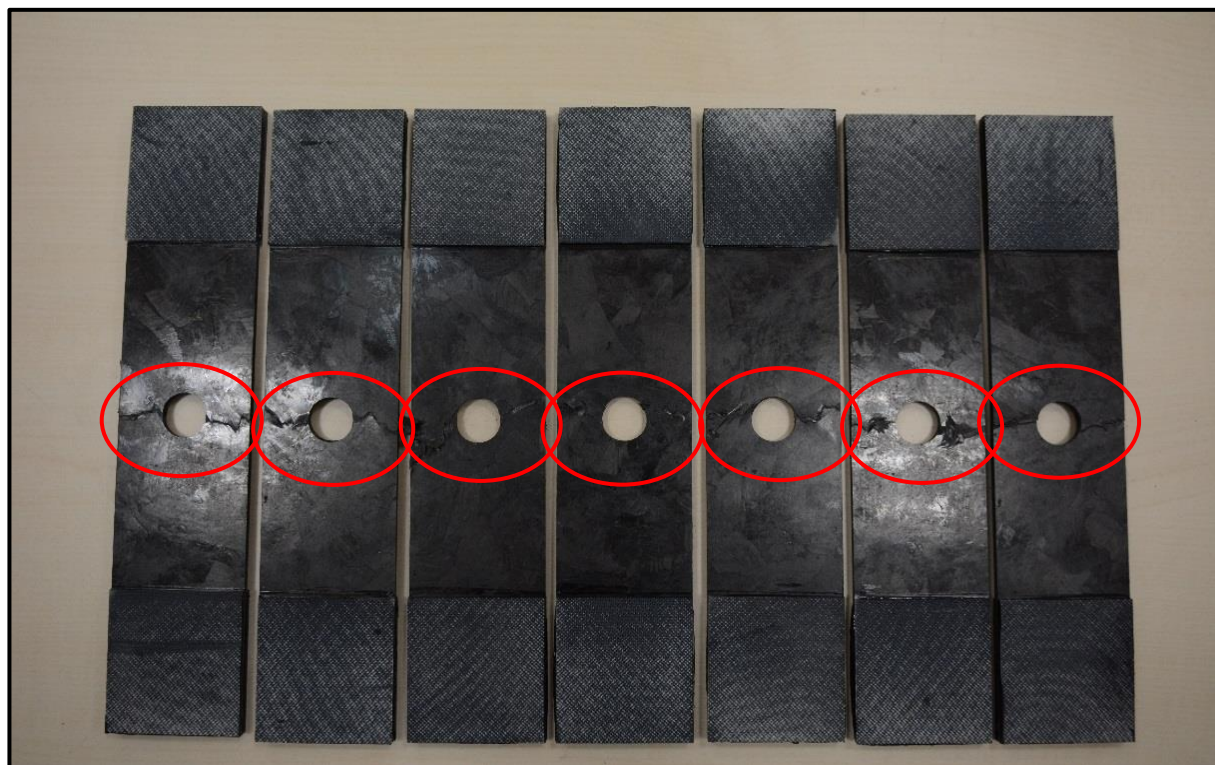


Figura 5.64: zone di frattura campioni T50OH-M77-CAS-B 01-07 (retro).

Le Figure 5.49-5.58 illustrano le immagini relative alle zone macroscopiche di frattura dei campioni T-M77-CAS, T50-M77-CAS e T100-M77-CAS, ossia dei campioni testati a trazione (UNT). Le immagini confermano quanto disponibile in letteratura^[5]: dopo la rottura, i campioni mostrano un buon livello di integrità senza separazione in due parti. La rottura è di tipo fragile e, il fatto che dopo frattura i campioni si separino soltanto con ulteriore sollecitazione permette di rendere evidente il meccanismo di cedimento. E' interessante notare come, nella maggior parte dei casi, le fratture tra provini adiacenti e appartenenti alla stessa piastra siano compenetranti. Questo permette di dedurre che, all'interno di una stessa piastra, la zona di frattura segua un percorso ben preciso che coincide con quello a minor resistenza. E' comunque noto dalla letteratura^[4] che, per questo tipo di materiale, la frattura non avviene necessariamente lungo il percorso più ricco di difetti e imperfezioni ma, in generale, dove la deformazione risulta essere più elevata. Inoltre, essendo un materiale randomico, la frattura non si colloca sempre nella stessa zona del campione ma, generalmente, si colloca nella parte centrale. Le rotture in concomitanza delle tabs non sono necessariamente dovute a zone meno resistenti ma possono essere dovute anche a problemi di incollaggio delle stesse ed al fatto che esse abbiano una forma spigolosa che funge da fattore di intensificazione degli sforzi. Queste considerazioni si ripetono anche per le fratture dei campioni testati a trazione OH (Figure 5.59-5.64), con la precisazione che per certi rapporti w/d le fratture avvengono maggiormente lontano dal foro (insensibilità al foro) mentre, per w/d troppo elevati (T50OH-M77-CAS-B), le fratture avvengono maggiormente in corrispondenza del foro a causa della bassa sezione resistente.

5.11.2 Compressione

In questa sezione vengono illustrate le immagini relative alle modalità di rottura per i campioni testati a compressione: in particolare, soltanto riguardo ai campioni CS in quanto nelle prove Compression Modulus non è prevista la frattura.

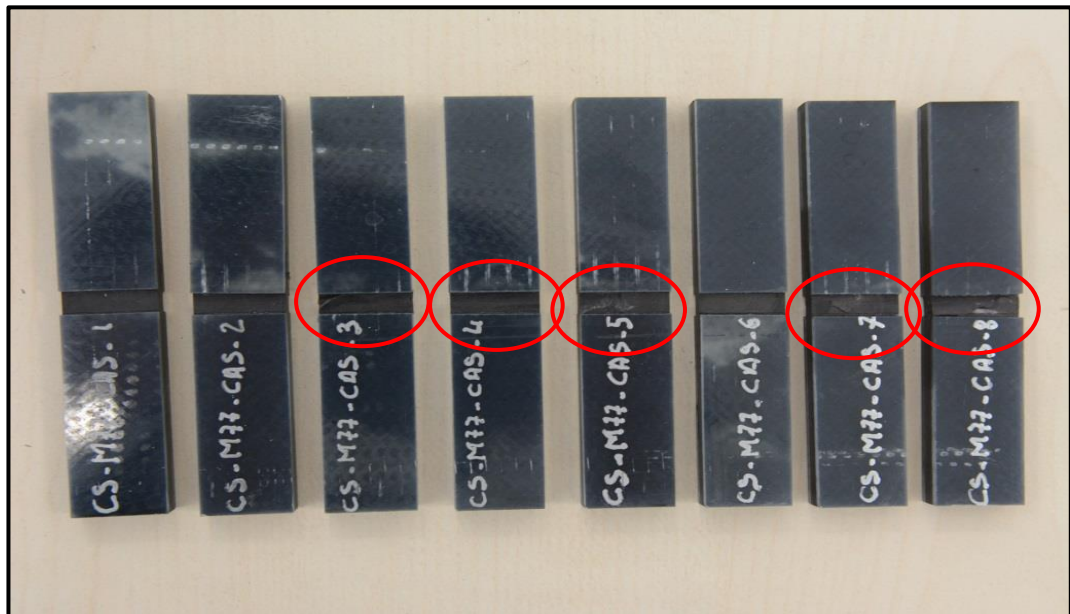


Figura 5.65: zone di frattura campioni CS-M77-CAS 01-08 (fronte).

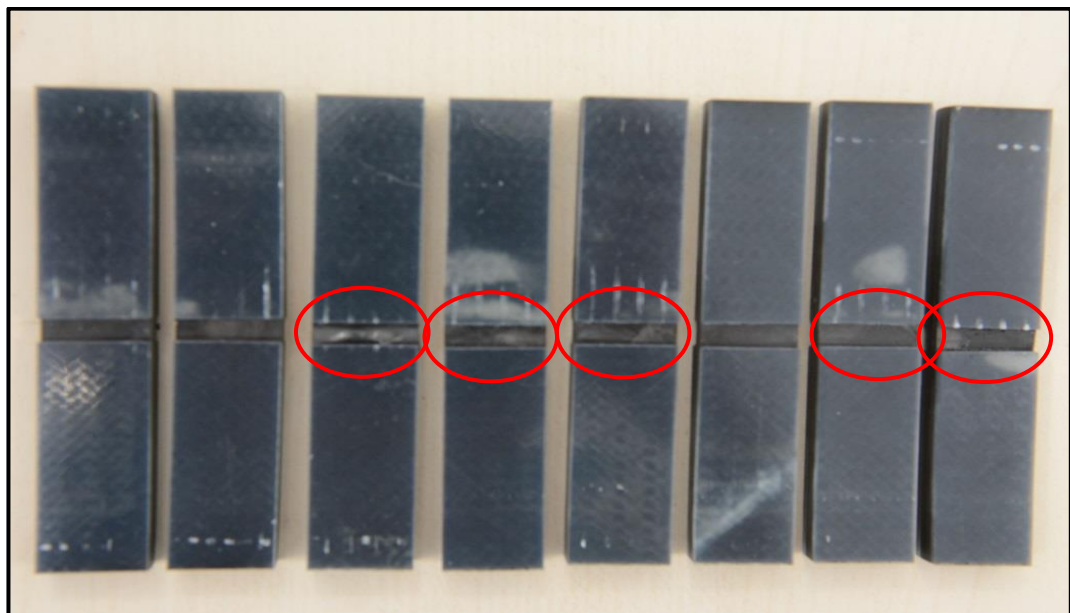


Figura 5.66: zone di frattura campioni CS-M77-CAS 01-08 (retro).

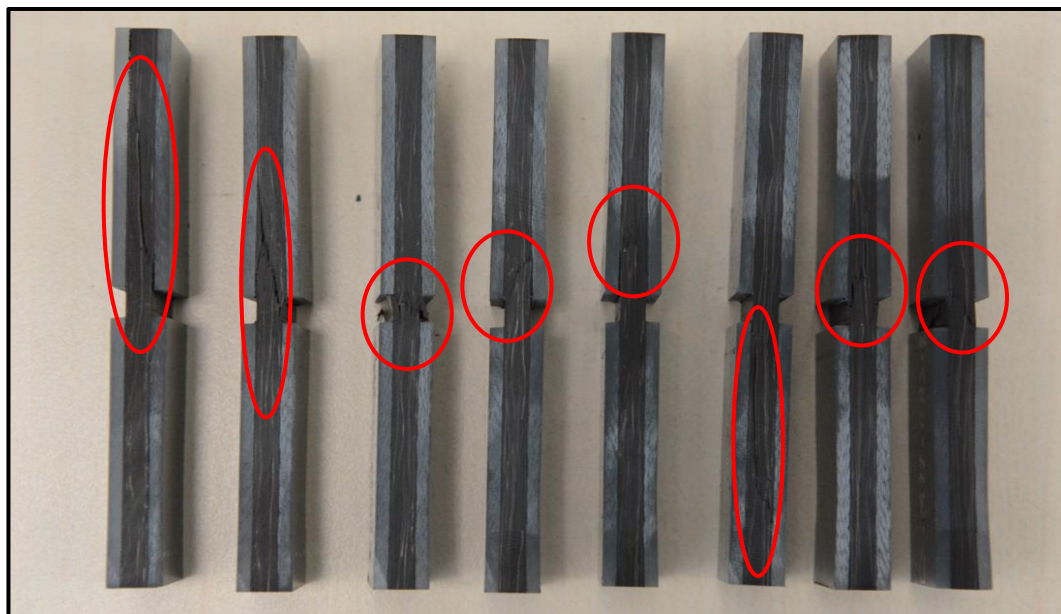


Figura 5.67: zone di frattura campioni CS-M77-CAS 01-08 (lungo la sezione).

Le Figure 5.65-5.67 illustrano le immagini relative alle zone macroscopiche di frattura dei campioni CS-M77-CAS, ossia dei campioni testati a compressione (CS – Compression Strength). E' possibile notare come, nella maggior parte dei casi, le fratture avvengano nella zona centrale dei campioni: la disposizione delle tabs e l'utilizzo del dispositivo antibuckling servono, infatti, a favorire che ciò avvenga. Per i campioni CS-M77-CAS 01, CS-M77-CAS 02 e CS-M77-CAS 06 la rottura avviene nella zona delle tabs, probabilmente a causa di un errore nella preparazione dei test. La modalità di frattura segue le considerazioni già fatte per le prove di trazione: essa è di tipo fragile e catastrofico e sembra manifestarsi come rottura della fibra e delaminazione fibra/matrice.

5.11.3 Fatica

In questa sezione vengono illustrate le immagini relative alle modalità di rottura per i campioni testati a fatica F-M77-CAS, sia secondo metodologia standard sia secondo termografia. Sui provini è possibile individuare il livello di carico secondo cui sono stati testati. In alcuni casi, la rottura non risulta evidenziata a causa di un'interruzione della prova (soprattutto nel metodo termografico) o del raggiungimento del runout.

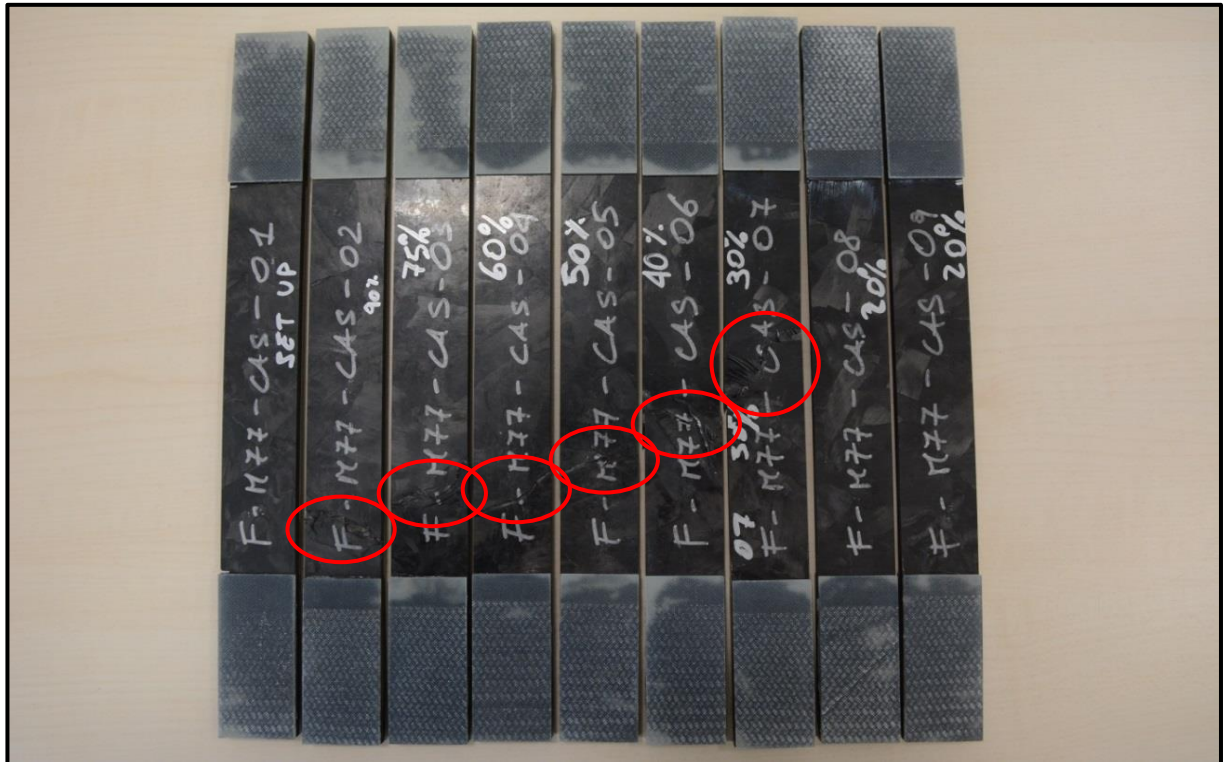


Figura 5.68: zone di frattura campioni F-M77-CAS 01-09 (fronte).

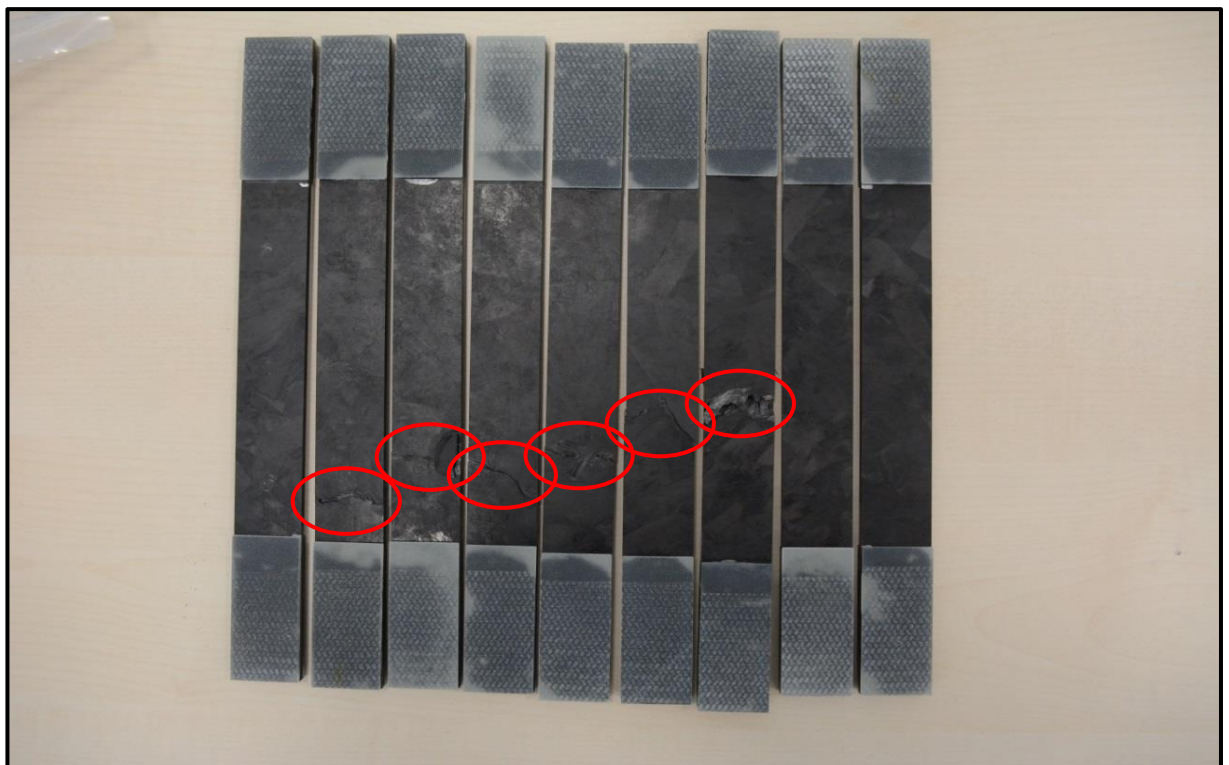


Figura 5.69: zone di frattura campioni F-M77-CAS 01-09 (retro).

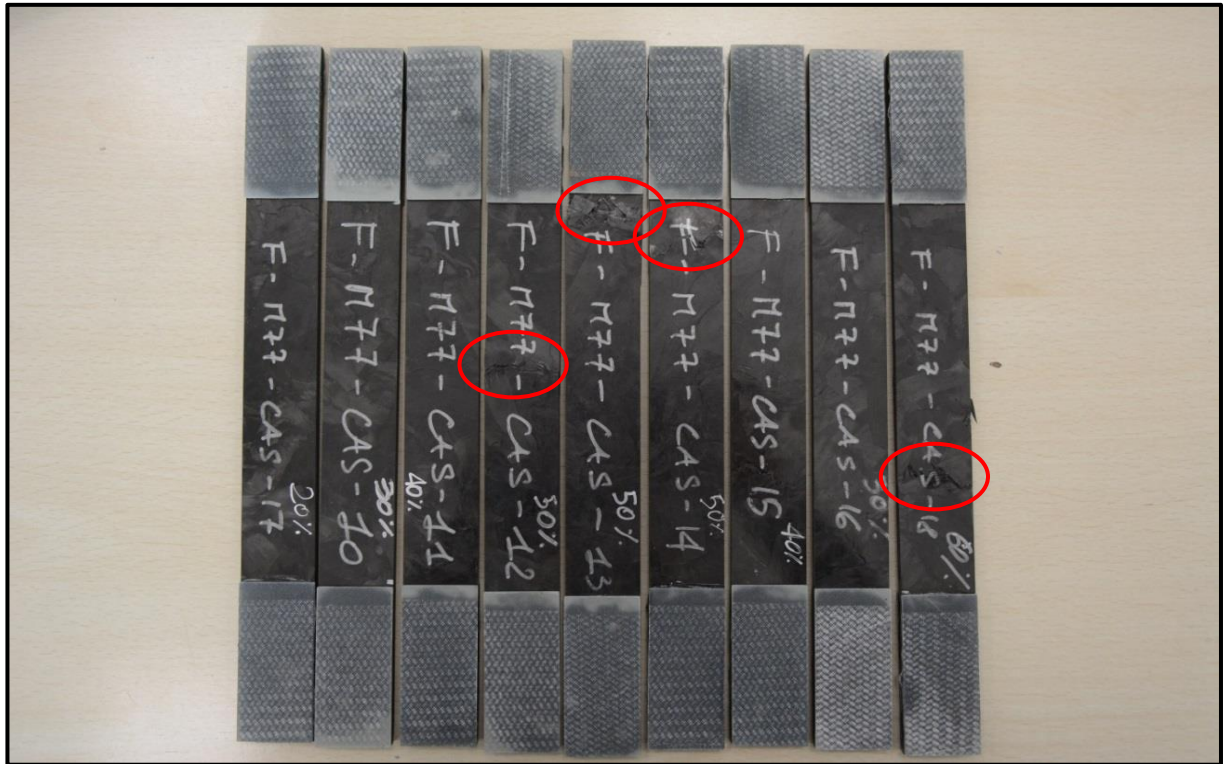


Figura 5.70: zone di frattura campioni F-M77-CAS 10-18 (fronte).

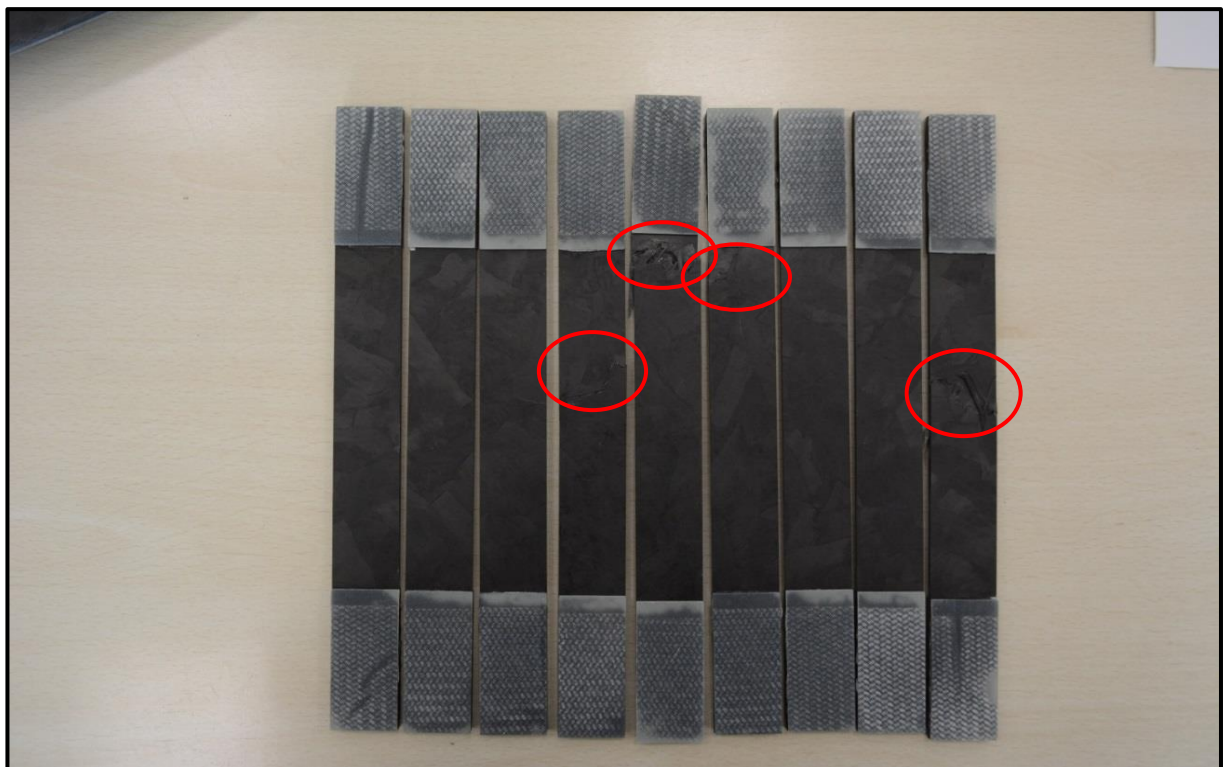


Figura 5.71: zone di frattura campioni F-M77-CAS 10-18 (retro).

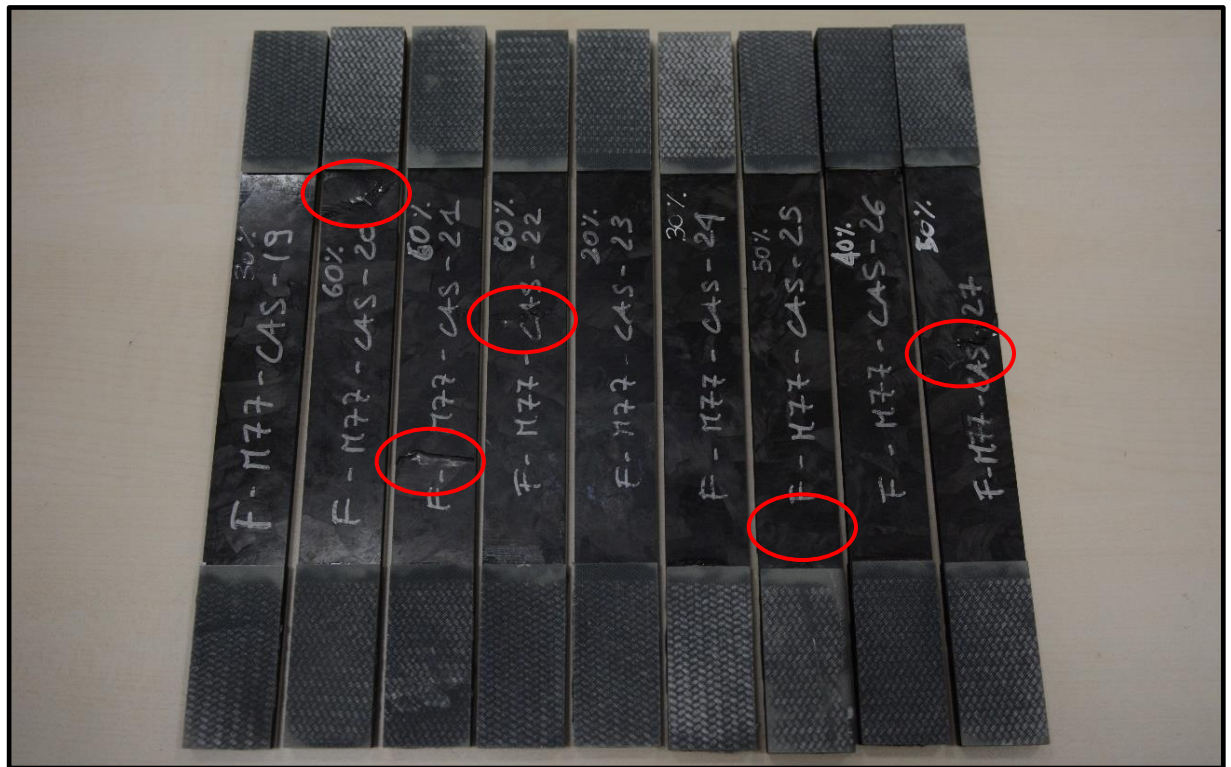


Figura 5.72: zone di frattura campioni F-M77-CAS 19-27 (fronte).

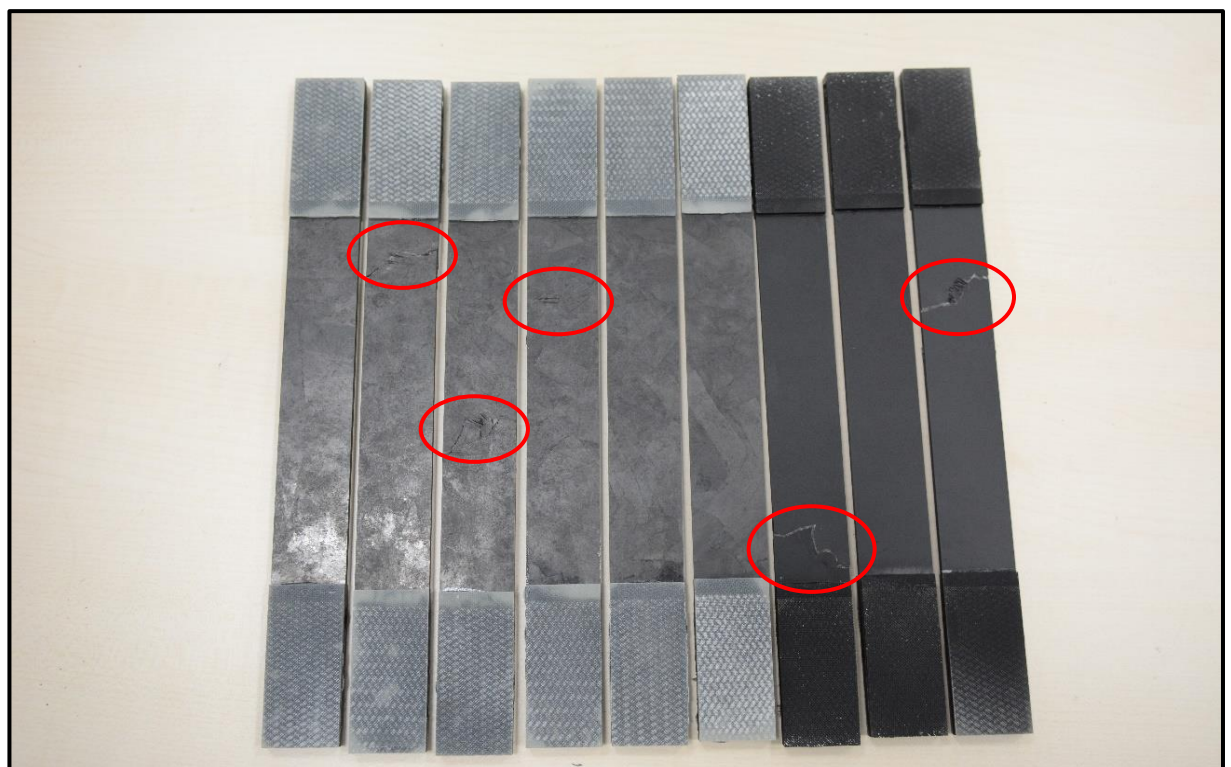


Figura 5.73: zone di frattura campioni F-M77-CAS 19-27 (retro).

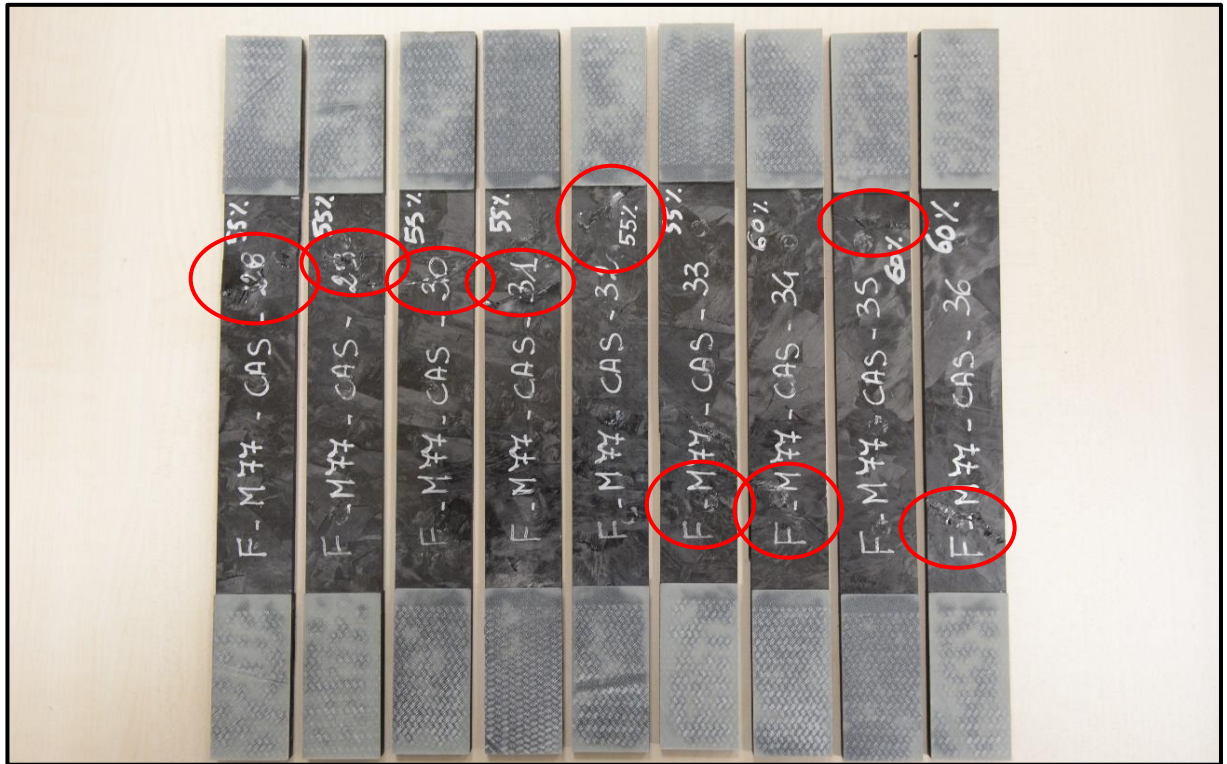


Figura 5.74: zone di frattura campioni F-M77-CAS 28-36 (fronte).

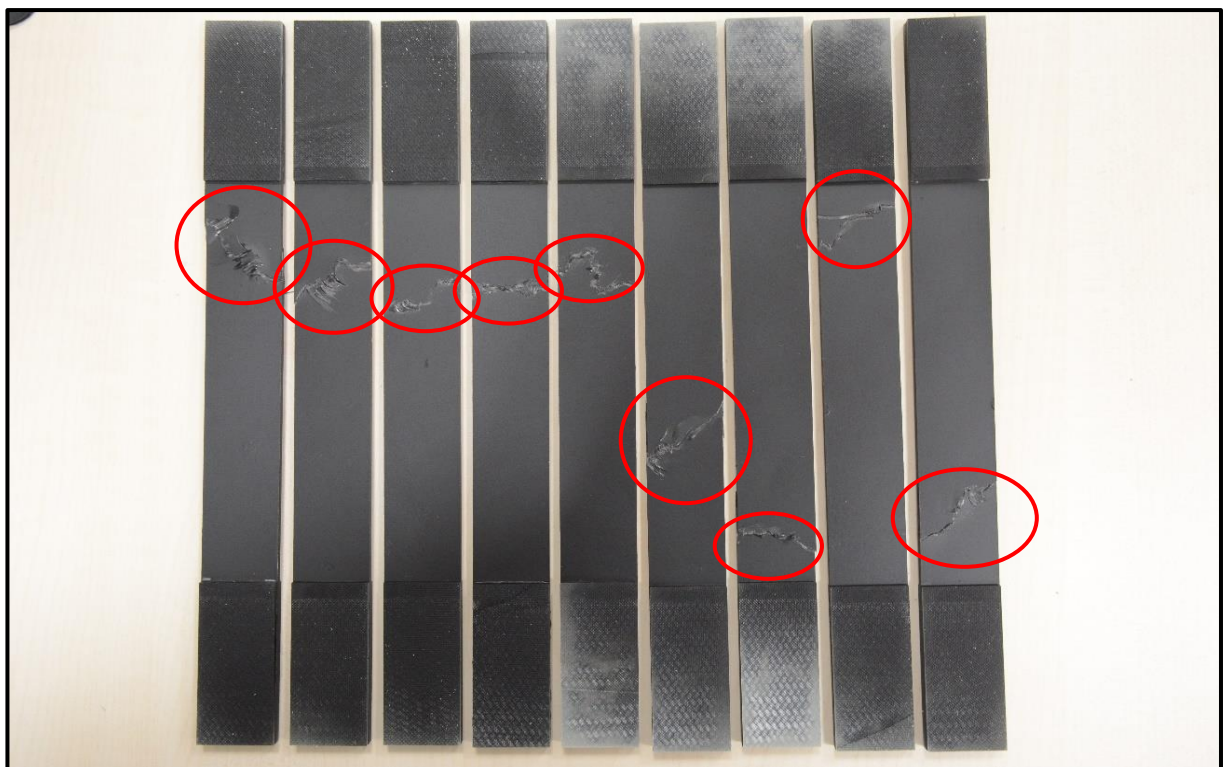


Figura 5.75: zone di frattura campioni F-M77-CAS 28-36 (retro).

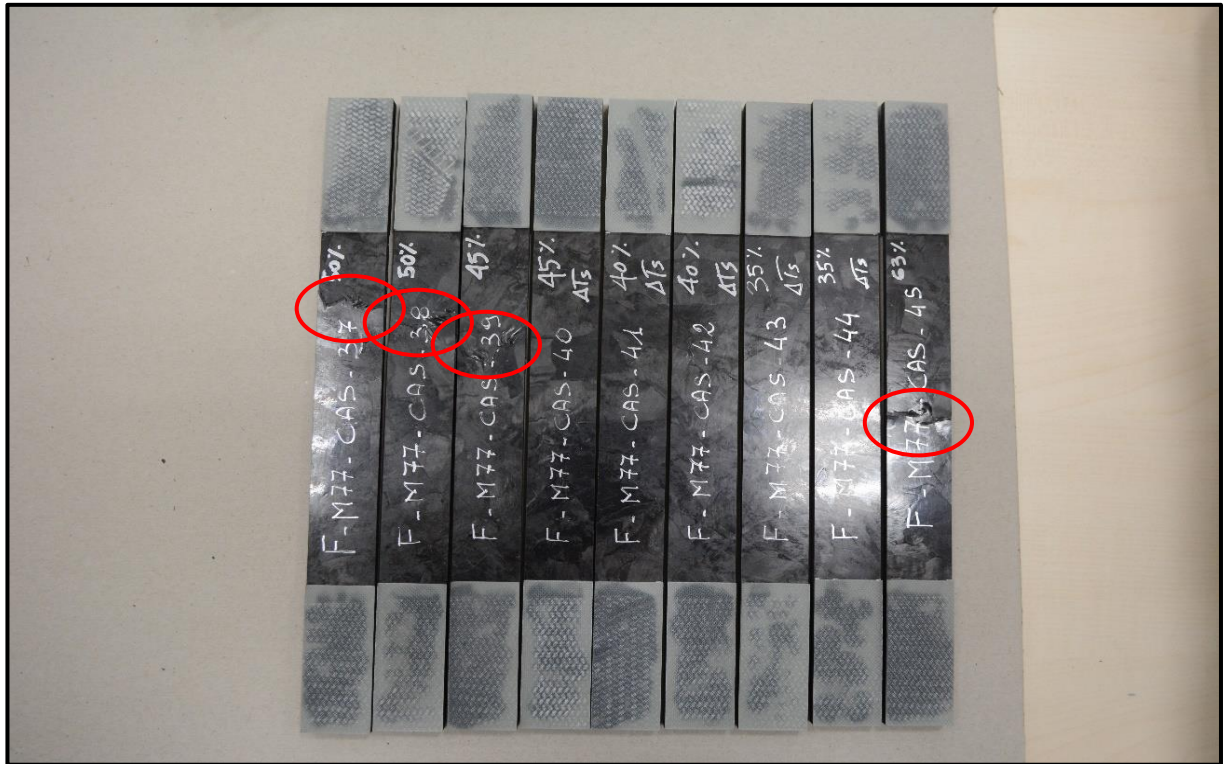


Figura 5.76: zone di frattura campioni F-M77-CAS 37-45 (fronte).

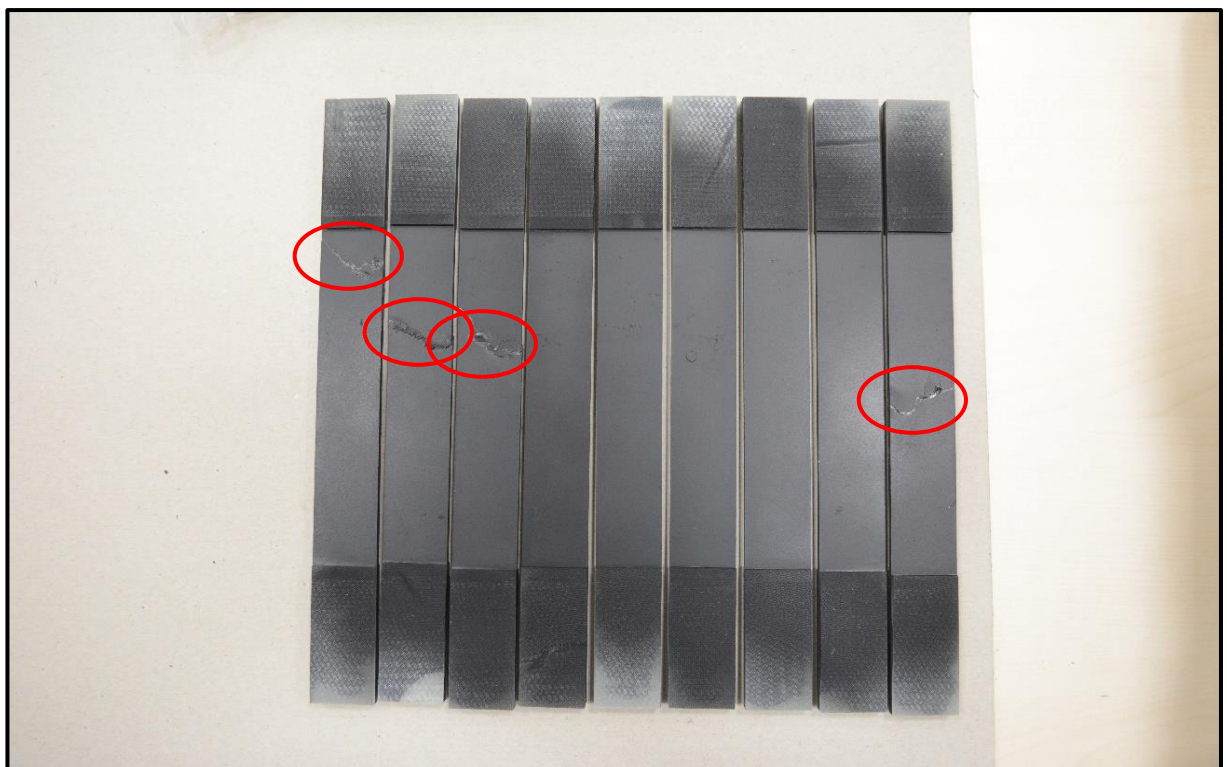


Figura 5.77: zone di frattura campioni F-M77-CAS 37-45 (retro).

Le *Figure 5.68-5.77* illustrano le immagini macroscopiche relative alle zone di frattura dei campioni F-M77-CAS, ossia dei campioni testati a fatica. A differenza degli altri che non presentano frattura a causa di un'interruzione della prova o di runout, il campione F-M77-CAS 01 è stato utilizzato per il set-up dei parametri di prova e della macchina di carico. La rottura, nei casi in cui si è manifestata, si presenta secondo le stesse modalità già discusse per la trazione. Essa si presenta come frattura fragile e catastrofica ed i campioni, escluso F-M77-CAS 13, risultano integri dopo la rottura senza separazione. Anche nei test di fatica, nella maggior parte dei casi, è interessante notare come le fratture tra provini adiacenti e appartenenti alla stessa piastra siano compenetranti. Questo permette di dedurre che, all'interno di una stessa piastra, la zona di frattura segua un percorso ben preciso che coincide con quello a minor resistenza. E' comunque noto dalla letteratura^[4] che, per questo tipo di materiale, la frattura non avviene necessariamente lungo il percorso più ricco di difetti e imperfezioni ma, in generale, dove la deformazione risulta essere più elevata. Le fratture si collocano maggiormente nelle zone centrali dei campioni e, quelle che si generano vicino le tabs non sono necessariamente dovute a presenza di difetti o zone poco resistenti: semplicemente potrebbero essere dovute ad un errore di montaggio del campione o di esecuzione della prova.

In seguito, a conclusione del capitolo, vengono illustrate immagini significative su ingrandimenti al microscopio delle zone di frattura.

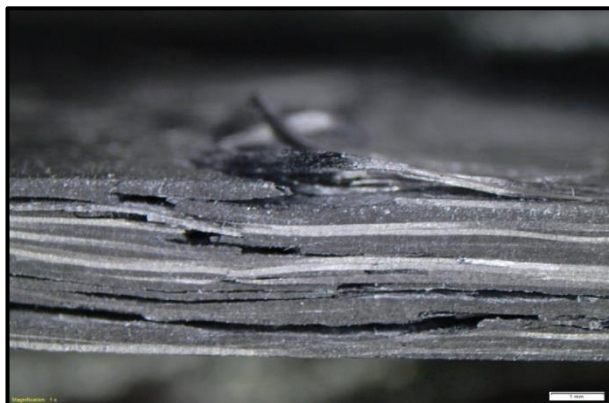


Figura 5.78: zone di frattura al microscopio con ingrandimento 1x.

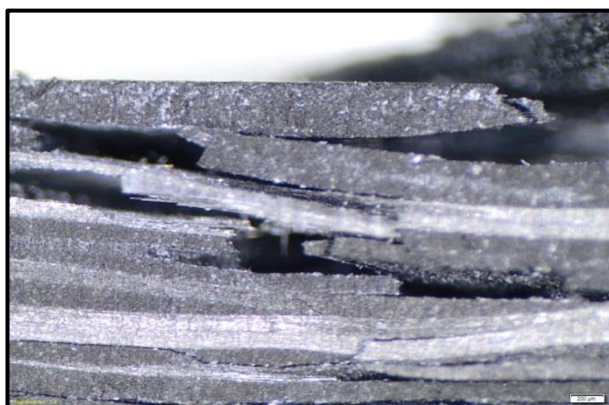


Figura 5.79: zone di frattura al microscopio con ingrandimento 3x.

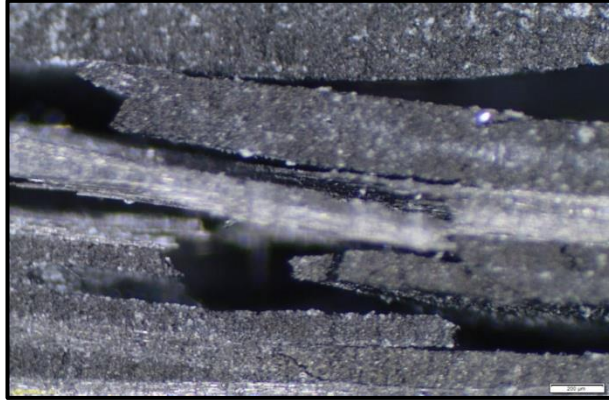


Figura 5.80: zone di frattura al microscopio con ingrandimento 5x.

Le Figure 5.78-5.80 illustrano le immagini microscopiche significative relative alle zone di frattura, con ingrandimenti 1x, 3x e 5x. Sembra che la frattura si sviluppi a partire dalla superficie in direzione trasversale per poi progredire in direzione longitudinale lungo alcune fibre e trasformarsi in delaminazioni locali tra fibre e matrice. In generale, il percorso di rottura non risulta preferenzialmente trasversale o longitudinale, ma sembra seguire quello a minor resistenza, che non necessariamente coincide con zone ricche di resina, porosità, vuoti o estremi delle fibre. Sostanzialmente, si può affermare che la rottura è un meccanismo dominato dalle caratteristiche della matrice, come noto dalla letteratura^[5] a disposizione.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Nel seguente lavoro di tesi è stato condotto lo studio sperimentale riguardo il comportamento a fatica di compositi in fibra di carbonio discontinua e matrice epossidica, in particolare dell'HexMC M77 i2000 RA. Lo studio è stato effettuato a partire da analisi micrografiche, analisi DSC ed analisi DMA con le quali è stato possibile dimostrare, sia la concordanza tra i dati ottenuti riguardo le proprietà termiche del materiale e quelli dichiarati dal TDS (Technical DataSheet) del fornitore, sia la bontà e la ripetibilità del processo di produzione. L'indagine è proseguita tramite una caratterizzazione statica del materiale, con prove di trazione e prove di compressione. Dalle prove di trazione UNT su campioni a diversa larghezza è stato possibile dimostrare come la resistenza a rottura (σ_r) del materiale risulti crescente con la larghezza dei campioni, mentre il modulo elastico (E) rimanga costante indipendentemente da quest'ultima. Dall'analisi delle prove di trazione OH su provini a diversi d/w, è stato possibile osservare l'insensibilità del materiale alla presenza di un foro, precisando però che esiste un valore limite di d/w per cui le fratture si verificano tutte in corrispondenza dello stesso a causa di una bassa sezione resistente. Anche nel caso delle prove di trazione OH il modulo elastico (E) e la resistenza a rottura (σ_r) sono risultati in linea con quanto dichiarato nel TDS. Le prove di compressione hanno invece mostrato una forte discordanza in termini di resistenza a rottura (σ_r) rispetto al TDS, mentre il modulo elastico è risultato in linea con quanto ottenuto nelle altre prove. Una volta terminata la caratterizzazione statica, i valori ottenuti dalle prove UNT sono stati presi come punto di partenza per le prove dinamiche: non conoscendo l'ordine di grandezza del limite di fatica del materiale sono state scelte delle percentuali della σ_r come livelli di carico secondo cui condurre le prove di fatica. Durante i test dinamici è stata eseguita un'analisi sull'andamento della rigidezza del materiale testimoniando come essa manifesti due tipici andamenti: nel caso in cui si ha la rottura del campione la diminuzione della rigidezza segue tre fasi principali, mentre nel caso in cui i campioni raggiungono il runout due fasi. Dai dati in output delle prove di fatica è stata ricavata la curva di Woehler che ha esibito un'elevata dispersione dei dati. Infine, è stata condotta un'analisi termografica per la valutazione del limite di fatica secondo due metodi: uno ha previsto l'utilizzo di n provini ognuno come dato termico, mentre l'altro ha previsto l'utilizzo di un solo provino allo scopo di eliminare la variabilità dovuta all'uso di campioni differenti e ridurre ulteriormente i tempi di prova. I metodi hanno portato sostanzialmente allo stesso risultato dimostrando quindi una concordanza tra loro. Confrontando il limite di fatica ottenuto tramite l'analisi termografica e tramite la curva di Woehler è stato possibile confermare la validità del modello, in quanto i risultati ottenuti sono accettabilmente concordanti. E' stato dunque possibile dimostrare come il modello termografico costituisca un metodo valido per la valutazione del limite di fatica in breve tempo e come esso possa essere utilizzato per generare un confronto immediato tra vari materiali e costituire un punto di partenza come parametro di progettazione a fatica di componenti. In ogni caso, in tutte le prove eseguite è stata riscontrata una più o meno elevata variabilità nei dati ottenuti: è possibile affermare che la dispersione dei dati sia inevitabilmente legata alla natura randomica del materiale che non garantisce, anche considerando la stessa piastra, l'ottenimento di campioni prestazionalmente confrontabili. Per migliorare questo tipo di situazione si potrebbe lavorare su un processo di produzione del prepreg che garantisca una somiglianza nel posizionamento delle fibre e nella percentuale fibra/matrice in ogni zona del rotolo. Per implementare, invece, questa analisi sarebbe interessante utilizzare il modello termografico con l'ausilio di due termocamere, in modo da poter analizzare l'andamento della temperatura su entrambe le superfici a vista del campione. Inoltre,

sarebbe utile applicare il modello termografico su diversi materiali e generare un confronto con la metodologia tradizionale, oltre che implementare il numero di campioni testati al fine di avere una maggior mole di dati per la determinazione della curva di Woehler.

Riferimenti

- [1] *“Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components”* – G.La Rosa, A.Risitano – *International journal of fatigue* 22 (2000) 65-73;
- [2] *“Fatigue of woven composite laminates under tensile and compressive loading”* – Marino Quaresimin – *ECCM 10, June 3-7 (2002)*;
- [3] *“Notched behaviour of prepreg-based discontinuous carbon fiber/epoxy system”* – P.Feraboli, J.C. Halpin et al – *Composites: Part A* 40 (2009) 289-299;
- [4] *“Defect and damage analysis of advanced discontinuous carbon/epoxy composite materials”* – P.Feraboli, T.Cleveland, L. DeOto ed al, *Composites: Part A* 41 (2010) 888-901;
- [5] *“Characterization of fatigue damage in long fiber epoxy composite laminates”* – S.Giancane, F.W. Panella, V.Dattoma – *International journal of fatigue* 32 (2010) 46-53;
- [6] *“Characterization of prepreg-based discontinuous carbon fiber/epoxy system”* – P.Feraboli, E.Peitso, T.Cleveland, F.Deleo – *Journal of reinforced plastics and composites*, vol.28 – 2009;
- [7] *“Modulus measurement for prepreg-based discontinuous carbon fiber/epoxy system”* – P.Feraboli, E.Peitso, T.Cleveland – *Journal of composite materials*, vol.43 – 2009;
- [8] *“ Report di laboratorio ACLSD Automobili Lamborghini S.p.A”*;
- [9] *“Tecnologie e materiali aerospaziali”* – Ver. 01 – G.Sala, L.Di Landro, A.Airoidi, P.Bettini – *Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale – Politecnico di Milano*
- [10] *“Tesi Simone Chiari”* – Simone Chiari
- [11] *“Technical DataSheet HexMC M77 i2000”* – Hexcel
- [12] *Altre fonti – Web*
- [13] *“Progettazione meccanica con materiali non convenzionali”* – B.Zuccarello

[14] ‘Normativa ASTM D 3039’