

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Dicembre 2023

Tesi di Laurea Magistrale

Fatica ad altissimo numero di cicli (VHCF) di provini in materiale composito



Relatore:

Prof. Davide Salvatore Paolino

Correlatori:

Ing. Carlo Boursier Niutta

Ing. Andrea Tridello

Candidata:

Valentina Di Laura

Sommario

In un contesto ingegneristico nel quale il requisito di leggerezza, senza trascurare la resistenza, diventa sempre più ricercato, i materiali compositi rivestono un ruolo cardine e le applicazioni che li riguardano sono in continuo aumento. L'obiettivo della seguente tesi è lo studio del comportamento a fatica ad altissimo numero di cicli (maggiore di 10^7) di provini laminati in tessuto in fibra di carbonio, con rapporto di sollecitazione R pari a -1 , quindi con pari ampiezza di sollecitazione a trazione e a compressione. Il presente lavoro è volto a indagare in dettaglio lo stato tensionale dei provini in composito e come la geometria ne influenzi la rottura a fatica. Il lavoro si è anche concentrato sull'analisi dell'attrezzatura sperimentale e delle modalità di prova. Considerando che le attrezzature sperimentali convenzionali per fatica giga-ciclica richiedono tempi di prova troppo alti (anche mesi), è stata utilizzata una macchina di prova nella quale si è aumentata la frequenza del ciclo di sollecitazione fino ad arrivare a frequenze di 20kHz (ultrasuoni). Il banco prova è costituito da un trasduttore piezoelettrico e un sonotrodo al quale viene incollato il provino. Si è registrato lo spostamento all'estremità del provino, effettuando un controllo ad anello chiuso. Il surriscaldamento dei provini è stato monitorato tramite un sensore ad infrarossi e limitato mediante un sistema di raffreddamento ad aria. Per eseguire le prove, i provini sono stati progettati, attraverso un'analisi FEM modale, per essere in risonanza a 20 kHz e con l'obiettivo di massimizzare il rapporto tensione applicata-spostamento imposto. Le proprietà elastiche del materiale sono state valutate attraverso la tecnica Impulse Excitation Technique (IET) di eccitazione ad impulso. Sono stati progettati sia provini hourglass, tali da avere un'alta tensione assiale ma anche tensioni tangenziali che possono influenzare la risposta a fatica, sia provini a barra con tabs, nei quali non sono presenti tensioni tangenziali. La calibrazione tra la tensione elettrica in input e la deformazione del provino in output è stata eseguita con estensimetri. Questi ultimi sono stati utilizzati anche per escludere la flessione sia nel piano che fuori dal piano del provino. Inoltre, mediante gli estensimetri, è stata verificata la presenza di tensioni tangenziali nel provino a hourglass. L'effetto delle tensioni tangenziali si evidenzia sulla posizione delle superfici di rottura che è risultata in accordo con le previsioni secondo il criterio di rottura di Tsai-Wu. Dalle prove sui provini a barra è emersa la problematica nota come "tab failure"[1], molto comune nei materiali compositi. Sono quindi stati adottati vari accorgimenti nell'esecuzione del test sperimentale per limitare il fenomeno. Come ultimo step è stato progettato un provino quasi isotropo, ovvero con *stacking sequence* [0/90/45/-45]_s, che non risente delle tensioni tangenziali. Dalle prove condotte sui provini quasi isotropi, confrontandole con quelle eseguite sui provini hourglass con tensioni tangenziale, si può concludere che c'è notevole influenza tra le tensioni normali e quelle tangenziali sulla risposta a fatica del materiale.

Indice

1. Introduzione	1
2. I materiali compositi	2
2.1 La matrice	2
2.2 Il rinforzo	3
2.3 Lamine e laminati	5
2.4 Tessuti	6
2.5 Terminologia	8
2.6 Meccanismi di danneggiamento	10
2.6.1 Danneggiamento dell'interfaccia matrice-fibra (Debonding)	11
2.6.2 Danneggiamento della matrice (Matrix cracking)	11
2.6.3 Rottura delle fibre (Fiber breakage)	11
2.6.4 Delaminazione	11
3. Fatica dei compositi: stato dell'arte	13
4. Fatica ad altissimo numero di cicli dei compositi: Applicazioni e problematiche	15
4.1 Fatica ad altissimo numero di cicli: stato dell'arte	17
5. Precedente attività e obiettivi della tesi	20
6. Validazione estensimetrica	22
6.1 Gli estensimetri	22
6.1.1 Installazione degli estensimetri	25
6.2 Validazione del modello FEM sul provino Hourglass	25
6.3 Verifica dell'assenza di flessione nel piano durante la prova ad ultrasuoni	34
6.4 Verifica dell'assenza di flessione fuori dal piano durante la prova ad ultrasuoni	37
7. Materiali	42
7.1 Easy Composites XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre	42
7.2 Easy Composite 100g 2x2 Twill Woven Glass Cloth	44
7.3 IN2 Epoxy Infusion Resin	44
7.4 SikaPower®-1277	45
7.5 Loctite HY 4070	45
7.6 3M™ Scotch-Weld™ EC-9323 B/A	45
8. Metodi	47
8.1 Metodi sperimentali	47
8.1.1 Realizzazione delle piastre di composito	47
8.1.2 Taglio dei provini	50

8.1.3 Famiglie di provini con tabs	51
8.1.4 Misurazione delle proprietà meccaniche	55
8.1.5 Realizzazione del test per le prove di fatica VHCF	57
8.2 Metodi numerici	62
8.2.1 Provino con tabs	62
8.2.2 Provino “smooth hourglass”	66
8.2.3 Analisi di buckling	70
8.2.4 Provino quasi isotropo.....	71
9. Risultati	76
9.1 Risultati e considerazioni per i provini con tabs.....	76
9.2 Risultati e considerazioni per i provini quasi isotropi.....	93
10. Conclusioni.....	108
BIBLIOGRAFIA.....	110

Indice delle figure

Figura 1: schematizzazione di un materiale composito [4]	2
Figura 2: esempio di composito particellare [7]	3
Figura 3: esempi di compositi rinforzati con fibre, continue o corte [8]	3
Figura 4: barra che schematizza una singola fibra [5]	4
Figura 5: esempio di un laminato [9]	5
Figura 6: esempio di una struttura sandwich [4]	5
Figura 7: un tipico laminato con stacking sequence riportata [5]	6
Figura 8: trama e ordito in un tessuto [9]	6
Figura 9: plain weave- twill weave- satin weave [10]	7
Figura 10: scale di dettaglio per lo studio dei compositi [6]	8
Figura 11: porosità in un composito [12]	10
Figura 12 [12]: Debonding (A)- Matrix cracking (B)- Fiber breakage (C)- Delaminazione (D)	10
Figura 13: modi di apertura [13]	12
Figura 14: provino dogbone usato da Flore	17
Figura 15: curva S-N dello studio di Flore [15]	17
Figura 16: curva SN con pendenze diverse in base al tipo di test [15]	18
Figura 17: provino con un solo tab [16]	18
Figura 18: provino con due tabs [16]	18
Figura 19: livellamento della curva SN nella regione finale [16]	19
Figura 20: rotture dei provini hourglass della precedente attività	20
Figura 21: distribuzione della tensione assiale nel provino hourglass.	20
Figura 22: distribuzione della tensione tangenziale nel provino hourglass.	20
Figura 23: estensimetro filiforme [18] estensimetro con griglia [18]	22
Figura 24: elementi di base di un estensimetro [18]	22
Figura 25: schematizzazione del Ponte di Wheatstone [19]	23
Figura 26: circuito a un quarto di ponte [19]	24
Figura 27: circuito a mezzo ponte [19]	24
Figura 28: rosetta utilizzata (C2K-XX-G1350/SP70*) [21]	26
Figura 29: provino hourglass con rosetta applicata	27
Figura 30: dimensioni del provino hourglass	27
Figura 31: punto di applicazione del centro della rosetta, con raffigurato l'andamento delle tensioni tangenziali nel provino hourglass	27
Figura 32: esempio delle acquisizioni dei segnali in Volt a 1,2V in ingresso	28
Figura 33: deformazioni principali e deformazioni nelle direzioni degli estensimetri della rosetta [23]	29
Figura 34: elementi selezionati	30
Figura 35: diagramma dello scorrimento angolare rilevato nel caso numerico (blu) e nel caso sperimentale (arancione)	32
Figura 36: diagramma che mostra l'andamento della deformazione lungo x per ogni misurazione, nel caso numerico (blu) e nel caso sperimentale (arancione)	33
Figura 37: Estensimetri per studiare eventuale flessione nel piano: Applicazione sul provino hourglass (a)- dettaglio dell'applicazione (b)- punti di applicazione sull'andamento di tensioni tangenziali riportato (c)	34
Figura 38: estensimetro utilizzato (HBM-0.3/120 LY11) [24]	34
Figura 39: micro deformazione nei due canali (blu=c1 e arancione=c2)	36
Figura 40: modo di vibrare a flessione nel piano del provino hourglass	36
Figura 41: applicazione degli estensimetri HBM-1.5/350 XY91 sulle due facce del provino	37
Figura 42: schema dell'estensimetro HBM-1.5/350 XY91 [25]	37

Figura 43: estensimetro HBM-1.5/350 XY91 collegato ai cavi elettrici e visualizzazione del punto di applicazione dello stesso sull'andamento della tensione assiale.....	38
Figura 44: valore di micro deformazione per ogni tensione elettrica in ingresso, nei due canali (blu=c1; arancione=c2).....	39
Figura 45: modo di vibrare secondo flessione fuori dal piano del provino hourglass.....	40
Figura 46: aspetto di XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre [26].....	42
Figura 47: ciclo di cura di XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre [26].....	43
Figura 48: aspetto del tessuto in fibra di vetro impiegato.....	44
Figura 49: adesivi usati: A) IN2 Epoxy Infusion Resin[28]; B) SikaPower®-1277[29]; C) Loctite HY 4070[30]; D) 3M Scotch-Weld[31].....	46
Figura 50: taglio di otto fogli di prepreg.....	47
Figura 51: lastra con sealant tape applicato e cera distaccante passata.....	48
Figura 52: da sinistra a destra: Breather, Peel-Ply e Bag [26].....	48
Figura 53: fasi intermedie nel processo di creazione della piastra.....	49
Figura 54: rimozione dei tessuti di Breather, peel-ply e Bag(A) - piastra terminata (B).....	49
Figura 55: Wazer Water Jet (A)- provini tagliati (B)-provini pronti (C).....	50
Figura 56: fasi intermedie nel processo di realizzazione del provino con tabs: A) taglio di provini e tabs; B) stampo e provino; C) provino con pesi; D) provino pronto.....	51
Figura 57: immagine del primo provino con tabs progettato e realizzato con dimensioni riportate.....	52
Figura 58: provini della famiglia A.....	52
Figura 59: provini della famiglia B.....	52
Figura 60: provini della famiglia C.....	53
Figura 61: provini della famiglia D.....	54
Figura 62: provini della terza famiglia.....	54
Figura 63: attrezzatura per la tecnica IET.....	55
Figura 64: dominio del tempo (A) e dominio delle frequenze (B) del segnale.....	56
Figura 65: impatto per indurre il modo flessionale fuori dal piano (a), flessionale nel piano (b), longitudinale (c), torsionale (d) [34].....	56
Figura 66: elementi principali della macchina per la prova VHCF.....	57
Figura 67: forme modali di spostamento (rosso) e tensione assiale (verde) con riportati i nodi (N) e i ventri (V) [35].....	58
Figura 68: dettaglio di un provino incollato al sonotrodo.....	59
Figura 69: interfaccia del programma LK-Navigator(A)- interfaccia del sistema Branson per effettuare la Horn Signature(B).....	60
Figura 70: interfaccia del file di calibrazione. Viene cerchiata la "slope" stress-voltage.....	61
Figura 71: discretizzazione del primo provino. A: vista nel piano xy; B: vista nel piano xz.....	63
Figura 72: effetto della lunghezza del provino (Lcomp) sulla frequenza (A), sulla tensione massima del provino (B), sulla tensione massima nell'adesivo (C) ed effetto della lontananza dei tabs sulla tensione nell'adesivo (D).....	64
Figura 73: andamento della tensione lungo x nel provino con i tabs progettato.....	65
Figura 74: grandezze di riferimento di un provino di geometria hourglass.....	66
Figura 75: effetto della sezione minore dell'hourglass su frequenza (A), tensione assiale massima nel provino (B) e tensione tangenziale massima nel provino (C).....	67
Figura 76: effetto della lunghezza dell'hourglass su frequenza del modo longitudinale (A), tensione assiale massima nel provino (B) e tensione tangenziale massima nel provino (C).....	67
Figura 77: effetto di B sulla frequenza del modo longitudinale (A), tensione assiale massima nel provino (B) e tensione tangenziale massima nel provino (C).....	68
Figura 78: andamento della tensione assiale e della tensione tangenziale nel provino smooth hourglass progettato.....	69
Figura 79: provino hourglass con i node-set evidenziati.....	70

Figura 80: schematizzazione degli otto layer nel provino quasi isotropo, con specificati i materiali 1 e 2.....	71
Figura 81: material card del materiale 1 nel provino quasi isotropo	71
Figura 82: tensore di rotazione.....	73
Figura 83: material card del materiale 2 nel provino quasi isotropo	73
Figura 84: confronto tra la geometria dell'hourglass quasi isotropo (A) e geometria dell'hourglass (B)	74
Figura 85: rottura dei tabs nei provini 2(A); 3 (B); 3' (C).....	78
Figura 86: esempio di una delle prove condotte con gli estensimetri per identificare il tempo di “pulse” (heating time) e il livello di “pause” (cooling time) ottimali	80
Figura 87:rottore dei tabs nei provini 1A (A); 2A (B); 4A (C); 5A (D)	81
Figura 88: distacco dei tabs nella famiglia B: 1B (A); 2B (B); 3B (C); 5B (D, E)	82
Figura 89: distacco dei tabs nella famiglia C: 1C (A); 2Cs (B)	83
Figura 90: visualizzazione dei cinque getti di aria compressa sulle zone più critiche del provino (1D)	85
Figura 91: rottura dei tabs nel provino 1D (A) 2D (B e C).....	86
Figura 92: rottura dei tabs nel provino 3D (A e B).....	86
Figura 93:rottura adesivo e tab nel provino 4D s	87
Figura 94: rottura tab nel provino 5Ds	87
Figura 95: 4B e 2Cs nella famiglia 3 (3M Scotch-Weld).....	88
Figura 96: rottura del provino 1	91
Figura 97: rottura del provino 2	92
Figura 98: visualizzazione dei set di nodi vincolati e lasciati liberi nel provino hourglass nel test a trazione.....	94
Figura 99: output dell'analisi di trazione. A:stato 0;B:stato 1. Notare che i nodi delle estremità si sono spostati.....	94
Figura 100: Andamento delle tensioni assiali (A) e tangenziali (B) nel test di trazione sul provino hourglass.....	95
Figura 101:provino per prova di trazione all'interno della macchina Zwick Roell Z050.....	95
Figura 102: tensione assiale al variare del tempo di test nel provino T1 nella prova di trazione secondo la normativa ASTM.....	96
Figura 103: afferraggio con dispositivo anti-buckling	97
Figura 104: tensione assiale al variare del tempo di test nel provino C2 da compressione	97
Figura 105: esempi di riferimenti (sono tre in questo caso) in DICe	98
Figura 106: %x-frame ; %y-frame in DICe su TA1	99
Figura 107: carico-epsilon x (A) e epsilon y(B).....	99
Figura 108: grafico $\tau - \gamma$ percentuale.....	100
Figura 109: mappa di Tsai Wu nel caso della statica nell'hourglass(A) e nello smooth hourglass(B) 101	
Figura 110: (A) mappa di Tsai Wu nel caso della fatica nell'hourglass (con riportate le posizioni delle superfici di frattura) e nello smooth hourglass(B).....	101
Figura 111: posizione di rottura dell'hourglass nel caso quasi statico	102
Figura 112: posizione di rottura dello smooth hourglass nel caso quasi statico.....	102
Figura 113: rottura in statica del primo provino hourglass quasi isotropo (A), dettaglio (B)	103
Figura 114: rottura in statica del secondo provino hourglass quasi isotropo(A), dettaglio (B).....	103
Figura 115: ingrandimento delle superfici di frattura dei due provini hourglass q.i. testati staticamente	103
Figura 116: raffreddamento dei provini hourglass quasi isotropi testati a fatica.....	105
Figura 117: provini hourglass q.i. testati a fatica, rotti al centro	105
Figura 118: diagramma SN hourglass e hourglass q.i.	106
Figura 119: card dell'analisi di buckling su hourglass q.i.....	107

Indice delle tabelle

Tabella 1: resistenza elettrica e fattore di taratura di C2K-XX-G1350/SP70*	26
Tabella 2: media del valore di tensione misurato nelle tre direzioni (rosetta C2K-XX-G1350/SP70*)	29
Tabella 3: deformazione associata a ogni valore misurato, nelle tre direzioni (rosetta C2K-XX-G1350/SP70*)	29
Tabella 4: valori di deformazioni principali massime e minime, angolo tra direzione di misura e direzione principale, e scorrimento angolare al variare della tensione elettrica in ingresso (rosetta C2K-XX-G1350/SP70*)	30
Tabella 5: deformazione principale massima e minima numeriche, scorrimento angolare massimo numerico	31
Tabella 6: errore su γ_{max}	31
Tabella 7: deformazione lungo x nel caso numerico e nel caso sperimentale	32
Tabella 8: errore sulla deformazione lungo x tra caso numerico e caso sperimentale	33
Tabella 9: resistenza elettrica e fattore di taratura di HBM-0.3/120 LY11 [24]	34
Tabella 10: media del valore di tensione misurato nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-0.3/120 LY11)	35
Tabella 11: deformazioni nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-0.3/120 LY11)	35
Tabella 12: differenza percentuale delle due misurazioni di deformazione (nei due canali) rispetto alla loro media	36
Tabella 13: resistenza elettrica e gage factor di HBM-1.5/350 XY91 [25]	38
Tabella 14: media del valore di tensione misurato nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-1.5/350 XY91)	39
Tabella 15: micro deformazioni misurate nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-1.5/350 XY91)	39
Tabella 16: discrepanza rispetto al valore medio delle due misurazioni di deformazione nei due canali	40
Tabella 17: specifiche da datasheet di XC110	43
Tabella 18: alcune proprietà meccaniche di XC110	43
Tabella 19: proprietà dinamiche del provino quasi isotropo	44
Tabella 20: informazioni di rilievo del GFRP impiegato	44
Tabella 21: informazioni di rilievo di IN2 Epoxy Infusion Resin [28]	44
Tabella 22: informazioni di rilievo di SikaPower®-1277 [29]	45
Tabella 23: dimensioni dei provini della prima famiglia	51
Tabella 24: dimensioni dei provini della famiglia D	53
Tabella 25: caratteristiche del primo provino con tabs progettato	64
Tabella 26: caratteristiche del provino smooth hourglass progettato	68
Tabella 27: proprietà dei layer a 0°	72
Tabella 28: proprietà dei layer a 45°	73
Tabella 29: dimensioni nominali dell'hourglass quasi isotropo	74
Tabella 30: dimensioni reali dell'hourglass quasi isotropo	74
Tabella 31: resoconto dei test condotti sulla famiglia 1	76
Tabella 32: resoconto dei test condotti sulla famiglia A	79
Tabella 33: resoconto dei test condotti sulla famiglia B	81
Tabella 34: resoconto dei test condotti sulla famiglia C	83
Tabella 35: resoconto dei test condotti sulla famiglia D	84
Tabella 36: resoconto prova su provini 4B' e 2Cs'	88
Tabella 37: resoconto prova su provini 4B e 2Cs	89

Tabella 38: resoconto della prova sul provino 1D' in confronto al provino 1D	89
Tabella 39: resoconto della prova sul provino 2D' in confronto al provino 2D	90
Tabella 40: resoconto delle prove sui provini 1 (4Ds') e 2 (5Ds')	90
Tabella 41: dimensioni provino da trazione ASTM D3039.....	95
Tabella 42: dimensioni dei provini C1 e C2 da compressione (ASTM D3410).....	96
Tabella 43: dimensioni provini da taglio TA1 ,TA2 e TA3 (ASTM D3518).....	98
Tabella 44: moduli di resistenza dei provini iniziali.....	100
Tabella 45: moduli di resistenza dei provini quasi isotropi.....	101
Tabella 46: frequenze dei cinque hourglass q.i. testati a fatica	104
Tabella 47: resoconto dei test condotti sui provini hourglass quasi isotropi	104

1. Introduzione

Nel mondo dell'ingegneria attuale, l'uso di materiali compositi ha acquisito sempre più rilevanza, suscitando interessi elevati per le proprietà che questi offrono: resistenza meccanica e leggerezza sono le due peculiarità che li contraddistinguono dagli altri materiali. I settori di impiego dei materiali compositi sono molteplici, spaziando dalla produzione di automobili al campo dell'aeronautica e Spazio. Tuttavia, aumentando il numero di applicazioni di questi materiali, aumentano anche le sfide a cui essi sono sottoposti, perché ad essi vengono chieste performance sempre più elevate. Gli ingegneri devono sviluppare regole di progettazione affidabili e sicure [2] in statica e anche nell'ambito della fatica.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è lo studio del comportamento a fatica ad altissimo numero di cicli (maggiore di 10^7) di provini in materiale composito. Come è ben noto, la fatica è il collo di bottiglia [3] della progettazione, perché richiede tempi e costi non indifferenti. In modo ancor più evidente, la fatica ad altissimo numero di cicli sui materiali compositi: I tempi richiesti per eseguire queste prove variano da mesi ad anni. Ne consegue che i risultati ad oggi sono: pochi studi a riguardo nella letteratura scientifica e differenti tra di loro perché trattano provini di diverso layup [3], diversi tipi di caricamento, diversi rapporti di sollecitazione ed altri aspetti ancora. Questo mondo è ancora parzialmente esplorato poiché le problematiche che insorgono sono tante. Basti pensare al fatto che i materiali compositi sono anisotropi e non omogenei per natura, ben diversi dai materiali metallici ben conosciuti. Per limitare i tempi di prova, in letteratura sono riportati studi di fatica ad altissimo numero di cicli con macchina agli ultrasuoni. Nella letteratura scientifica vengono riportati studi che riguardano prove a flessione ad ultrasuoni, col vantaggio che le fibre esterne, che sono soggette a deformazioni elevate, sono a contatto con il sistema di refrigerazione dei provini. Il problema è che la flessione sollecita solo una piccola porzione di materiale, a differenza delle prove assiali [3]. In questa tesi ci si è concentrati sulle prove assiali che coinvolgono un volume di materiale molto più ampio durante la sollecitazione. In particolare, è stato utilizzato un rapporto di sollecitazione R pari a -1, quindi con pari ampiezza di sollecitazione a trazione e a compressione. Il presente lavoro è volto anche ad indagare più in dettaglio lo stato tensionale dei provini in composito, e come la geometria ne influenzi la rottura a fatica.

Nella prima sezione di questa trattazione, sarà fornita una panoramica dei fondamenti teorici che sottendono il lavoro di tesi. Successivamente, si procederà con una sezione dedicata ai materiali utilizzati e ai metodi impiegati, numerici e sperimentali, per la realizzazione dei provini e per la selezione delle più appropriate modalità di test per le prove.

Il capitolo conclusivo sarà dedicato all'esposizione dei risultati, prestando particolare attenzione agli accorgimenti adottati in seguito a ciascun risultato ottenuto.

2. I materiali compositi

I compositi rappresentano un tipo di materiale innovativo, il cui uso è fondamentale in molti settori dell'ingegneria. Essi sono composti da due o più costituenti, con comportamenti molto diversi, combinati macroscopicamente per ottenere un materiale con caratteristiche migliorate [4] rispetto a quelle delle singole fasi (fig1). I costituenti vengono definiti Matrice e Rinforzo, e la loro unione sinergica crea un prodotto finale con proprietà che da un solo materiale non si potrebbero ottenere [5]. Alcune proprietà che possono essere migliorate usando un materiale composito sono [4]:

- ❖ Resistenza meccanica;
- ❖ Rigidezza;
- ❖ Riduzione della massa volumica;
- ❖ Resistenza alla corrosione;
- ❖ Resistenza all'usura;
- ❖ Vita a fatica.

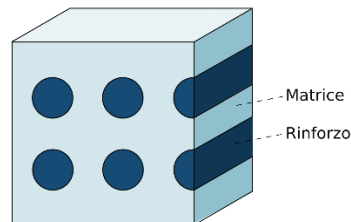


Figura 1: schematizzazione di un materiale composito [4]

2.1 La matrice

La matrice è una fase continua di supporto per le fibre, che svolge numerose funzioni [6]. Tra queste, primeggiano:

- Trasferimento del carico: distribuisce il carico applicato al materiale di rinforzo;
- Protezione delle fibre: crea uno schermo protettivo che preserva le fibre dall'azione di corrosione e umidità;
- Assorbimento degli urti: assorbe l'energia generata dagli impatti e attenua le vibrazioni risultanti;
- Tenuta delle fibre in posizione: mantiene le fibre saldamente al loro posto e ne determina l'orientamento all'interno del materiale;
- Arresto della propagazione delle fratture: assicura l'integrità strutturale ridistribuendo gli sforzi e impedendo che la frattura propaghi all'interno del materiale. Questo è il motivo per cui i materiali compositi vengono designati come "damage tolerant" ovvero tolleranti al danno, motivo per cui sono così appetibili nell'ambito della fatica.

La fase matrice può essere polimerica, metallica o ceramica. Il primo tipo prevale considerando il costo contenuto, la leggerezza, e la facilità con cui la resina può impregnare il rinforzo per ottenere il composito. Lo svantaggio delle matrici polimeriche risiede nel fatto che subiscono un netto abbassamento delle proprietà all'aumentare della temperatura di utilizzo. Per alte

temperature vengono infatti preferite le matrici delle altre due categorie, con lo svantaggio dell'eccessivo costo, giustificabile solo in applicazioni specifiche.

2.2 Il rinforzo

Il rinforzo è la fase dispersa del prodotto finale [4], assumendo tipicamente la maggior parte degli sforzi e conferendo rigidità al materiale composito. Il contributo che il rinforzo dà al composito dipende dalle proprietà del rinforzo stesso, dalla sua disposizione all'interno della matrice e dalla sua presenza in volume. A seconda del tipo di rinforzo i materiali compositi si suddividono in tre classi [6].

- **Compositi particellari:** presentano particelle di un materiale nella matrice di un altro materiale, come si può notare in figura 2. Le particelle non contribuiscono molto a migliorare le caratteristiche meccaniche del composito, a differenza dei compositi fibrosi, in cui le fibre sopportano la maggior parte del carico.



Figura 2: esempio di composito particellare [7]

- **Compositi rinforzati con fibre:** Il loro successo è strettamente legato all'elevato rapporto resistenza/peso (resistenza specifica) ed all'elevato rapporto rigidità/peso (modulo specifico). La rigidità e la resistenza dei compositi di questa categoria sono determinate dal fatto che molti materiali sono più resistenti e rigidi sotto forma di fibra, rispetto a forme più estese. Per esempio, il vetro, che normalmente è considerato un materiale fragile con bassa resistenza meccanica, arriva a resistenza meccanica di un ordine di grandezza superiore se sotto forma di fibre. Queste possono essere corte e discontinue o lunghe e continue (fig.3). Il rinforzo può essere ad esempio costituito da fibre di vetro, fibre di carbonio, fibre ceramiche, fibre aramidiche o di basalto.

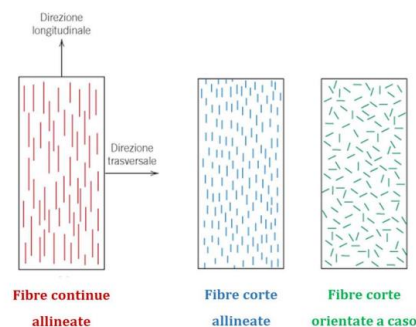


Figura 3: esempi di compositi rinforzati con fibre, continue o corte [8]

I compositi fibrosi sono fortemente anisotropi perché le fibre rafforzano solo se il carico è applicato parallelamente alla loro direzione [5]. Questo aspetto può rappresentare un vantaggio, se si riuscisse a controllare l'anisotropia per rafforzare il materiale nella direzione di maggiore sollecitazione, e quindi ottimizzando le prestazioni, ma anche uno svantaggio perché nella direzione ortogonale gli sforzi non vengono ben contenuti e risulterebbero critici per il composito [5]. Questi materiali sono dunque progettati per sostenere carichi paralleli alle fibre.

Il meccanismo di trasferimento del carico tra matrice e fibra può essere spiegato facendo riferimento a una barra cilindrica che rappresenta una singola fibra all'interno della fase matrice [5]. La figura 4 ne è un esempio.

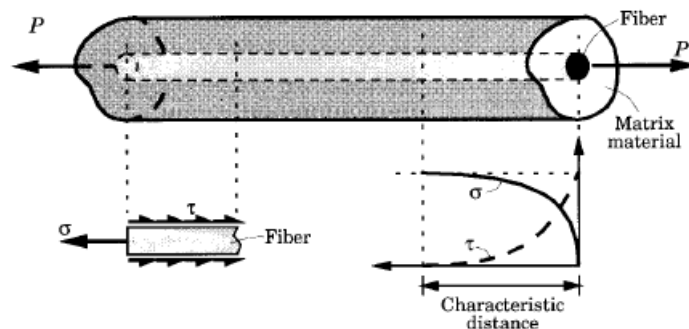


Figura 4: barra che schematizza una singola fibra [5]

Il carico si distribuisce dalla fibra alla matrice attraverso tensioni tangenziali. Quando il carico P è di trazione, si sviluppa una tensione tangenziale τ esternamente alla superficie della fibra, con un'intensità che si annulla alla fine della fibra. La tensione assiale σ segue invece la tendenza opposta. In questo modo, le due tensioni bilanciano il carico applicato alla matrice. Quando invece il carico P è di compressione, le tensioni hanno segno opposto, e cioè la fibra può incurvarsi a causa del buckling [5]. Se questa si rompe, allora il carico è trasferito, sempre attraverso tensioni tangenziali, alle fibre adiacenti, ridistribuendosi.

- **Compositi strutturati:** Essi sono costituiti da strati di materiali diversi, inclusi compositi particellari e compositi fibrosi. Sono compositi strutturati i *laminati* e le *strutture sandwich*

-Laminati

Sovrapponendo diversi strati con fibre orientate in direzioni diverse si realizza un *laminato* (fig.5), e si uniformano le proprietà in tutte le direzioni. Il singolo strato viene chiamato *lamina* [5], e rappresenta l'elemento fondamentale di base.

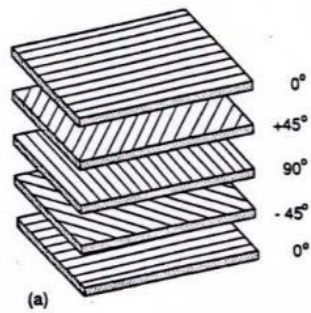


Figura 5: esempio di un laminato [9]

-Strutture sandwich

Questa configurazione consiste in due strati di compositi a fibre lunghe, noti come facce, intervallati da uno strato connettivo denominato anima. Tale composizione manifesta proprietà nettamente superiori rispetto ai singoli componenti. Di solito, l'anima è costituita da un materiale leggero e meno resistente, il che consente di separare le due parti, che, al contrario, sono più robuste. Una schematizzazione di questa struttura è riportata nella figura 6.

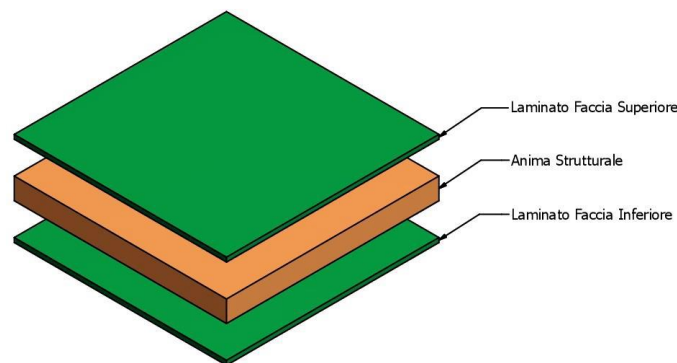


Figura 6: esempio di una struttura sandwich [4]

2.3 Lamine e laminati

Una *lamina* o *ply* è un singolo strato di materiale composito. Una lamina fibro-rinforzata è costituita da un foglio di fibre immerse nella matrice più un agente chimico che favorisce il legame tra matrice e fibre. Le fibre possono essere continue, discontinue, intrecciate, unidirezionali, bidirezionali o disposte all'interno della fase continua in modo casuale. Le fibre unidirezionali sono, come già accennato, molto resistenti nella direzione delle fibre e poco nella direzione trasversale ad esse. Infatti, se viene applicato un carico trasversale, questo può causare delaminazione, rotture delle fibre o buckling delle fibre.

Un *laminato* (fig.7) è un insieme di lamine sovrapposte [5] per raggiungere la rigidità e lo spessore desiderati. La sequenza delle varie orientazioni di uno strato composito rinforzato con fibra in un laminato è chiamata *stacking sequence*.

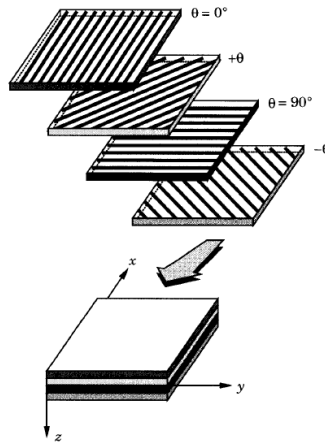


Figura 7: un tipico laminato con stacking sequence riportata [5]

2.4 Tessuti

Quando le fibre si intrecciano, seguendo geometrie prestabilite, per formare uno strato, si crea ciò che definiamo un *tessuto*. All'interno di questo tessuto, è possibile distinguere due elementi chiave, come si può notare dalla figura 8: l'ordito, la fibra che si estende lungo la lunghezza del rotolo, e la trama, la fibra che si sviluppa nella larghezza. La rigidità e la capacità di mantenere la forma desiderata dello strato variano in base al numero di fibre che compongono sia l'ordito che la trama.

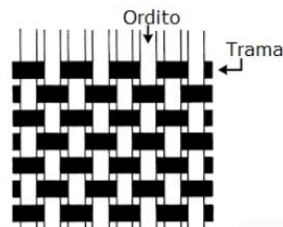


Figura 8: trama e ordito in un tessuto [9]

Possiamo distinguere tre tipologie di tessuti in base all'alternanza di filamenti di trama e di ordito nella struttura (fig.9).

- Tessuto *plain weave*: trama e ordito hanno spaziatura unitaria e quindi sono alternati in maniera regolare. Ciò favorisce la drappabilità del materiale composito;
- Tessuto *twill weave*: trama e ordito hanno periodicità doppia;
- Tessuto *n-satin weave*: un solo filo di trama ogni n fili di ordito.

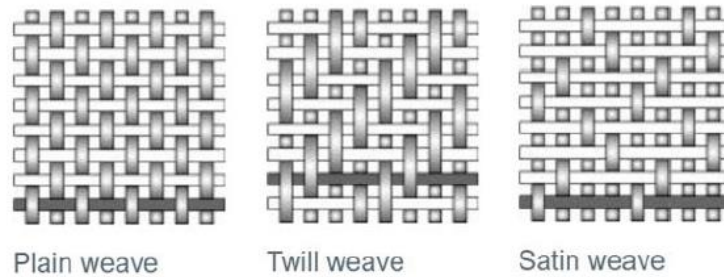


Figura 9: plain weave- twill weave- satin weave [10]

Per rendere il composito più maneggiabile, si preferisce l'uso di *preforme* o addirittura di *materiali pre-impregnati*.

Le preforme consistono in fogli di tessuto sovrapposti secondo una specifica architettura orientata, uniti da cuciture lungo i bordi. Nel caso delle preforme 2D, la loro configurazione è piatta. Esistono anche preforme 3D, che coinvolgono un ulteriore intreccio con fibre ortogonali al piano dei tessuti. La realizzazione di preforme di questo tipo richiede procedure complesse, aumentando i costi di produzione, e dunque sono meno diffuse.

Un approccio più comune è l'utilizzo dei *prepreg*, o materiali pre-impregnati. Questi semilavorati consistono in fibre disposte unidirezionalmente o come tessuto, già impregnate con la quantità precisa di resina polimerica ancora non curata. Vengono venduti in rotoli di varia lunghezza, protetti su entrambi i lati da un film polimerico distaccante. La conservazione a basse temperature è essenziale, poiché a temperatura ambiente inizia la reticolazione irreversibile della resina. Dopo questa, il materiale indurisce in modo stabile, ma questo processo è lento a temperatura ambiente. Sebbene l'uso di pre-impregnati comporti costi più elevati rispetto ai tessuti, presenta vantaggi significativi, tra cui la velocizzazione e la semplificazione del processo di stratificazione, la garanzia di ripetibilità e la produzione di componenti con spessore costante, grazie all'impregnazione uniforme della resina.

2.5 Terminologia

I materiali compositi vengono studiati a diversi livelli di dettaglio [6].

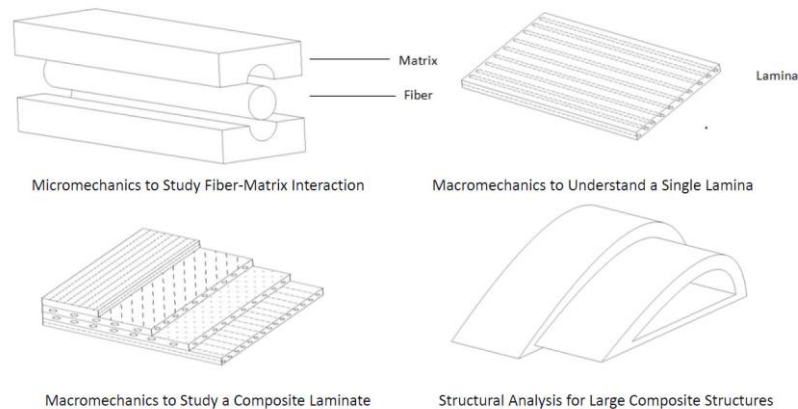


Figura 10: scale di dettaglio per lo studio dei compositi [6]

La *micromeccanica* si concentra sulla scala microscopica, osservando la struttura interna del materiale composito a livello di singole fibre, matrice e interfaccia fibra-matrice;

La *macromeccanica* rappresenta il successivo livello di analisi, che studia il singolo layer del materiale, cioè la lamina. Qui, il materiale composito è trattato come un mezzo continuo e le proprietà sono definite a livello macroscopico. A questo livello la lamina è assunta omogenea; La *classical laminate theory* (o *CLT*) è la parte che studia i laminati in funzione di tre variabili: proprietà, spessore e orientazione dei singoli strati;

Ultima, non per importanza, è *l'analisi strutturale* dei materiali compositi, che si occupa di studiare il comportamento e la risposta meccanica di componenti o strutture realizzate con questi materiali. Questa analisi è cruciale per la progettazione.

Ecco alcuni aspetti chiave dell'analisi strutturale dei materiali compositi:

- **Comportamento anisotropo:** I materiali compositi sono caratterizzati da un comportamento anisotropo a causa della presenza di fibre con orientazioni specifiche. L'analisi deve tener conto di questa anisotropia nelle proprietà meccaniche e termiche per ottenere risultati accurati.
- **Comportamento non omogeneo:** Le proprietà dei materiali compositi variano da punto a punto.
- **Modelli di Elementi Finiti:** L'analisi agli elementi finiti è ampiamente utilizzata per simulare il comportamento strutturale dei materiali compositi. Con questa tecnica è possibile studiare dettagliatamente il campo degli sforzi, degli spostamenti e delle deformazioni all'interno di una struttura.
- **Teoria della Laminazione:** La teoria della laminazione è spesso impiegata nell'analisi strutturale dei laminati compositi, permettendo di prevedere le proprietà del laminato in base alle proprietà dei singoli strati e alle loro orientazioni.
- **Analisi di Flessione e Torsione:** L'analisi della flessione e della torsione è essenziale per comprendere come i compositi rispondono a carichi flessionali e torsionali. Le proprietà di rigidità e resistenza influenzano la capacità di una struttura di sopportare tali carichi.

- **Analisi del Danno e della Frattura:** L'analisi strutturale dei materiali compositi deve anche considerare il comportamento del materiale in presenza di danni. Questo è cruciale per la sicurezza e la durabilità delle strutture.
- **Ottimizzazione della Progettazione:** Così è possibile migliorare la geometria e la disposizione del materiale per massimizzare le prestazioni della struttura rispetto ai requisiti specifici dell'applicazione.
- **Validazione Sperimentale:** I risultati dell'analisi strutturale devono essere confrontati con prove sperimentali per garantire che i modelli teorici rispecchino accuratamente il comportamento reale del materiale composito in situazioni di carico realistiche.

Risulta quindi evidente che l'applicazione dell'analisi strutturale consente la progettazione ex-novo e la costruzione di strutture leggere e robuste come sono i compositi. In questo elaborato, è stato impiegato tale approccio in quanto i provini sono stati progettati inizialmente, successivamente realizzati, ed infine sottoposti a test sperimentali, previa validazione.

2.6 Meccanismi di danneggiamento

I materiali compositi offrono una serie di vantaggi, il maggiore dei quali risiede nella loro capacità di essere progettati in modo mirato per adattarsi ai requisiti specifici, rafforzandosi in direzioni predeterminate. Tuttavia, l'utilizzo di tali materiali comporta anche delle sfide rilevanti, tra cui costi elevati, complessità nel riciclaggio e, soprattutto, la presenza di meccanismi di danneggiamento peculiari.

La natura anisotropa dei materiali compositi e il loro comportamento variabile in diverse condizioni di carico contribuiscono a meccanismi di danneggiamento distinti rispetto ai materiali tradizionali. Mentre nei metalli le rotture originano prevalentemente da cricche, nei materiali compositi si verificano danni diffusi, spesso interconnessi e suscettibili di verificarsi simultaneamente [11]. Inoltre, tali materiali possono presentare difetti intrinseci derivanti dal processo di produzione, come porosità o inclusioni (fig.11), amplificando la complessità della gestione e della prevenzione dei danni. [12].

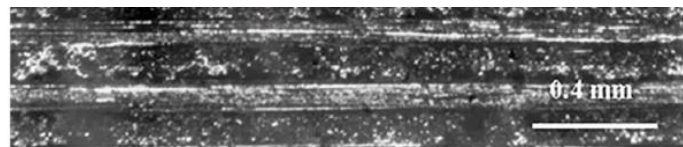


Figura 11: porosità in un composito [12]

Esistono quattro categorie fondamentali di danni che possono presentarsi in tali materiali:

1. Debonding (fig. 12 A);
2. Matrix cracking (fig. 12 B);
3. Fiber breakage (fig. 12 C);
4. Delaminazione (fig. 12 D).

La Figura 12 presenta esempi di danni per ciascuna delle categorie menzionate.

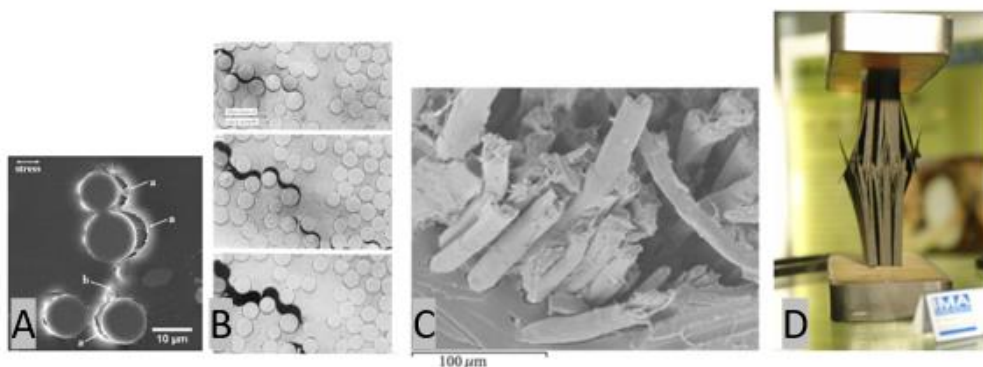


Figura 12 [12]: Debonding (A)- Matrix cracking (B)- Fiber breakage (C)- Delaminazione (D)

I primi tre rientrano nella categoria dei danni intra-laminari, ossia si verificano all'interno della singola lamina; Al contrario, la delaminazione è un tipo di danno inter-laminare, causato da componenti di sollecitazione esterne al piano, e di solito comporta una notevole diminuzione della proprietà meccaniche [12].

2.6.1 Danneggiamento dell'interfaccia matrice-fibra (Debonding)

L'interfaccia tra matrice e fibra si può danneggiare a causa di tensioni di trazione trasversali al piano della matrice. Ne consegue che la matrice perde una delle sue funzioni principali: il trasferimento dei carichi verso le fibre. Questo danno è comune nell'ambito della fatica e può presentarsi anche indipendentemente dalla fessurazione della matrice. Il problema diventa insostenibile quando ci sono fibre intatte a contatto con fibre rotte in presenza di debonding: le fibre intatte non riescono a continuare a trasferire il carico a causa della fessurazione dell'interfaccia.

2.6.2 Danneggiamento della matrice (Matrix cracking)

Quando il composito (sia unidirezionale che bidimensionale) viene sollecitato trasversalmente alla direzione delle fibre, il carico non è più sorretto dalle fibre, e la risposta del materiale dipende quasi esclusivamente dalla matrice. Ovviamente, le cricche trasversali riducono la rigidità complessiva delle lamine e questo avviene progressivamente fino a quando la densità delle crepe raggiunge uno stato denominato Characteristic Damage State, in cui la distanza tra le cricche non permette più al carico di continuare a fessurare la matrice.

Questo danneggiamento non è causato esclusivamente da carichi trasversali, ma anche, più raramente, da carichi applicati parallelamente alla direzione delle fibre. Questo effetto è dovuto ai diversi coefficienti di Poisson tra le lamine a 0° e le lamine a 90° . Le lamine a 0° possono essere contrastate a contrarsi dalla rigidità delle lamine a esse ortogonali. Questo può causare tensioni che possono determinare l'insorgenza di cricche parallele alla direzione delle fibre.

2.6.3 Rottura delle fibre (Fiber breakage)

La rottura delle fibre può essere causata da vari fattori, tra cui carichi eccessivi, deformazioni, impatti o stress ciclici ripetuti nel tempo. Le fibre, essendo soggette a sforzi e tensioni, possono cedere e rompersi, compromettendo così la capacità complessiva del materiale composito di supportare carichi. In applicazioni in cui i materiali compositi sono sottoposti a carichi dinamici, come impatti o vibrazioni, la rottura delle fibre può essere più probabile. La progettazione del materiale e della struttura deve quindi tener conto di questi fattori per garantire una performance adeguata.

2.6.4 Delaminazione

La delaminazione è forse il meccanismo di danneggiamento più pericoloso per i compositi, e anche uno dei più frequenti, soprattutto nell'ambito della fatica. È un danno inter-laminare e può essere causato da uno o più fattori, come ad esempio un carico *out of plane*, una concentrazione di tensioni tra le lamine, fatica, curvature, cricche preesistenti nella matrice ecc. In presenza di delaminazione, il laminato perde anche fino al 50% della sua resistenza, anche se macroscopicamente il danno è visibile appena. A differenza degli altri danneggiamenti, per i

quali si può intervenire con dei rinforzi, con la delaminazione non è possibile agire in alcun modo perché non si può rinforzare il bordo dove confluiscono più lamine. Di conseguenza il composito, caratterizzato da ottima resistenza nelle direzioni delle fibre, nell'interfaccia, ha un comportamento dettato dalla matrice. I modi di apertura secondo delaminazione sono tre (fig.13):

1. **Apertura**, dovuto a sforzi normali inter-laminari;
2. **Scorrimento** o **taglio**, dovuto a sforzi di taglio inter-laminari;
3. **Lacerazione**, dovuto a sollecitazioni di taglio nel piano della cricca ortogonalmente ad esse.

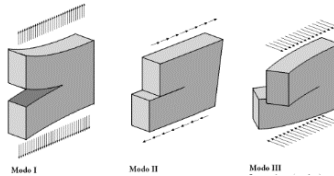


Figura 13: modi di apertura [13]

3. Fatica dei compositi: stato dell'arte

Lo studio accurato dei materiali è fondamentale per comprendere e valutare la resistenza e la durata degli stessi sotto carichi ciclici o alternanti nel tempo. La fatica rappresenta una delle principali cause di guasto strutturale, e l'analisi di tale fenomeno è indispensabile per garantire la progettazione sicura e affidabile di componenti e strutture. Il termine "Fatica" fu coniato per la prima volta dal francese Poncelet, autore del primo libro su questo argomento nel 1841. Wohler, a sua volta, fu responsabile della prima campagna sperimentale, conducendo prove assiali, di flessione e di torsione su provini e assali ferroviari. Egli raccolse i dati su un grafico sforzo-durata, mentre Basquin fu il primo a introdurre una legge empirica per descrivere la curva SN di Wohler. Tuttavia, Freundenthal riteneva che gli effetti della fatica non fossero esclusivamente empirici.

Nel corso degli anni, lo sviluppo delle tecnologie ha contribuito a una crescente comprensione del fenomeno della fatica. Con l'avanzare delle tecnologie, sono stati introdotti nuovi materiali, come i compositi, rendendo necessaria una conoscenza approfondita anche del fenomeno della fatica in tali materiali.

Dal momento in cui sono stati introdotti come elementi strutturali, nella metà del secolo scorso, è iniziato anche lo studio della fatica di questi materiali. Il percorso è stato, ed è tuttora, colmo di insidie a causa della natura dei materiali compositi e delle difficoltà che ne conseguono: i materiali compositi sono non omogenei e non isotropi; la cricca non si propaga con un processo semplice e prevedibile, ma i meccanismi di danneggiamento sono molteplici e diversificati e avanzano con tassi di guasto differenti [11]. Essi, inoltre, interagiscono tra di loro, ed è difficile capire a priori quale di essi prevarrà. Quali sono i dati significativi da raccogliere nell'ambito della fatica? I metodi noti non possono essere applicati poiché i materiali compositi differiscono nettamente da quelli metallici.

Vassilopoulos [14], in una sua pubblicazione, afferma che è possibile suddividere la storia della fatica dei materiali compositi in tre periodi.

1. Il primo, che va dal 1950 al 1975, è caratterizzato dagli anni esplorativi durante i quali poco si sapeva sulla fatica dei compositi, e gli ingegneri non avevano ancora una chiara comprensione dei parametri significativi. Ciò che compresero immediatamente è che, in fatica, il comportamento dei compositi è migliore rispetto a quello dei metalli. Tuttavia, a causa dell'anisotropia dei compositi e della complessità del trasferimento di carico tra fibre forti e parti deboli, i test risultano più complicati. Analogamente ai metalli, i compositi cedono a fatica con un carico minore rispetto alla situazione statica, ma ancora non si sapeva quantificare l'effetto del danneggiamento.
2. Il secondo periodo, che si estende circa dal 1975 al 2000, è stato caratterizzato da sviluppi più approfonditi; tuttavia, le analisi hanno continuato a essere di natura descrittiva anziché predittiva. È emerso che, anche in presenza di carichi uniassiali, si generano stati di tensione multi-assiale. Si è iniziato a studiare gli effetti combinati di fatica, creep e frattura. Vi è stato un tentativo di comprendere se la frequenza possa influenzare la durata a fatica. Un altro aspetto rilevante che è emerso è che la vita a fatica dipende non solo dal materiale, ma anche dalla forma e dalle dimensioni del provino.

3. Il terzo periodo, esteso fino ai giorni attuali, è stato prevalentemente influenzato dal progresso delle nuove tecnologie, le quali hanno consentito anche la convalida di modelli sviluppati negli anni precedenti. Grazie all'impiego di strumenti come infrarossi, fibre ottiche, emissioni acustiche, tomografia a raggi X, Digital Image Correlation (DIC) e intelligenza artificiale, è stato possibile identificare in maniera più dettagliata i tipi di guasto caratteristici. Durante questo periodo, sono stati approfonditi diversi aspetti, come le problematiche legate agli adesivi, l'influenza del rapporto di sollecitazione R sulla vita a fatica e la frequenza di sollecitazione. Riguardo a quest'ultima, è emerso che una frequenza elevata è vantaggiosa, purché non generi un surriscaldamento eccessivo per isteresi, portando all'aumento della temperatura del materiale fino al raggiungimento della temperatura di transizione vetrosa [3]. Ciò potrebbe rendere il materiale più suscettibile al creep.

4. Fatica ad altissimo numero di cicli dei compositi: Applicazioni e problematiche

Lo studio della fatica ad altissimo numero di cicli, in inglese *Very High Cycle Fatigue* (VHCF), riveste particolare importanza nell'ambito dei materiali compositi, in quanto esistono numerosi settori in cui i componenti sono soggetti ad elevati numeri di cicli di carico. Tra le applicazioni spiccano le pale dei rotori delle turbine eoliche, le pale dei motori aeronautici, le pale dei compressori e i sistemi di trasmissione di potenza [3].

Le pale dei rotori delle turbine eoliche, sottoposte a cicli continui di carico durante il funzionamento, devono resistere a sollecitazioni meccaniche intense per lunghi periodi di tempo. Similmente, i ventilatori dei motori aeronautici, utilizzati in ambiti critici come l'aviazione, devono essere progettati per sopportare carichi ciclici elevati per garantire la sicurezza e l'affidabilità del sistema. Le pale del compressore, componente essenziale nei motori e nei compressori industriali, devono anch'esse affrontare cicli di carico frequenti, richiedendo una robustezza strutturale e una resistenza alla fatica elevate. Inoltre, i sistemi di trasmissione di potenza, quali gli ingranaggi e le componenti connesse, sono soggetti a sollecitazioni cicliche significative, specialmente in applicazioni ad alte prestazioni come nei veicoli ad alta velocità.

Di conseguenza, essendoci tante applicazioni, è indispensabile approfondire la comprensione di tutti gli aspetti che influiscono sulla resistenza a fatica VHCF dei materiali compositi, al fine di sviluppare prodotti affidabili ed efficienti [3], sia in fase di progettazione che durante l'utilizzo effettivo. Tuttavia, attualmente, la conoscenza si limita alla fatica VLCF, alla LCF e all'HCF. La VHCF (con un numero di cicli superiore a 10^7) è ancora insufficientemente esplorata, e di conseguenza, la progettazione rimane conservativa. Questa limitazione è principalmente attribuibile alle sfide nell'affrontare i materiali compositi e, soprattutto, alle difficoltà nell'esecuzione di test sperimentali. Ciò accade perché raggiungere numeri di cicli superiori a 10^7 comporta tempi di prova molto prolungati: ad esempio, per un materiale composito con fibre di vetro, raggiungere 10^9 cicli con una frequenza di 5 Hz (utilizzando una configurazione convenzionale) richiederebbe sei anni [3]. Di conseguenza, gli studi in merito sono estremamente limitati e spesso non sono confrontabili tra loro, poiché ciascuno si riferisce a un tipo diverso di materiale composito, con differenti layup, rapporti di sollecitazione R, modalità di carico e approcci al test altrettanto diversi. Ne derivano quindi studi frammentati e tutti differenti fra loro. Questa diversità di approcci genera ancora molti interrogativi irrisolti riguardo ai parametri da considerare significativi per l'analisi dei danni e, di conseguenza, per la vita a fatica.

Attualmente, i test nell'ambito della fatica ad altissimo numero di cicli (VHCF) si classificano in due categorie: test assiali e test di flessione. I test assiali possono essere di trazione o compressione; questi ultimi risultando più problematici in quanto possono provocare il buckling del provino. Dato che le apparecchiature sperimentali convenzionali per la fatica giga-ciclica richiedono tempi di prova eccessivamente lunghi, è prassi ricorrere a macchine di prova che

aumentano la frequenza del ciclo di sollecitazione fino a raggiungere frequenze di 20 kHz (ultrasuoni), determinando una significativa riduzione dei tempi e rendendo i test più praticabili. Di conseguenza, la categorizzazione dei test assiali si amplia ulteriormente, in base al tipo di attuatore impiegato, in test assiali convenzionali e test assiali ultrasonici.

La realizzazione di un test di fatica ad ultrasuoni rende la prova più praticabile, consentendo una durata ragionevole, ma introduce una serie di problematiche aggiuntive che è importante considerare [3]:

- Riscaldamento del provino: L'utilizzo di frequenze ultrasoniche può generare un notevole surriscaldamento del provino, influenzando i risultati della prova e richiedendo un'attenta gestione termica per garantire la validità dei dati.
- Difficoltà di monitorare la prova (tensioni) e quindi il danno: La natura ad alta frequenza del test ultrasonico può complicare il monitoraggio delle tensioni e del danno al provino, richiedendo tecnologie di monitoraggio avanzate e precise.
- Effetti della frequenza: Le alte frequenze utilizzate nei test ultrasonici possono influenzare le caratteristiche di resistenza e comportamento del materiale, introducendo variabili aggiuntive che devono essere considerate nell'interpretazione dei risultati.
- Rottura di eventuali estensimetri per le alte frequenze: L'elevata frequenza del test può comportare la rottura degli estensimetri tradizionali, rendendo necessaria l'adozione di sensori più adatti a lavorare in condizioni di frequenza elevate.
- Mantenimento del test fino a 10^9 cicli: Anche se la durata del test è più gestibile con frequenze ultrasoniche, condurre il test fino a 10^9 cicli richiede un'attenta pianificazione e gestione delle variabili coinvolte.
- Carichi bassi: le condizioni ambientali possono influenzare i risultati. I carichi relativamente bassi impiegati nei test ultrasonici possono rendere il test sensibile alle condizioni ambientali, richiedendo un controllo accurato dell'ambiente di prova per ottenere risultati affidabili e riproducibili.

4.1 Fatica ad altissimo numero di cicli: stato dell'arte

Nella letteratura scientifica si riscontrano solo tre riferimenti a prove assiali ultrasoniche condotte su provini di materiale composito.

Il primo risale al 2017. **Flore e Mayer** [15] hanno realizzato una campagna sperimentale su provini GFRP (acronimo di *Glass Fiber Reinforced Polymer*) con attrezzatura convenzionale per numeri di cicli relativamente bassi, e ultrasonici per numeri di cicli di nostro interesse (ambito VHCF). Il rapporto di sollecitazione utilizzato è stato 0.1.

Essi hanno utilizzato un provino con forma a *osso di cane*, ovvero provino *dogbone* con le seguenti dimensioni (fig. 14):

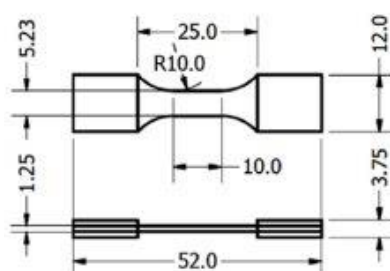


Figura 14: provino dogbone usato da Flore

Hanno optato per questa specifica geometria poiché essa amplifica l'onda ultrasonica generata, garantendo contemporaneamente elevate ampiezze di stress. Inoltre, al fine di limitare il surriscaldamento del provino, hanno adottato la tecnica "pulse & pause", ovvero hanno applicato il carico in modo intermittente, alternando periodi di carico (pulse) a intervalli di riposo (pause) volti a dissipare il calore generato durante le fasi di carico. Il periodo di pulse selezionato è stato di 100 ms, mentre quello di pause è stato di 2000 ms. Per garantire ulteriore raffreddamento, hanno impiegato un sistema di raffreddamento ad aria compressa, che ha mantenuto la temperatura del provino al di sotto dei 25°C. La temperatura non è però stata controllata attivamente, ma solo monitorata con un termometro a irraggiamento. In aggiunta, sono stati impiegati estensimetri capaci di misurare le deformazioni, consentendo così di applicare le leggi di Hooke per dedurre le corrispondenti tensioni. Il risultato più significativo ottenuto è che il test ultrasonico ha dimostrato di essere abbastanza coerente con l'approccio convenzionale, come si può notare in figura 15.

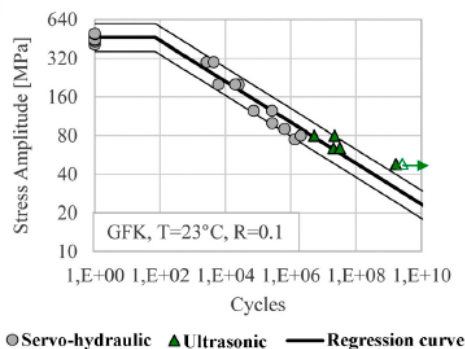


Figura 15: curva S-N dello studio di Flore [15]

Dall'analisi del diagramma sottostante (fig. 16), è evidente, confrontando le curve S-N nei due scenari, che la curva relativa al test ultrasonico presenta una pendenza inferiore al medesimo livello di stress rispetto al caso convenzionale. Tale differenza potrebbe essere attribuita al fenomeno di "softening ciclico" [15], il quale può essere innescato dalle elevate frequenze coinvolte. Con "softening ciclico" si indica la graduale perdita di capacità di un materiale nel sopportare carichi crescenti nel corso del tempo, fenomeno particolarmente rilevante nelle situazioni di fatica. Inoltre, è possibile notare che, allo stesso livello di tensione, il test ultrasonico evidenzia una durata a fatica inferiore rispetto a quella ottenuta tramite il test convenzionale.

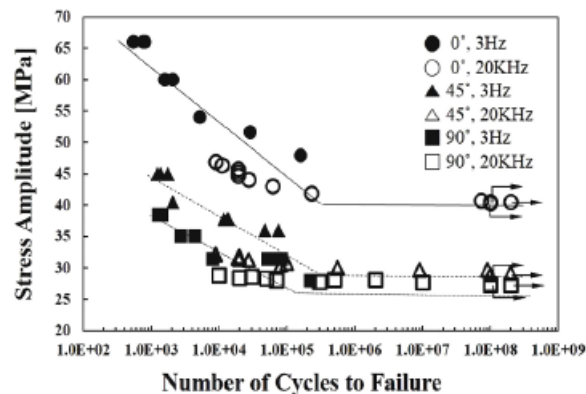


Figura 16: curva SN con pendenze diverse in base al tipo di test [15]

Nel corso degli anni, nel 2020-2022, uno studio di rilievo [16] è stato condotto da **Hosoi e Kawada**, ricercatori giapponesi, che hanno impiegato un provino a forma di manubrio (*dumbbell*) con sezione rettangolare, integrato con tabs metallici incollati tramite un adesivo epossidico. La prova è stata eseguita con uguali sollecitazioni a trazione compressione, mantenendo un rapporto $R=-1$. Il materiale del campione è CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Anche in questa situazione, è stata adottata la strategia del "pulse & pause" con le medesime finalità dell'esperimento precedente, e la temperatura è stata monitorata attraverso un termometro a infrarossi. Il provino ha una configurazione quasi-isotropa grazie alla stacking sequence adottata, cioè $[0/90/4]_s$. Lo studio ha considerato due casi distinti:

1. Provino con un solo tab, pertanto non simmetrico (fig.17);

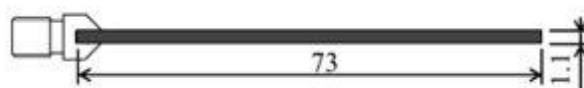


Figura 17: provino con un solo tab [16]

2. Provino con due tabs, pertanto simmetrico (fig.18).



Figura 18: provino con due tabs [16]

In entrambi i casi, le deformazioni sono state misurate mediante estensimetri. Gli autori non hanno individuato un preciso limite di fatica, ma hanno osservato che le curve tendono a livellarsi nella regione di $N=10^9$ (fig.19).

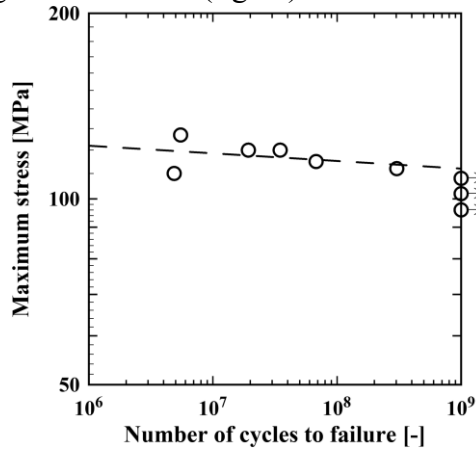


Figura 19: livellamento della curva SN nella regione finale [16]

Nel 2022, il tedesco **Balle** ha sviluppato invece un sistema di test per condurre la prova ultrasonica assiale, per i motivi sopraelencati, cioè per far fronte agli eccessivi tempi di prova richiesti per eseguire test di fatica gigaciclica, e di conseguenza agli eccessivi costi. Egli ha sviluppato un sistema capace di eseguire test con pari ampiezza di trazione e di compressione ($R=-1$) capace di generare oscillazioni a frequenze di 20kHz [17].

Dai suddetti tre esempi emerge chiaramente che la conoscenza attuale su questi materiali è ancora limitata, come precedentemente evidenziato. Pertanto, è necessario condurre ulteriori test di fatica VHCF sui materiali compositi per acquisire una comprensione più approfondita dei loro meccanismi di fatica, dei tipici meccanismi di danneggiamento e di altri aspetti correlati.

5. Precedente attività e obiettivi della tesi

L'origine del presente lavoro di tesi è strettamente legata al tema della fatica ad altissimo numero di cicli di provini di materiale composito, un ambito, come si è visto, caratterizzato da una conoscenza ancora limitata a causa delle sfide connesse alla realizzazione di test che raggiungono cicli così elevati. Questa ricerca ha avuto inizio con un'indagine precedente in cui dodici provini in CFRP di forma a clessidra (*Hourglass*) sono stati sottoposti a test di fatica VHCF assiale, con un rapporto di sollecitazione $R=-1$.

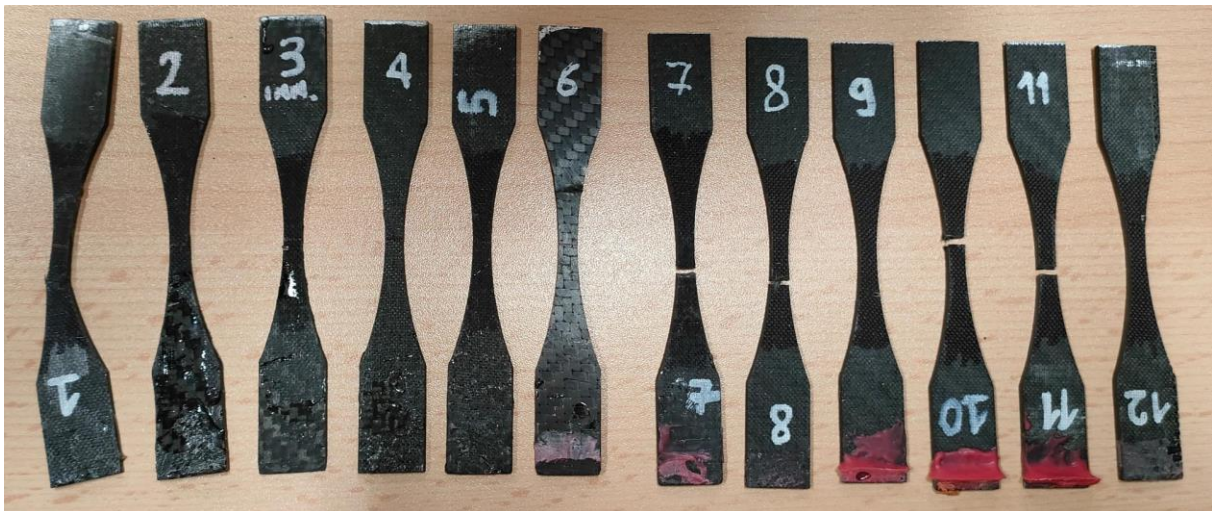


Figura 20: rotture dei provini hourglass della precedente attività

I risultati sono stati sorprendenti e inaspettati (fig. 20): le rotture nei provini non si sono verificate nella zona centrale, dove le tensioni normali sono più elevate, come evidenziato dalla distribuzione di tensione assiale riportata nella figura 21.

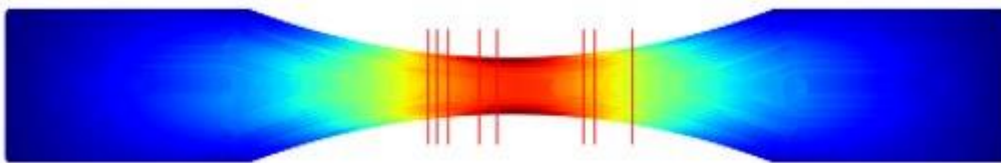


Figura 21: distribuzione della tensione assiale nel provino hourglass.
I tratti rossi indicano le posizioni delle fratture che ci sono state.

Le fratture si sono invece manifestate nelle zone curve della geometria, tra quelle a massima tensione normale e quelle a massima tensione tangenziale, la cui distribuzione è mostrata nell'immagine sottostante.

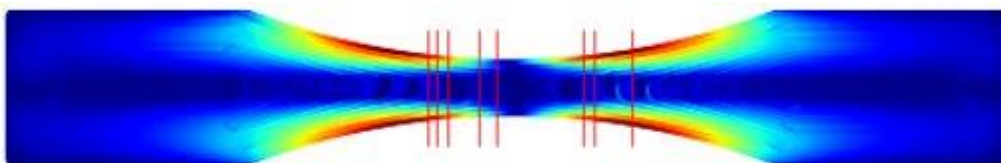


Figura 22: distribuzione della tensione tangenziale nel provino hourglass.
I tratti rossi indicano le posizioni delle fratture che ci sono state.

Questa situazione ha suscitato il dubbio: è possibile che le tensioni tangenziali abbiano causato la rottura di questi provini, seppur in misura nettamente inferiore rispetto alle tensioni assiali? Di conseguenza, gli obiettivi della tesi sono stati definiti in modo specifico: verificare la presenza di tensioni di taglio in questi provini, esaminando dettagliatamente lo stato tensionale per comprendere le cause delle rotture nelle zone intermedie. In particolare, lo studio si propone di indagare se, nel processo di danneggiamento del provino, le tensioni tangenziali influenzino la rottura e se vi sia interazione tra tensioni normali e tangenziali. Ciò comporta l'analisi di come la geometria possa influenzare la rottura a fatica di tali materiali. Per raggiungere questo obiettivo, sono state proposte due nuove tipologie di provino: una priva di tensioni tangenziali e una che non ne risenta, come sarà ampiamente illustrato in seguito.

Inoltre, la tesi si propone di valutare la fattibilità delle attuali modalità di test per prove di fatica VHCF assiali e, qualora risultassero impraticabili, di identificare nuove modalità di prova fattibili per i provini realizzati. L'attenzione sarà quindi concentrata sull'apparecchiatura sperimentale, cercando di mitigare o limitare i problemi potenziali che possono emergere durante i test.

6. Validazione estensimetrica

In questo capitolo verrà presentata la prima attività di rilievo svolta, che consiste nell'applicazione di diverse tipologie di estensimetri per esaminare tre aspetti principali:

- Validare la presenza di tensioni tangenziali nel provino Hourglass;
- Esplorare la possibile presenza di flessione nel piano;
- Indagare eventuali segni di flessione al fuori del piano.

Prima di procedere con l'analisi, è opportuno fornire una breve spiegazione sugli estensimetri e sul loro metodo di applicazione.

6.1 Gli estensimetri

Gli estensimetri elettrici a resistenza (*strain gauges*) sono dei sensori che, incollati alla superficie di qualsiasi corpo, sono in grado di misurarne la deformazione. Il loro principio di funzionamento si basa su un principio fisico [18]: una variazione di lunghezza di un corpo conduttore al quale sono applicati, causa una variazione di resistenza elettrica ai loro capi. Tuttavia, anziché utilizzare un singolo filo, è pratica comune impiegare una griglia al fine di ottenere una resistenza elettrica adeguata, pari ad almeno 120 Ω . In figura 23 sono schematizzati un estensimetro filiforme e uno con griglia rispettivamente [19].



Figura 23: estensimetro filiforme [18] estensimetro con griglia [18]

Gli elementi principali di un estensimetro sono la “matrice”, nota anche come “supporto” (in genere polimerico) che viene incollata al corpo con un adesivo, e la “griglia estensimetrica”, posizionata sulla suddetta matrice, come illustrato nella figura 24.

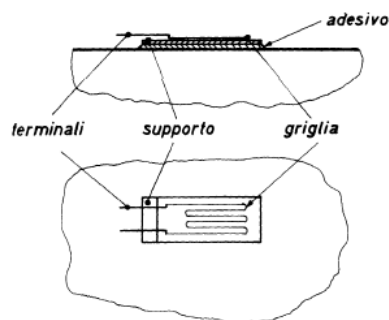


Figura 24: elementi di base di un estensimetro [18]

Il corpo trasferisce la deformazione alla griglia che sarà sottoposta a una variazione di resistenza elettrica ai suoi capi (“terminali”).

La resistenza di un conduttore filiforme può essere espressa dalla seguente relazione [19]:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

Dove ρ è la resistività, l è la lunghezza e A è la sezione.

La sua variazione relativa risulta essere:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

Da questo segue che, sotto sollecitazione monoassiale:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \varepsilon$$

Dividendo quindi per ε :

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} + 1 + 2\nu = K$$

dove K è il “fattore di taratura” (*gage factor*), ovvero un parametro che lega il fenomeno elettrico ($\frac{\Delta R}{R}$) a quello meccanico (ε).

Poiché il valore di K è contenuto nel datasheet di ciascun estensimetro, invertendo la formula si ricava il valore di deformazione ricercato:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{K}$$

Per determinare il valore della deformazione è necessario conoscere il fattore di taratura e la variazione relativa della resistenza elettrica. Quest’ultima è generalmente una quantità molto piccola e per poterla misurare viene impiegato il circuito a Ponte di Wheatstone, particolarmente adatto per la misurazione di resistenze di piccola entità. Una schematizzazione di tale circuito può essere la seguente (fig.25):

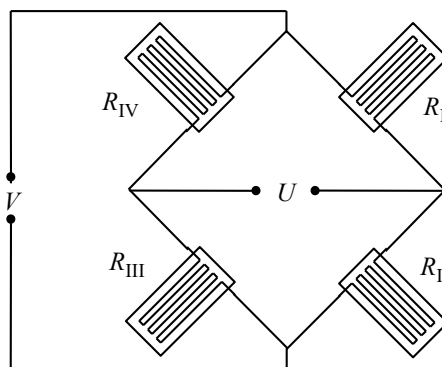


Figura 25: schematizzazione del Ponte di Wheatstone [19]

La formula cardine che regola questo circuito è:

$$U = V \frac{K}{4} (\varepsilon_I - \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} - \varepsilon_{IV}) = V \frac{K}{4} \sum \varepsilon$$

Dove:

U è la tensione di sbilanciamento,

V è la tensione di alimentazione

K il fattore di taratura

Sostituendo uno o più resistenze con altrettanti estensimetri si ottengono i seguenti circuiti di misura:

- **Quarto di ponte** (fig.26): Circuito composto da tre resistenze e un estensimetro.

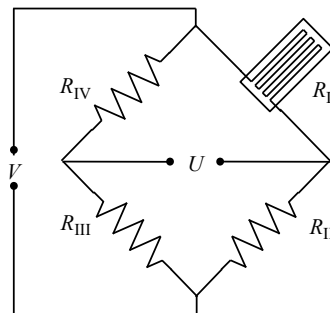


Figura 26: circuito a un quarto di ponte [19]

In questo caso

$$\sum \varepsilon = \varepsilon_I = \varepsilon + \varepsilon_a$$

Dove ε_a è il segnale affetto da eventuale deformazione apparente;

- **Mezzo ponte** (fig.27): In questo circuito due resistenze sono sostituite da altrettanti estensimetri.

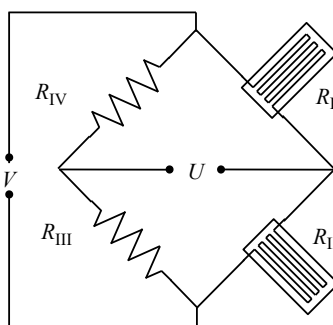


Figura 27: circuito a mezzo ponte [19]

Qui si ha che:

$$\sum \varepsilon = \varepsilon_I - \varepsilon_{II} = \varepsilon + \varepsilon_a - \varepsilon_a = \varepsilon$$

ovvero che la deformazione apparente si annulla, e infatti, un estensimetro è chiamato “estensimetro misuratore”, e l’altro viene chiamato “estensimetro compensatore”.

6.1.1 Installazione degli estensimetri

Il processo di installazione degli estensimetri è disciplinato da una procedura rigorosa e metodica [19], che può essere dettagliata attraverso un elenco puntato:

- Levigare la zona di applicazione dell'estensimetro con carta vetro, prima con grana grossa e successivamente con grana fine.
- Pulire la superficie utilizzando una garza imbevuta di solvente, passandola una sola volta in una sola direzione per evitare di contaminare l'area appena pulita.
- Tracciare un punto nella sezione centrale di applicazione della griglia estensimetrica con un pennarello.
- Aprire la confezione dell'estensimetro, posizionandolo su una superficie pulita con la faccia contenente la griglia rivolta verso l'alto.
- Applicare una striscia di nastro adesivo sulla faccia superiore dell'estensimetro, lasciandone una piccola porzione in fuori.
- Posizionare l'estensimetro in corrispondenza del punto tracciato e fissare la sua posizione con il nastro adesivo.
- Sollevare la parte fuoriuscente del nastro adesivo per scoprire la faccia inferiore dell'estensimetro.
- Applicare una goccia di colla cianoacrilatica sul punto precedentemente tracciato.
- Posizionare l'estensimetro abbassando il nastro adesivo e premendo la zona con un pezzo di teflon per evitare l'aderenza delle dita.
- Mantenere una moderata pressione sull'estensimetro per alcuni minuti.
- Rimuovere delicatamente il nastro adesivo.

Una volta che gli estensimetri sono stati incollati alla superficie del corpo per il quale si desidera misurare la deformazione, è necessario procedere con la medesima procedura per applicare la basetta porta contatti, successivamente saldare (mediante saldatura a stagno) i fili elettrici sui due contatti. Successivamente, utilizzando un multimetro, è necessario verificare l'assenza di cortocircuiti tra i terminali e la mancanza di continuità elettrica tra l'estensimetro e la piastra.

L'ultimo passo consiste nell'impostare la tensione di alimentazione del ponte, regolare il guadagno dell'amplificatore e, non meno importante, bilanciare il ponte.

6.2 Validazione del modello FEM sul provino Hourglass

L'obiettivo di questa sezione è verificare la presenza effettiva delle tensioni tangenziali, riscontrate mediante l'analisi FEM. Dal momento che gli estensimetri a singola griglia sono in grado di misurare la deformazione in una sola direzione, è necessario eseguire tre misurazioni secondo altrettante orientazioni per valutare lo stato deformativo della superficie [20]. Da un punto di vista pratico, in tali circostanze è consuetudine utilizzare dei supporti su cui sono incise tre griglie estensimetriche indipendenti, creando così le cosiddette “rosette estensimetriche”. Questo perché, nel caso di strutture complesse, lo stato di deformazione non è noto a priori, e

quindi le direzioni principali non sono conoscibili. La rosetta, avendo le tre griglie incorporate, consente di evitare errori di posizionamento che potrebbero derivare dall'utilizzo di tre estensimetri separati.

La rosetta scelta per questa applicazione (C2K-XX-G1350/SP70*) [21] ha tre griglie disposte a 45° l'una dall'altra (fig.28).



Figura 28: rosetta utilizzata (C2K-XX-G1350/SP70*) [21]

Le informazioni rilevanti, ovvero la resistenza elettrica e il fattore di taratura, sono estratte dal datasheet e sono riportate nella tabella 1. Questi parametri sono essenziali per eseguire i calcoli necessari.

Tabella 1: resistenza elettrica e fattore di taratura di C2K-XX-G1350/SP70*

Resistenza elettrica	$350,0\Omega \pm 0,8\%$
Gage factor	1,98

La rosetta è stata integrata nel circuito di Wheatstone in configurazione a un quarto di ponte e collocata nella regione che, secondo l'analisi FEM, è soggetta alle massime tensioni tangenziali (fig.29).



Figura 29: provino hourglass con rosetta applicata

Considerando quindi che il provino hourglass utilizzato presenta le seguenti dimensioni nominali (fig.30):

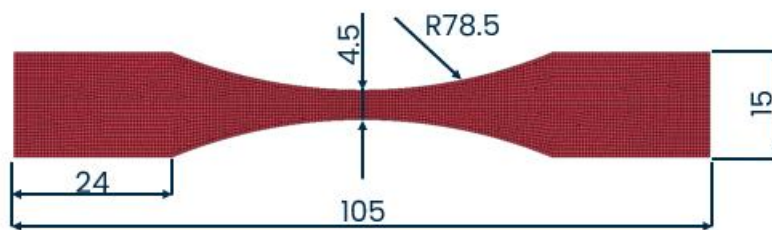


Figura 30: dimensioni del provino hourglass

Il centro della rosetta è stato posizionato in questa posizione (fig.31):

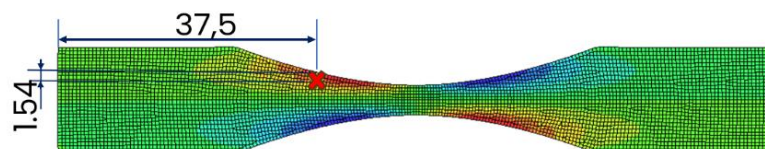


Figura 31: punto di applicazione del centro della rosetta, con raffigurato l'andamento delle tensioni tangenziali nel provino hourglass

Dopo aver completato tutti i collegamenti elettrici si fa uso del programma *LabVIEW SignalExpress* [22], un'interfaccia grafica di LabVIEW, che è il sistema di controllo utilizzato per le prove di fatica VHCF.

Dalla seguente formula si ottiene facilmente il rapporto tra deformazione meccanica e tensione elettrica di sbilanciamento:

$$\frac{\varepsilon}{U} = \frac{4}{KVG}$$

E, considerando che il guadagno G dell'amplificatore è di 100, e la tensione di alimentazione V è di 10 V, il rapporto risulta essere 0,0020 [unità di misura].

A questo punto, è necessario confrontare i valori di deformazione nella zona specifica secondo l'analisi FEM con quelli ottenuti dalla conversione della tensione elettrica misurata dalla rosetta nella stessa zona.

- **Valori sperimentali**

Sono state condotte varie misurazioni a tensioni di ingresso differenziate, acquisendo i segnali in Volt. Un esempio di misurazione è mostrato nell'immagine sottostante (fig.32). Il segnale raggiunge il valore massimo e rimane pressoché costante nel momento in cui viene attivato il generatore e viene applicato lo spostamento previsto al provino.

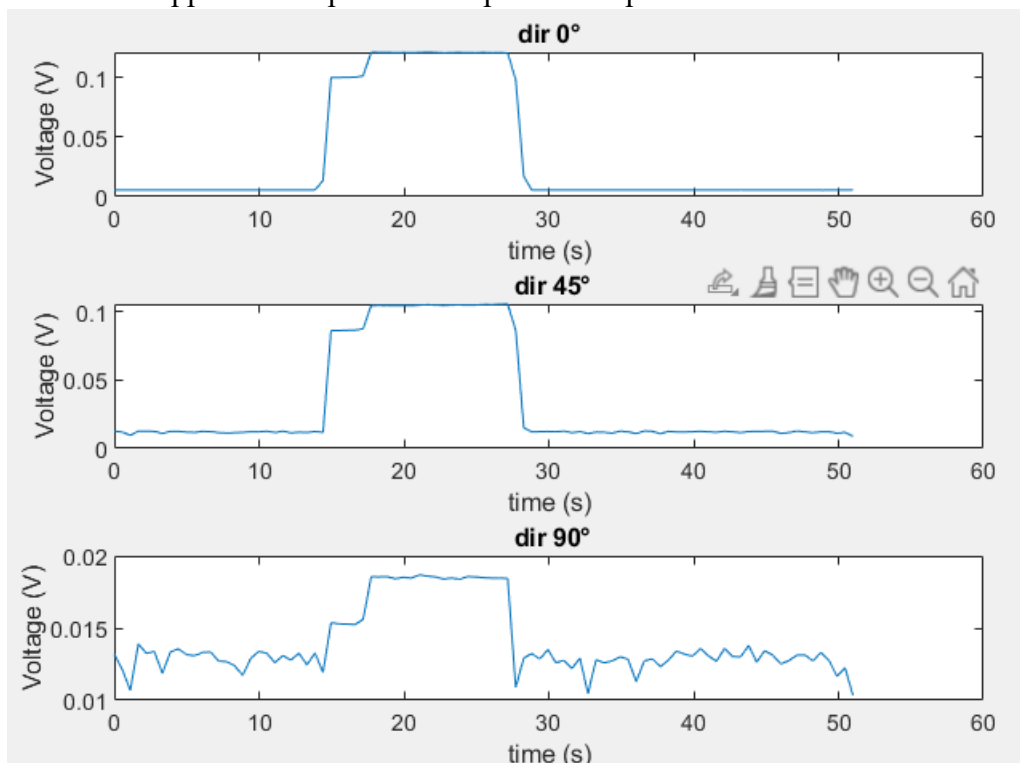


Figura 32: esempio delle acquisizioni dei segnali in Volt a 1,2V in ingresso

I valori medi, depurati dell'errore, per i tre canali di misurazione (0°,45°,90°), sono i seguenti (tabella 2):

Tabella 2: media del valore di tensione misurato nelle tre direzioni (rosetta C2K-XX-G1350/SP70*)

Tensione [V]	Media del valore di tensione misurato [V]		
	0°	45°	90°
1,2	0,1127	0,0966	-0,0057
1,8	0,1766	0,1549	-0,0093
2	0,2166	0,1872	-0,0034
2,8	0,2786	0,2358	-0,0032
3,5	0,3538	0,2945	-0,0068

Applicando la formula precedentemente esposta, convertiamo le tensioni medie in Volt nelle deformazioni per ciascun canale. I valori risultanti sono i seguenti (tabella 3):

Tabella 3: deformazione associata a ogni valore misurato, nelle tre direzioni (rosetta C2K-XX-G1350/SP70*)

Tensione [V]	Micro Deformazione		
	0°	45°	90°
1,2	0,2277	0,1952	-0,0115
1,8	0,3568	0,3129	-0,0188
2	0,4376	0,3782	-0,0069
2,8	0,5628	0,4764	-0,0065
3,5	0,7147	0,5949	-0,0137

Come si nota dalla figura 33, dato che gli estensimetri sono posizionati a 0°, 45° e 90°, ma tali direzioni non coincidono necessariamente con le direzioni principali, si ricorre alle seguenti relazioni [23]. Queste formule consentono la trasformazione delle deformazioni nelle tre direzioni alle deformazioni principali massima e minima.

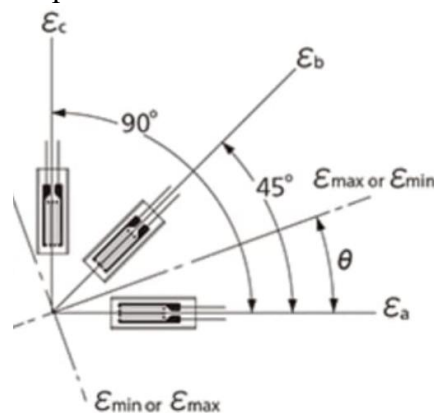


Figura 33: deformazioni principali e deformazioni nelle direzioni degli estensimetri della rosetta [23]

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2} [\varepsilon_a + \varepsilon_c + \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}}]$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{1}{2} [\varepsilon_a + \varepsilon_c - \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}}]$$

$$\theta = \frac{1}{2} * \tan^{-1} \left[\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \right]$$

$$\gamma_{max} = \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}}$$

Nel contesto attuale *a* corrisponde alla direzione 0°, *b* corrisponde alla direzione 45° e *c* corrisponde alla direzione 90°

Sostituendo tali relazioni, si ottengono i seguenti valori sperimentali per ciascuna tensione in Volt di input (tabella 4):

Tabella 4: valori di deformazioni principali massime e minime, angolo tra direzione di misura e direzione principale, e scorrimento angolare al variare della tensione elettrica in ingresso (rosetta C2K-XX-G1350/SP70*)

<i>Tensione</i> [V]	$\mu\varepsilon_{max}$ sperimentale	$\mu\varepsilon_{min}$ sperimentale	θ [°] sperimentale	$\mu\gamma_{max}$ sperimentale
1,2	0,2560	-0,0399	18,03	0,2959
1,8	0,4056	-0,0676	18,74	0,4732
2	0,4908	-0,0601	18,12	0,5510
2,8	0,6250	-0,0687	17,42	0,6937
3,5	0,7892	-0,0882	16,93	0,8773

• Valori numerici

Considerando che la rosetta ha una propria estensione e non è puntiforme, nell'analisi FEM (con una dimensione della mesh di 0.5 mm), non è stato identificato solo un elemento di applicazione, ma anche gli elementi di contorno. Successivamente, i valori sono stati mediati. (Come è evidenziato nell'immagine 34, non è stato considerato solo l'elemento 1006 in questo caso, ma anche gli otto intorno ad esso).

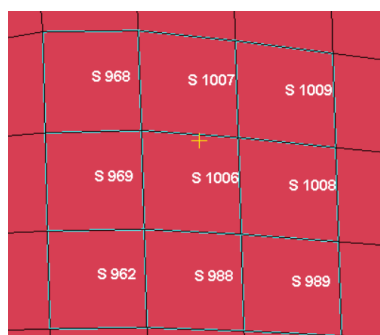


Figura 34: elementi selezionati

I valori numerici di deformazione per ciascun elemento possono essere estratti dal software, e attraverso una proporzione considerando lo spostamento massimo, è possibile adattarli per ciascun voltaggio.

Si ottiene quindi ciò che è riportato nella tabella 5:

Tabella 5: deformazione principale massima e minima numeriche, scorrimento angolare massimo numerico

<i>Tensione [V]</i>	$\mu\varepsilon_{max\ num.}$	$\mu\varepsilon_{min\ num.}$	$\mu\gamma_{max\ num.}$
<i>1,2</i>	0,3413	-0,0749	0,2664
<i>1,8</i>	0,5119	-0,1124	0,3996
<i>2</i>	0,5688	-0,1249	0,4440
<i>2,8</i>	0,7963	-0,1748	0,6215
<i>3,5</i>	0,9954	-0,2185	0,7769

- **Confronto tra caso sperimentale e caso numerico**

Confrontando i valori di nostro interesse relativi alla γ_{max} tra il caso numerico e il caso sperimentale, si osserva una notevole corrispondenza, con un errore medio di circa il 10 % (tabella 6).

Tabella 6: errore su γ_{max}

<i>Tensione [V]</i>	Errore su γ_{max}
<i>1,2</i>	10%
<i>1,8</i>	16%
<i>2</i>	19%
<i>2,8</i>	10%
<i>3,5</i>	11%

Dall'analisi del diagramma corrispondente (Figura 35), emerge chiaramente che l'andamento è praticamente identico. Si può inoltre dedurre che l'errore è sostanzialmente costante poiché la distanza tra le rette di interpolazione dei punti nei due casi rimane pressoché invariata lungo l'intero intervallo.

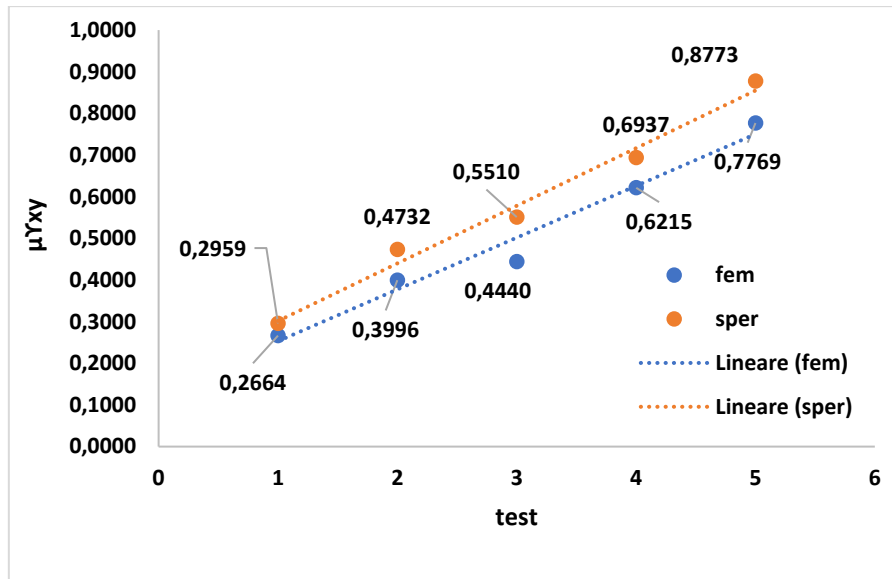


Figura 35: diagramma dello scorrimento angolare rilevato nel caso numerico (blu) e nel caso sperimentale (arancione)

Se ci focalizziamo su ϵ_x , osserviamo coerenza tra il caso numerico e il caso sperimentale. Questo si evince dalla tabella 7 e dalla figura 36.

Il tutto può essere spiegato dal fatto che ϵ_x è legata a una singola misurazione e non dipende dalle altre.

Tabella 7: deformazione lungo x nel caso numerico e nel caso sperimentale

$\mu\epsilon_x$ num.	$\mu\epsilon_x$ sperimentale
0,2654	0,2277
0,3981	0,3570
0,4423	0,4376
0,6192	0,5628
0,7740	0,7147

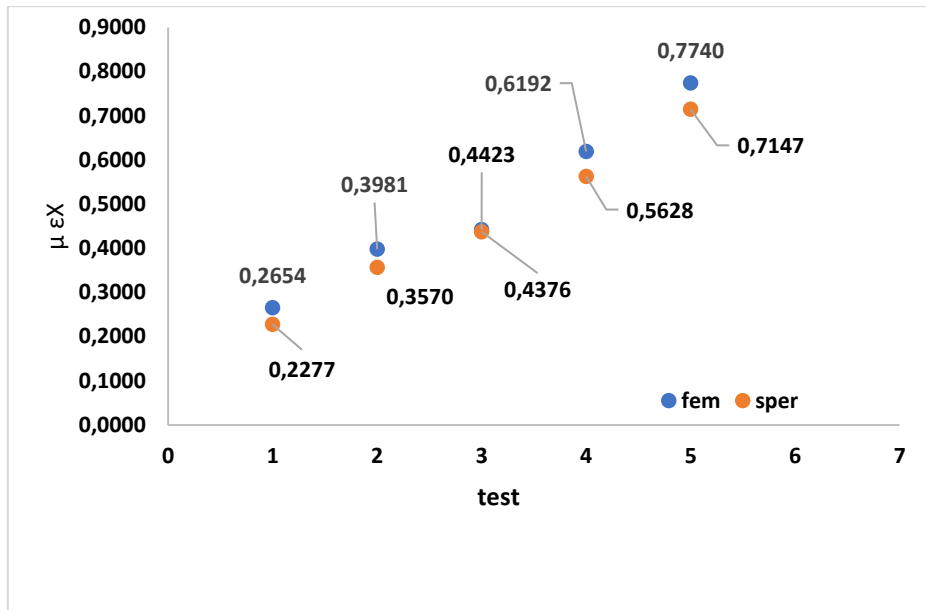


Figura 36:diagramma che mostra l'andamento della deformazione lungo x per ogni misurazione, nel caso numerico (blu) e nel caso sperimentale (arancione)

Gli errori sono infatti molto simili a quelli relativi alle gamma (tabella 8) e dovuti principalmente alla variabilità sperimentale intrinseca.

Tabella 8: errore sulla deformazione lungo x tra caso numerico e caso sperimentale

<i>Tensione [V]</i>	Errore su ϵ_x
<i>1,2</i>	17%
<i>1,8</i>	12%
<i>2</i>	1%
<i>2,8</i>	10%
<i>3,5</i>	8%

Possiamo affermare con sicurezza, alla luce dei confronti effettuati, che il modello FEM è stato validato. Ciò significa che ciò che il modello numerico predice è coerente con quanto misurato nella realtà. In altre parole, abbiamo ottenuto la conferma che dove l'analisi FEM indica la presenza di tensioni tangenziali, tali tensioni sono effettivamente presenti nella realtà. Nel nostro confronto, ci siamo concentrati sulle deformazioni anziché sulle tensioni, poiché queste ultime sono calcolate mediante ipotesi, come ad esempio lo stato piano di tensione, e utilizzando moduli con una certa incertezza. Le deformazioni, al contrario, sono misurazioni dirette che riflettono le variazioni dimensionali del materiale; pertanto, il confronto tra di esse risulta essere un approccio più accurato.

6.3 Verifica dell'assenza di flessione nel piano durante la prova ad ultrasuoni

Il passo successivo consiste nell'esaminare attentamente lo stato tensionale del provino hourglass, per controllare l'eventuale presenza di tensioni spurie nel piano che potrebbero causare la rottura in posizioni non centrali. Per questo motivo si è deciso di utilizzare due estensimetri a singola griglia (fig.38) (HBM-0.3/120 LY11) [24] collocati in questa specifica area (fig.37), entrambi distanti 36,9 mm dall'estremità, facendo particolare attenzione a posizionarli sullo stesso tow del materiale.

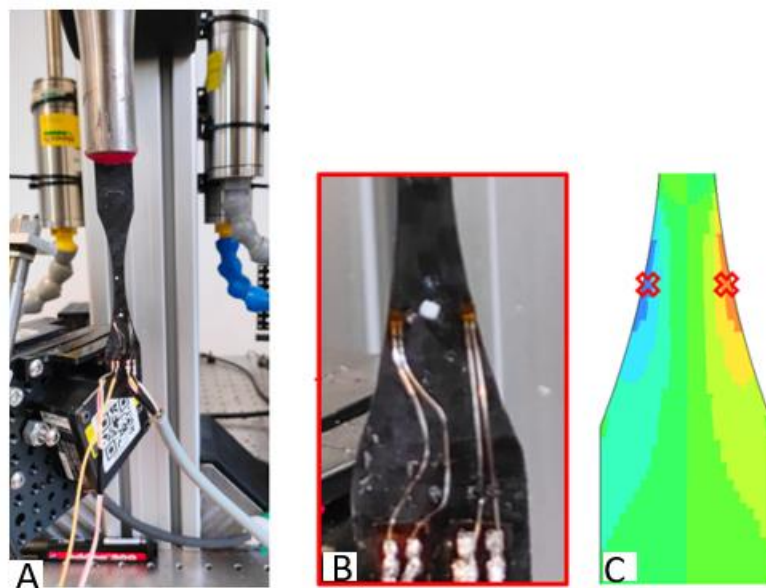


Figura 37: Estensimetri per studiare eventuale flessione nel piano: Applicazione sul provino hourglass (a)- dettaglio dell'applicazione (b)- punti di applicazione sull'andamento di tensioni tangenziali riportato (c)



Figura 38: estensimetro utilizzato (HBM-0.3/120 LY11) [24]

Essi sono stati integrati nel circuito di Wheatstone a un quarto di ponte (ossia per ogni estensimetro è stata misurata la deformazione assiale), e con una tensione di alimentazione di 5V. Dal datasheet emergono le seguenti informazioni di rilievo (tabella 9):

Tabella 9: resistenza elettrica e fattore di taratura di HBM-0.3/120 LY11 [24]

Resistenza elettrica	120,0Ω ± 1,5%
----------------------	---------------

Gage factor	1,70
-------------	------

In questo caso il rapporto deformazione/tensione elettrica risulta essere pari a 0,0047. Essendo presenti due estensimetri a singola griglia, i canali di lettura sono due, identificati come C1 e C2.

Le medie dei valori di tensione elettrica sono mostrate nella tabella 10.

Tabella 10: media del valore di tensione misurato nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-0.3/120 LY11)

<i>Tensione [V]</i>	<i>Media del valore di tensione misurato [V]</i>	
	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>1,1</i>	0,0348	0,0383
<i>1,3</i>	0,0432	0,0447
<i>1,5</i>	0,0479	0,0526

Questi valori sono successivamente convertiti agevolmente in deformazioni meccaniche utilizzando il fattore di conversione calcolato in precedenza (tabella 11).

Tabella 11: deformazioni nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-0.3/120 LY11)

<i>Tensione [V]</i>	<i>Micro Deformazioni</i>	
	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>1,1</i>	0,1638	0,1802
<i>1,3</i>	0,2033	0,2104
<i>1,5</i>	0,2254	0,2475

In questo caso, anziché verificare nuovamente la corrispondenza tra il caso numerico e sperimentale (come già eseguito in precedenza), l'attenzione è focalizzata sul confronto tra le misurazioni effettuate dai due canali. Ciò permette di valutare la possibilità di flessione nel piano. Il grafico sottostante (fig. 39) mostra il confronto tra le deformazioni misurate nei due canali.

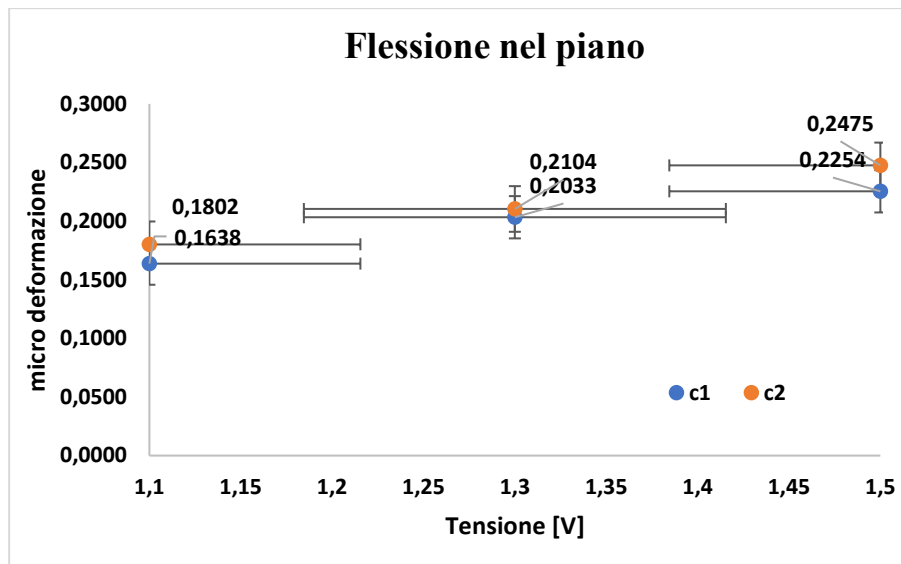


Figura 39: micro deformazione nei due canali (blu=c1 e arancione=c2)

Dall'analisi delle due misurazioni nei tre casi, emerge che esse quantificano le stesse grandezze. Le misurazioni non presentano picchi significativi in uno dei canali rispetto all'altro, escludendo così la possibilità di flessione nel piano.

La tabella 12 mostra la differenza percentuale delle due misurazioni rispetto alla loro media.

Tabella 12: differenza percentuale delle due misurazioni di deformazione (nei due canali) rispetto alla loro media

<i>Tensione [V]</i>	Discrepanza rispetto al valore medio
<i>1,1</i>	9,58 %
<i>1,3</i>	3,41 %
<i>1,5</i>	9,35 %

Tale conclusione è in linea con le previsioni del modello FEM, il quale indicava che il modo di vibrare a flessione nel piano (fig.40) del provino è distante in frequenza (di circa 70 Hz) da quello assiale per il quale il provino è stato progettato.



Figura 40: modo di vibrare a flessione nel piano del provino hourglass

6.4 Verifica dell'assenza di flessione fuori dal piano durante la prova ad ultrasuoni

Per completare l'analisi estensimetrica, è necessario verificare o escludere la presenza di flessione al di fuori del piano del provino, la quale potrebbe essere la causa della rottura nelle posizioni precedentemente discusse. A tale scopo, sono stati impiegati due estensimetri HBM-1.5/350 XY91 [25]. Si è scelto di posizionarli nella regione centrale del provino, su entrambe le facce del provino (fig.41 e 43) e quindi nominalmente alla stessa distanza dall'estremità (52.5 mm).

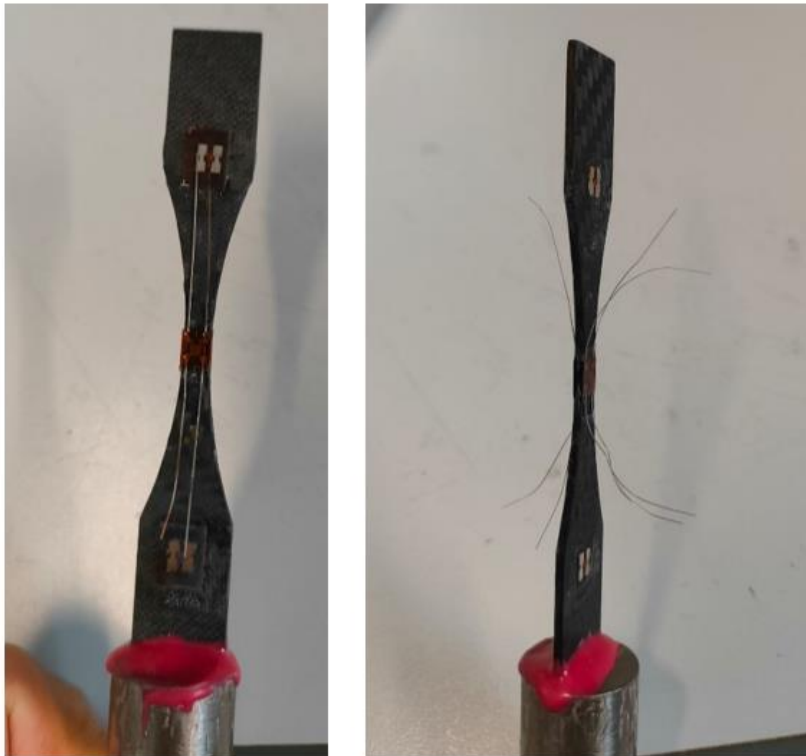


Figura 41: applicazione degli estensimetri HBM-1.5/350 XY91 sulle due facce del provino

L'estensimetro usato ha questa geometria (fig. 42):

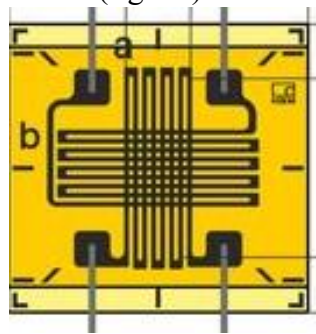


Figura 42: schema dell'estensimetro HBM-1.5/350 XY91 [25]

Esso è formato da due griglie sovrapposte, una che misura la deformazione longitudinale e l'altra la deformazione trasversale.

I suoi valori di resistenza e di gage factor (che questa volta sono due) sono riportati nella tabella 13.

Tabella 13: resistenza elettrica e gage factor di HBM-1.5/350 XY91 [25]

Resistenza elettrica	$350,0\Omega \pm 0,5\%$
Gage factor a	$1,97 \pm 1,5\%$
Gage factor b	$1,95 \pm 1,5\%$

Inoltre, entrambi sono con configurazione a mezzo ponte e con tensione di alimentazione pari a 5V.

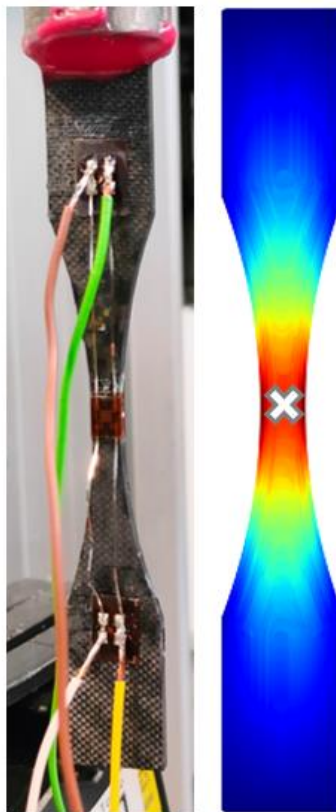


Figura 43: estensimetro HBM-1.5/350 XY91 collegato ai cavi elettrici e visualizzazione del punto di applicazione dello stesso sull'andamento della tensione assiale

In questo caso la formula utilizzata per passare da tensione elettrica a deformazione meccanica è:

$$\frac{\varepsilon}{U} = \frac{4}{KVG(1 + \nu)\sigma}$$

dove:

K è il valore medio del gage factor;

ν è il coefficiente di Poisson (0,1 nel caso in esame);
 σ è il valore di tensione assiale unitaria.

Sostituendo, il fattore di conversione risulta essere pari a 0,0037.

Il confronto eseguito in questo caso è simile a quello fatto nel paragrafo precedente. Vengono comparate le misurazioni provenienti dai due canali di acquisizione, ma in questo caso uno è relativo all'estensimetro sulla faccia anteriore, e uno è relativo all'estensimetro sulla faccia posteriore.

La media della tensione elettrica rilevata nei due canali è riportata nella tabella 14.

Tabella 14: media del valore di tensione misurato nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-1.5/350 XY91)

<i>Tensione [V]</i>	<i>Media del valore di tensione misurato [V]</i>	
	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>1,1</i>	0,0856	0,0939
<i>1,3</i>	0,1002	0,1113
<i>1,5</i>	0,1271	0,1326

Le deformazioni sono riportate in tabella 15:

Tabella 15: micro deformazioni misurate nei due canali al variare della tensione in ingresso (HBM-1.5/350 XY91)

<i>Tensione [V]</i>	<i>Micro Deformazioni</i>	
	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>1,1</i>	0,3190	0,3499
<i>1,3</i>	0,3734	0,4147
<i>1,5</i>	0,4736	0,4941

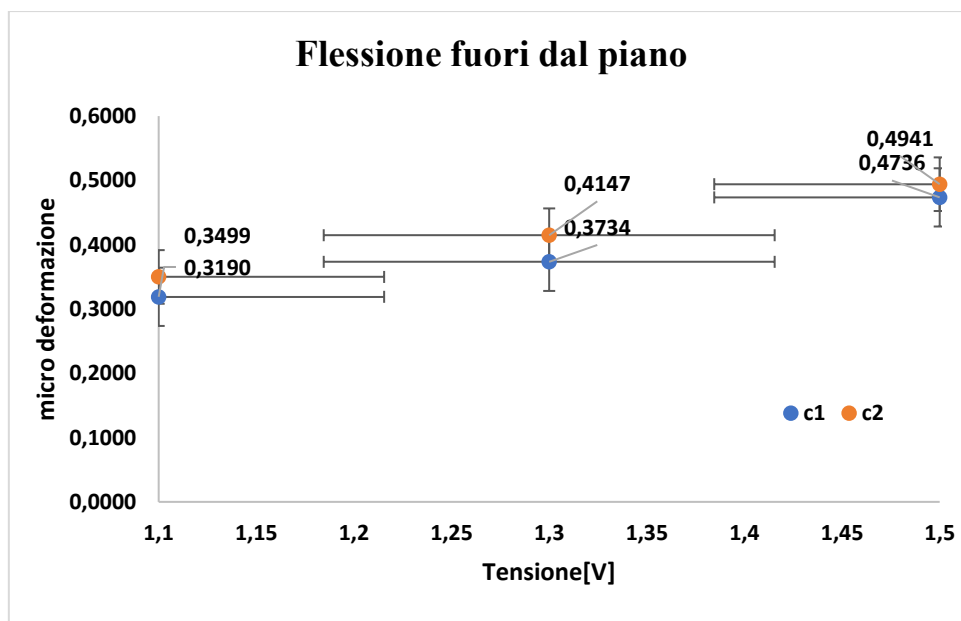


Figura 44: valore di micro deformazione per ogni tensione elettrica in ingresso, nei due canali (blu=c1; arancione=c2)

La discrepanza percentuale della differenza delle due misurazioni nei due canali rispetto la loro media è:

Tabella 16:discrepanza rispetto al valore medio delle due misurazioni di deformazione nei due canali

<i>Tensione [V]</i>	Discrepanza rispetto al valore medio
<i>1,1</i>	9,25 %
<i>1,3</i>	10,50 %
<i>1,5</i>	4,24 %

Nel confrontare le deformazioni (fig.44), si nota una differenza di lettura poco più pronunciata (tabella 16) tra i due canali rispetto al caso precedente. Questo può essere attribuito al fatto che nella realtà i due estensimetri non sono stati posizionati esattamente alla distanza nominale: l'estensimetro C1 è stato posizionato a 54,11 mm dall'estremità, mentre C2 a 53,06 mm. Di conseguenza, l'estensimetro C2 è più vicino al centro del provino, determinando ampiezze lette maggiori da C2. Tuttavia, la differenza è limitata. Pertanto, possiamo concludere affermando che non vi è flessione fuori dal piano, confermando ancora una volta quanto indicato dal modello FEM, il quale evidenzia che la frequenza corrispondente al modo di vibrare relativo alla flessione fuori dal piano (fig.45) è distante circa 2000 Hz da quella riferita al modo assiale.

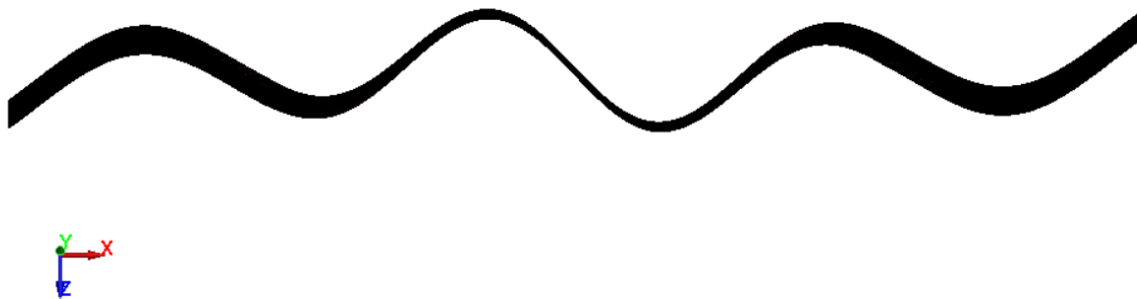


Figura 45:modo di vibrare secondo flessione fuori dal piano del provino hourglass

In sintesi, possiamo affermare che le rotture nelle posizioni discusse nel capitolo 5 non derivano né da flessioni nel piano né da flessioni fuori dal piano. Potenzialmente, quindi, potrebbero essere influenzate dalle tensioni tangenziali, la cui presenza è stata dimostrata dallo studio condotto sulle rosette. Pertanto, le attività svolte da questo momento in avanti sono tutte orientate a verificare la validità di questa ipotesi.

Il processo si articola in due fasi. Inizialmente, si intende progettare e successivamente testare un provino privo di tensioni tangenziali. A tal fine, verrà sviluppato un provino rettangolare supportato alle estremità mediante l'uso di tabs incollati su entrambe le facce. Attraverso il confronto dei risultati ottenuti con tale provino rispetto a quelli relativi all' hourglass, si mira a verificare se il primo presenta una maggiore vita a fatica e se la rottura avverrà al centro. Successivamente, allo scopo di approfondire ulteriormente la dipendenza della rottura dalle tensioni tangenziali, si procederà con la progettazione e la realizzazione di un secondo provino. Quest'ultimo, pur avendo la medesima geometria hourglass del provino descritto precedentemente, che induce tensioni tangenziali, avrà proprietà quasi-isotrope mediante una specifica sequenza di impilaggio dei layer. Come verrà mostrato successivamente, tale stacking sequence è meno soggetta agli effetti degradanti delle tensioni tangenziali sulla risposta a fatica e, pertanto, permetterà di indagare ulteriormente il ruolo delle tensioni tangenziali nella rottura del materiale.

7. Materiali

In questa sezione, vengono dettagliati i materiali impiegati per la fabbricazione dei provini, fornendo anche le rilevanti proprietà meccaniche. I primi due materiali sono destinati alla realizzazione dei provini, mentre i successivi quattro sono adesivi impiegati per fissare i tabs, o per collegare i provini ai sonotrodi, come successivamente spiegato nel capitolo dedicato ai Metodi

7.1 Easy Composites XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre

Il materiale principale impiegato per la realizzazione dei provini è fornito da *Easy Composites* [26], con il nome commerciale *XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre*. Si tratta di un composito con matrice epossidica rinforzata da fibre di carbonio, di tipo pre-preg, che quindi richiede la polimerizzazione mediante forno o autoclave. La sua struttura è caratterizzata da un tessuto di tipo *twill-weave*, con trama e ordito che si intrecciano con periodicità doppia. Il materiale viene venduto in rotoli e conservato in congelatore a -18°C , e il suo aspetto è il seguente (fig.46):

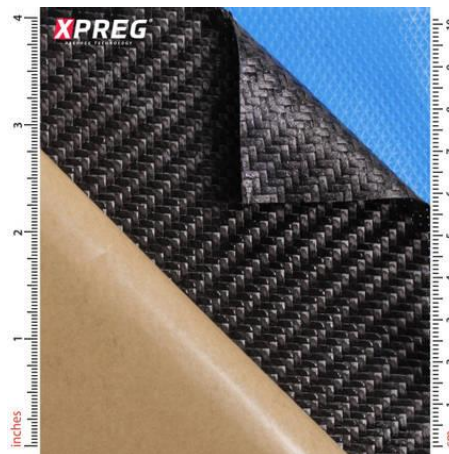


Figura 46: aspetto di *XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre* [26]

La sua superficie presenta una finitura di classe A e si distingue per la notevole drappabilità. È progettato per essere polimerizzato con sacco a vuoto. Per ottimizzare le proprietà meccaniche finali, il datasheet consiglia l'applicazione di un ciclo di temperatura a più fasi, accuratamente controllato, con temperatura finale di 120°C , come illustrato nell'immagine di seguito (fig. 47).



Figura 47:ciclo di cura di XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre [26]

Le specifiche di questo materiale sono riportate nella tabella 17:

Tabella 17:specifiche da datasheet di XC110

Colore	Nero
Orientazione delle fibre	0°, 90°
Tipo	pre-preg
Matrice	Resina epossidica
Percentuale in peso di resina	42 %
Tessuto	2x2 twill woven fabric
Spessore nominale del singolo layer	0,25 mm

Nel processo di fabbricazione dei provini, sono stati impiegati otto layer, dando luogo a uno spessore complessivo di 1,78 mm, sovrapposti tutti con lo stesso orientamento, cioè con stacking sequence $[0]_8$. Una volta che viene laminato con questa stacking sequence, le sue proprietà meccaniche diventano (tabella 18):

Tabella 18: alcune proprietà meccaniche di XC110

Resistenza a trazione nominale	521 MPa
Densità ρ	1,4748 g/cm ³
Modulo a trazione E_x	59,3 GPa
Modulo di taglio G_{ab}	4,2 GPa

Le proprietà riportate nella tabella 18 sono state determinate mediante la tecnica *Impulse Excitation Technique* (IET) e sono quindi le proprietà dinamiche del materiale. In particolare, E_x è stato determinato con un impulso longitudinale, e invece G_{ab} mediante un impulso che ha eccitato il modo di vibrare torsionale.

Riferendoci invece al provino “quasi isotropo”, quando si lamina con stacking sequence $[0/90/45/-45]_s$ le sue proprietà diventano quelle riportate nella tabella 19.

Tabella 19: proprietà dinamiche del provino quasi isotropo

Resistenza a trazione nominale	531 MPa
Densità ρ	1,4748 g/cm ³
Modulo a trazione E_x layer a 0° e a 90°	59,3 GPa
Modulo di taglio G_{ab}	4,2 GPa
Modulo a trazione layer a 45°	14,9 GPa
Modulo di taglio layer a 45°	27 GPa

7.2 Easy Composite 100g 2x2 Twill Woven Glass Cloth

Per realizzare i tab, è stato impiegato il seguente tessuto, sempre proveniente da *Easy Composites*. Esso è caratterizzato da un rinforzo di fibre di vetro e all'aspetto appare di colore bianco (fig. 48).

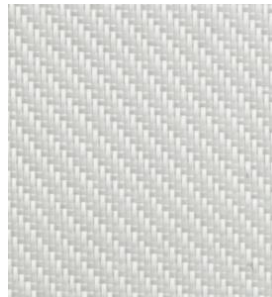


Figura 48: aspetto del tessuto in fibra di vetro impiegato

Il processo di cura è identico a quello del materiale precedente e le proprietà compressive del laminato, ottenute sempre tramite tecnica IET, sono (tabella 20):

Tabella 20: informazioni di rilievo del GFRP impiegato

Spessore totale	2,08 mm
Densità ρ	1,91 g/cm ³
Modulo a trazione E_x	31,2 GPa
Modulo di taglio G_{ab}	5,5 GPa

7.3 IN2 Epoxy Infusion Resin

IN2 Epoxy Infusion Resin (fig. 49 A) è la resina epossidica utilizzata in alcuni casi come adesivo, come verrà illustrato in seguito.

Essa si presenta di colore trasparente ed ha ottime proprietà meccaniche. Il rapporto resina-indurente è 100:30 e necessita, dopo il miscelamento di circa due minuti, di essere polimerizzata per 18-24 ore.

Nella tabella 21 vengono riportate le sue principali proprietà:

Tabella 21: informazioni di rilievo di IN2 Epoxy Infusion Resin [28]

Temperatura massima di servizio	73 °C
---------------------------------	-------

Resistenza a trazione	63,5-73,5 MPa
Densità ρ [27]	1.14 g/cm ³
Modulo elastico [27]	3000 MPa

7.4 SikaPower®-1277

SikaPower®-1277 (fig.49 B) rappresenta un adesivo epossidico strutturale bicomponente in grado di polimerizzare a temperatura ambiente. La miscelazione mira a conferire un'elevata resistenza, rendendolo idoneo per l'utilizzo su substrati metallici come acciaio e alluminio, oltre che su substrati compositi come GFRP e CFRP. Caratterizzato da eccellenti proprietà "non-sag", l'adesivo mantiene la sua forma e integrità strutturale senza deformarsi o sprofondare quando applicato o posizionato su una superficie verticale [29]. Contiene inoltre sfere di vetro con diametro di 0,3 mm per garantire uno spessore di incollaggio ottimale.

L'epossidico si presenta di colore rosso, mentre l'indurente è di colore bianco; Una volta miscelati (con rapporto 2:1), assumono una tonalità rosso chiaro.

Di seguito sono riportate le caratteristiche di questo adesivo (tabella 22):

Tabella 22: informazioni di rilievo di SikaPower®-1277 [29]

Temperatura massima di servizio	35 °C
Resistenza a trazione	30 MPa
Densità ρ	1,1 g/cm ³
Modulo elastico	2200 MPa

7.5 Loctite HY 4070

LOCTITE HY 4070 (fig. 49 C) è un adesivo in gel caratterizzato da una formulazione ibrida tra cianoacrilato e acrilico. Il suo colore è giallo pallido, e la sua peculiarità è che offre un fissaggio rapido a temperatura ambiente.

Le sue caratteristiche distintive includono la mancanza di colature, una resistenza notevole a temperature e umidità, e una resistenza termica che varia da -40 a +100 °C. La sua consistenza in gel conferisce la capacità di evitare migrazioni indesiderate, garantendo un'applicazione precisa anche su superfici verticali [30].

Per ottenere migliori risultati nelle applicazioni, sul datasheet viene consigliato di utilizzare il beccuccio.

7.6 3M™ Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

L'adesivo epossidico strutturale 3M™ Scotch-Weld™ EC-9323 B/A (fig. 49 D) è un adesivo in pasta epossidica bicomponente, che polimerizza a temperatura ambiente per 14 giorni o in forno a 65°C per 2 ore [31]. La sua densità è di $1,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

Il rapporto tra epossidico e indurente è di 100:27 e la miscelazione dei due componenti genera una pasta di colore violaceo.

Questo adesivo è in grado di sviluppare un legame strutturale tenace e resistente agli urti. Presenta un'ottima adesione ad una vasta gamma di substrati inclusi metalli, vetro, e compositi come, per esempio, GFRP e CFRP. Una volta indurito, fornisce una resistenza estremamente elevata al taglio in un ampio intervallo di temperature, dimostrando un'ottima durabilità anche negli ambienti severi.



Figura 49: adesivi usati: A)IN2 Epoxy Infusion Resin[28];B) SikaPower®-1277[29];C)Loctite HY 4070[30]; D) 3MScotch-Weld[31]

8. Metodi

Questo capitolo si concentra sui metodi, numerici e sperimentali, adottati per raggiungere gli obiettivi prefissati.

Data la natura numerico-sperimentale di questa tesi, l'attenzione è equamente distribuita tra i metodi numerici, e i metodi sperimentali.

8.1 Metodi sperimentali

In questa sezione sono esaminati i metodi sperimentali per la realizzazione dei provini e l'esecuzione dei test ad ultrasuoni, con una descrizione dettagliata delle attrezzature impiegate.

8.1.1 Realizzazione delle piastre di composito

Dopo aver ritagliato otto fogli della dimensione desiderata (fig. 50) di pre-preg di *XC110* prelevati dal rotolo conservato in congelatore, si disegna una traccia per tener conto della direzione del rinforzo. Nel caso del *XC110*, la direzione a 0° ha lo stesso numero di filamenti per fascio di fibre (bundle) della direzione a 90° .



Figura 50: taglio di otto fogli di prepreg

Successivamente, si passa alla preparazione dello stampo, composto da una lastra di vetro che richiede una pulizia accurata con acetone, dopo aver rimosso le impurità delle lavorazioni precedenti con un taglierino. Non tutta la lastra sarà utilizzata; la zona di lavoro viene delimitata da quattro strisce di *sealant tape*. Si sceglie un'area leggermente più grande dei fogli di prepreg, lasciando spazio per posizionare successivamente una valvola. Dopo aver applicato il *sealant tape*, con una spugnetta si stende uniformemente della cera distaccante sull'intera area di lavoro (fig. 51). La cera distaccante agevola il distacco della piastra del composito dal vetro al termine del processo di polimerizzazione. La cera richiede circa dieci minuti per asciugarsi, dopodiché si può procedere con gli step successivi.



Figura 51: lastra con sealant tape applicato e cera distaccante passata

Nel frattempo, per ottimizzare i tempi, è consigliabile tagliare dei rettangoli della dimensione dell'area di lavoro, da tre materiali diversi (fig. 52) che serviranno successivamente:

- 1) **Breather**, un tessuto in feltro di poliestere che agevola l'eliminazione dell'aria intrappolata nel materiale durante la polimerizzazione e assorbe gli eccessi di resina senza impregnare il materiale.
- 2) **Peel-ply**, un tessuto molto poroso di Nylon66 che facilita il distacco del composito dal breather, rendendo però ruvida la superficie della piastra.
- 3) **Bag**, una pellicola necessaria per creare il sacco sottovuoto.

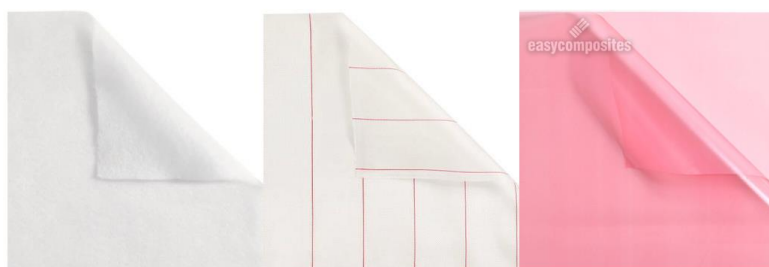


Figura 52: da sinistra a destra: Breather, Peel-Ply e Bag [26]

Terminato il ciclo di cura, si procede posizionando un layer alla volta, seguendo la stacking sequence prestabilita. Dopo aver posizionato ciascun layer è importante passare una palettina per uniformare la pressione ed eliminare eventuali bolle d'aria. Successivamente si applica il tessuto di peel-ply sui layer, assicurandosi di coprire l'intero composito. Si esercita nuovamente una pressione omogenea per uniformare la superficie, dopodiché si posiziona il breather. Con dello scotch carta, vengono fissati i quattro angoli della piastra. Nello spazio rimasto libero, sopra il breather, si colloca una valvola per l'aspirazione dell'aria (fig. 53A). Successivamente, si posiziona il bag, facendo attenzione a mantenerlo teso e facendolo aderire al sealant tape. Si pratica un foro nel bag in corrispondenza della valvola e si collega l'altra parte della valvola, collegata a sua volta al tubo di gomma della pompa a vuoto, che aspirerà l'aria (fig. 53B). Di nuovo, con la spatolina, si elimina l'aria intrappolata, e una volta che la pressione interna si è stabilizzata, si avvia la pompa per creare il vuoto (fig. 53C). A questo punto l'intera lastra, con la piastra ricoperta dal bag, viene posizionata all'interno del forno (fig. 53D), e si imposta il programma per il ciclo di cura desiderato.

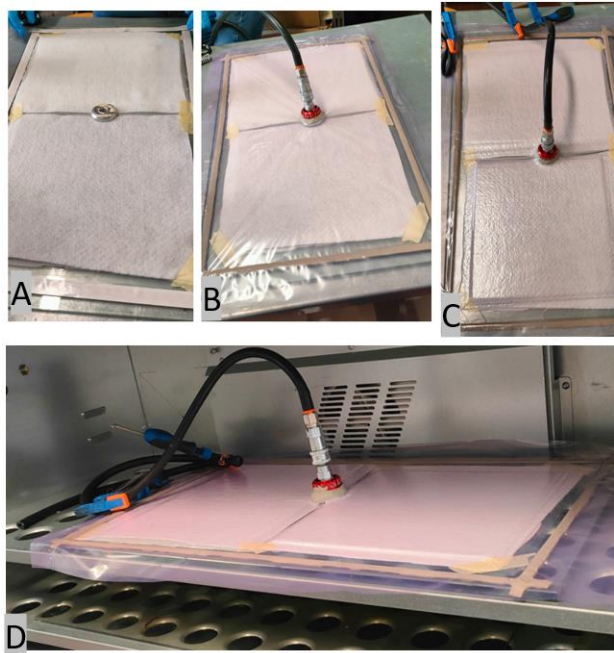


Figura 53: fasi intermedie nel processo di creazione della piastra

Dopo aver completato la fase di cura della piastra, si estrae dal forno una volta raggiunta la temperatura ambiente. Vengono successivamente rimossi gli strati di bag, peel-ply e breather (fig. 54A): A questo punto, la piastra è pronta (fig. 54B) per essere ritagliata.

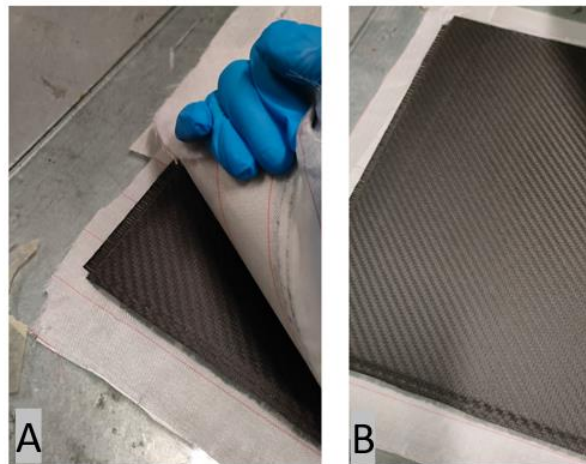


Figura 54: rimozione dei tessuti di Breather, peel-ply e Bag(A) - piastra terminata (B)

La piastra di partenza dei provini quasi isotropi è differente: mantiene costante lo spessore, poiché è composta anch'essa da otto strati, ma questi sono sovrapposti con orientamenti differenti a causa della variazione nella stacking sequence ($[0/90/45/-45]_s$).

8.1.2 Taglio dei provini

Per eseguire il taglio della piastra al fine di ottenere i provini desiderati, si utilizza la macchina *Wazer Water Jet*. Il suo ugello effettua il taglio mediante un getto d'acqua ad alta pressione, opportunamente mescolato con granuli di sabbia [32].

La macchina è costituita da un supporto in polipropilene chiamato *Bed* (fig. 55A), sul quale viene posizionata la piastra. Successivamente, questa viene fissata con viti per evitare vibrazioni e spostamenti durante il processo di taglio. I parametri di taglio e anche le geometrie da tagliare, precedentemente disegnate su *Solidworks*, vengono definiti mediante un software dedicato fornito dai costruttori e importati nella macchina tramite una scheda SD.

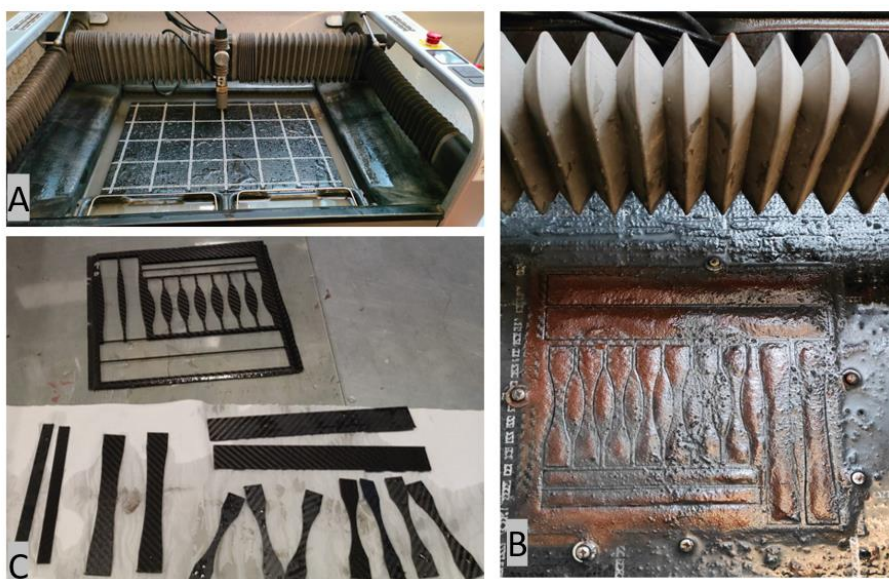


Figura 55: Wazer Water Jet (A)- provini tagliati (B)-provini pronti (C)

Una volta terminato il processo di taglio (fig. 55B), i provini vengono estratti, lavati ed asciugati, risultando così pronti per l'uso (fig. 55C).

I provini che, dopo il taglio con la *Wazer Water Jet*, sono già pronti sono quelli hourglass sia nella variante iniziale, che in quella quasi isotropa.

Nella variante del provino con tabs, questi vengono ritagliati seguendo la stessa procedura (fig. 56 A). Successivamente, i tabs vengono incollati al provino mediante l'applicazione dell'adesivo. Dopo aver accuratamente pulito la superficie delle parti che entrano in contatto, levigato con carta vetro e trattato con acetone, si applica l'adesivo: nel caso di un adesivo bicomponente, si mescolano le due parti e, dopo la miscelazione, se ne preleva una piccola quantità che viene applicata su entrambe le facce. Barre e tabs vengono quindi uniti, e per assicurare il corretto posizionamento, si utilizza uno stampo (fig. 56 B) appositamente progettato, realizzato in materiale plastico attraverso una stampante 3D (*Ultimaker 2+*). In aggiunta, si posizionano dei pesi (fig. 56 C) sulla superficie per l'intera durata del processo di polimerizzazione dell'adesivo, per assicurare uno spessore minimo di adesivo, pertanto più efficace. Un provino con tabs pronto per essere testato è mostrato nella figura 56 D.

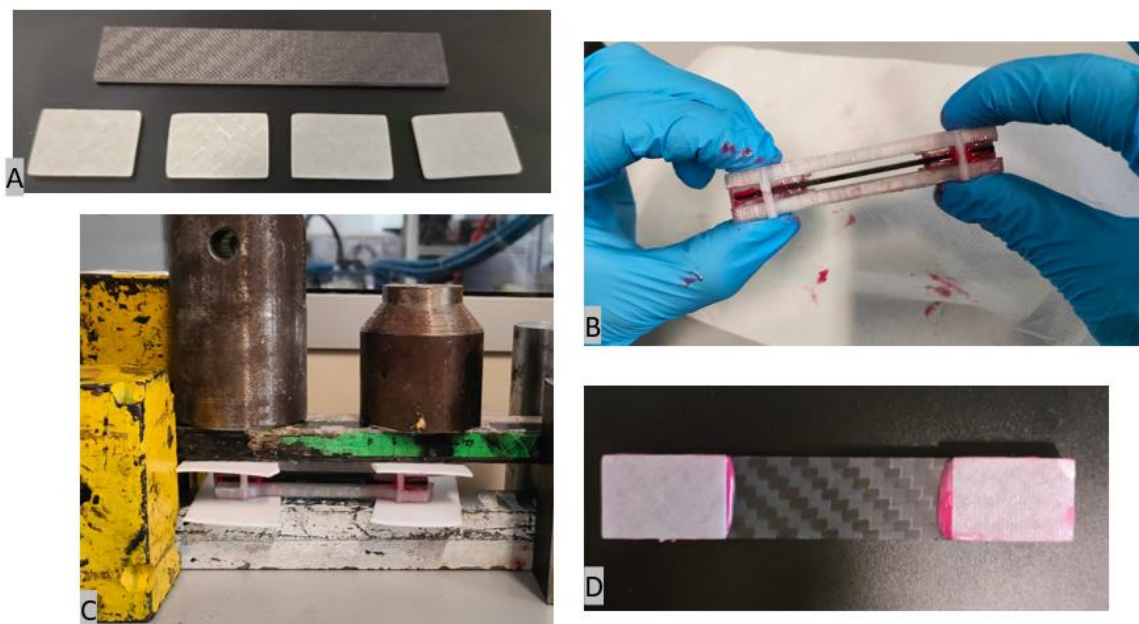


Figura 56: fasi intermedie nel processo di realizzazione del provino con tabs: A) taglio di provini e tabs; B) stampo e provino; C) provino con pesi; D) provino pronto

8.1.3 Famiglie di provini con tabs

Nel presente lavoro di tesi, sono state investigate diverse tipologie di provini con tabs. L'obiettivo è stato infatti quello di indentificare la configurazione di tabs e incollaggio che garantisca l'esecuzione di test VHCF, ovvero non portasse ad una rottura precoce del tab o ad un suo distacco. Complessivamente, sono state realizzate tre macrocategorie di provini con i tabs, che si differenziano per la tipologia di adesivo impiegato per incollare i tabs.

1) La prima famiglia è rappresentata da provini in CFRP con tabs in GFRP incollati mediante l'adesivo SikaPower®-1277.

Le dimensioni possono essere riportate nella seguente tabella (tabella 23).

Tabella 23: dimensioni dei provini della prima famiglia

Lunghezza totale	83 mm
Lunghezza dei tabs	22 mm
Larghezza dei tabs/provini	15 mm
Lunghezza dello spazio tra i tabs	39 mm

La frequenza nominale, ovvero quella determinata mediante modello agli elementi finiti, di questo tipo di provino è di 19733 Hz.

In figura 57 è mostrata una immagine di un provino appartenente a questa categoria.

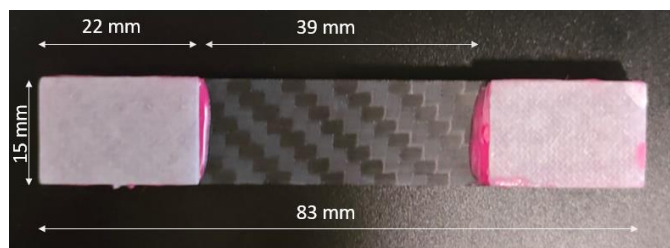


Figura 57: immagine del primo provino con tabs progettato e realizzato con dimensioni riportate

2) La seconda famiglia è rappresentata da provini con tabs incollati con IN2 Epoxy Infusion Resin. Essa si suddivide in più famiglie, denominate A, B, C, D.

La famiglia A ha provini uguali a quelli della prima famiglia, con la differenza che l'adesivo usato è la resina. Sono stati realizzati 5 provini, visibili nell'immagine 58. La frequenza nominale di questi provini è 20690,7 Hz.



Figura 58: provini della famiglia A

La famiglia B, invece, è costituita da cinque provini dello stesso materiale e delle stesse dimensioni dei precedenti. In questa famiglia però i tabs vengono svasati. Questo è stato fatto con l'utilizzo di carta abrasiva. Un'immagine di questa famiglia è la seguente (fig. 59). In essa è presente un ingrandimento che consente di visualizzare meglio lo smusso.

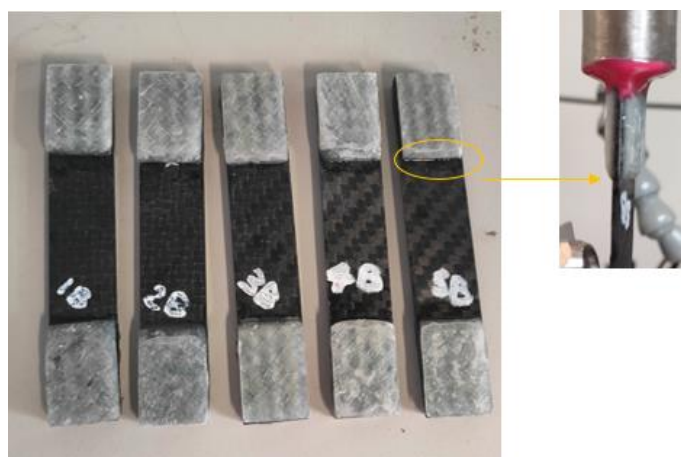


Figura 59: provini della famiglia B

Mediante lo smusso, le tensioni agenti nell'adesivo si riducono considerevolmente. In particolare, da analisi agli elementi finiti è stato osservato che mediante lo smusso si ottiene una riduzione delle tensioni agenti nell'adesivo di quasi il 50% rispetto alla configurazione non smussata.

La famiglia C, invece, utilizza barre realizzate a partire da una piastra simile a quella descritta nel capitolo 8.1.1, ma con un doppio strato di peel-ply (uno sopra e uno sotto la piastra). Questo conferisce al provino una maggiore rugosità, favorevole per l'adesione con i tabs. Dall'immagine 60, è evidente che la superficie appare più ruvida. In questa famiglia un provino ha tabs con angolo di 90° (1C), e un altro presenta tabs svasati (2CS).



Figura 60: provini della famiglia C

La famiglia D è caratterizzata da provini in CFRP con tabs del medesimo materiale tagliati a 45°. Due provini hanno i tabs svasati. La figura 61 mostra i provini appartenenti alla famiglia D.

Essi hanno le seguenti dimensioni (tabella 24):

Tabella 24: dimensioni dei provini della famiglia D

Lunghezza totale	95 mm
Lunghezza dei tabs	25 mm
Larghezza dei tabs/provini	15 mm
Lunghezza dello spazio tra i tabs	45 mm

La frequenza del modo longitudinale nominale è di 20532,5 Hz.

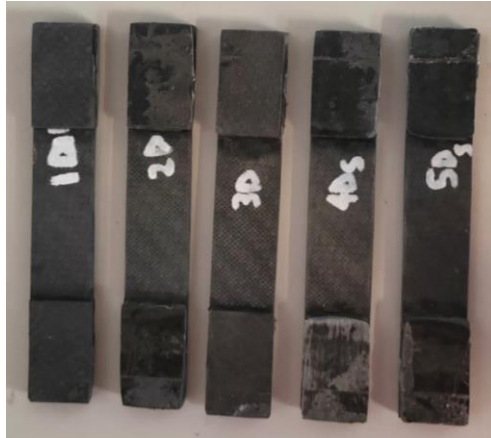


Figura 61: provini della famiglia D

3) La terza famiglia è rappresentata da provini con tabs incollati mediante l'adesivo 3M™ Scotch-Weld™ EC-9323 B/A (fig. 62).



Figura 62: provini della terza famiglia

In questo caso, sono stati riutilizzati alcuni provini provenienti dalle altre famiglie, sottoponendoli a un'appropriata pulizia per rimuovere residui di adesivo, sia attraverso l'uso di acetone che di carta abrasiva. L'unico cambiamento apportato è stato quello dell'adesivo, al fine di studiarne gli effetti.

8.1.4 Misurazione delle proprietà meccaniche

Per caratterizzare le proprietà elastiche dei materiali utilizzati, è stata impiegata la tecnica IET, acronimo di *Impulse Excitation Technique*. Questa procedura, standardizzata per i materiali isotropi secondo la norma ASTM E1876 [33], può essere utilizzata anche con i materiali compositi. Il procedimento consiste in un test vibrazionale non distruttivo, e l'attrezzatura necessaria è illustrata nell'immagine sottostante (fig.63).

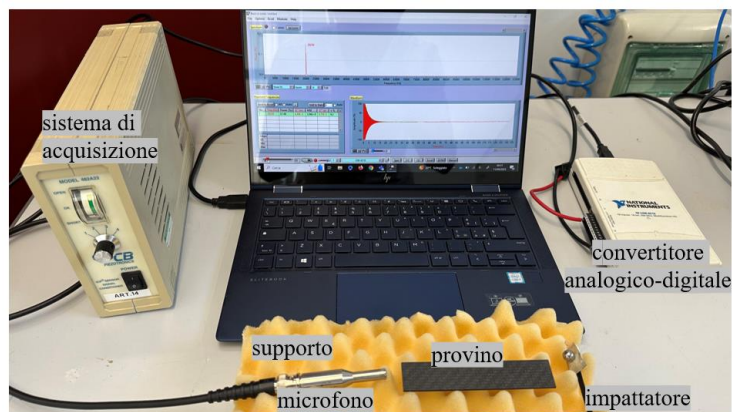


Figura 63:attrezzatura per la tecnica IET

Per utilizzare questo metodo, si impatta il provino con un apposito strumento, generando un impulso. Dopo il picco iniziale, il provino inizia a vibrare seguendo le sue oscillazioni libere risuonando con le sue frequenze naturali, che dipendono proprio dalle proprietà elastiche del materiale, come il modulo di Young, il modulo di taglio, il coefficiente di Poisson. L'obiettivo è eccitare il provino in modo da indurre la vibrazione desiderata. L'impulso, generato tramite un'azione meccanica (l'urto con l'impattatore), produce un'onda sonora che viene acquisita da un microfono.

Il segnale viene successivamente inviato al sistema di acquisizione *National Instruments NI usb-6210*, amplificato e convertito da analogico a digitale per la visualizzazione su computer. Attraverso il programma *Buzz-o-sonic®* [34], viene eseguita la FFT (Fast Fourier Transformation) del segnale, passando dal dominio del tempo a quello delle frequenze.

Ad esempio, nella figura 64A viene mostrato il segnale nel dominio del tempo ottenuto da un impulso per eccitare il modo longitudinale del provino nell'esempio. Con la FFT viene convertito nel dominio delle frequenze, mostrando un picco a 19,683 kHz (fig. 64B), la sua frequenza di risonanza.

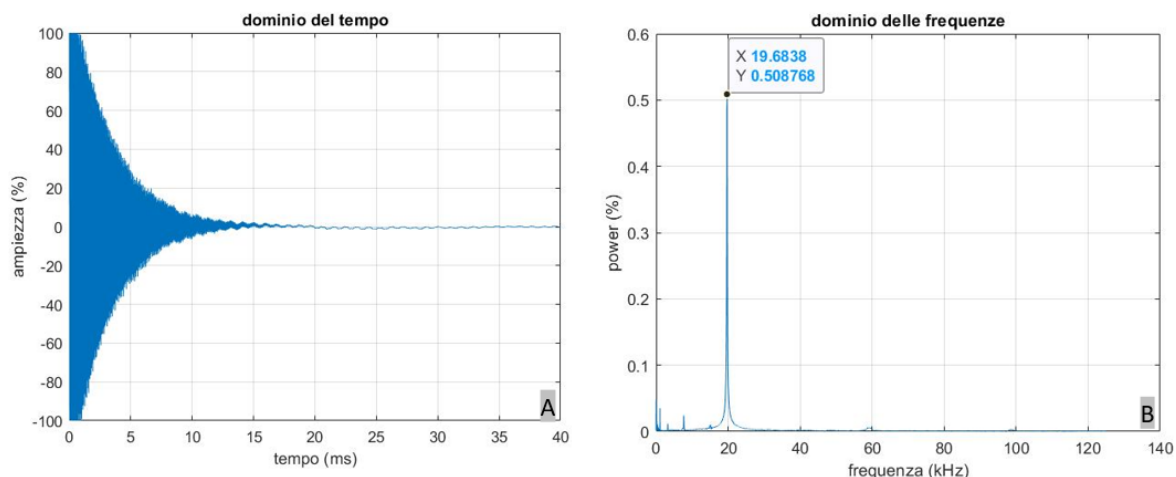


Figura 64: dominio del tempo (A) e dominio delle frequenze (B) del segnale

L'attrezzatura comprende anche un supporto schiumoso in poliuretano che ha due scopi principali: garantire che il provino sia in condizioni libero-libero, permettendogli di vibrare secondo il suo moto libero, e assorbire eventuali vibrazioni indesiderate estranee senza limitare il modo di vibrare desiderato. Per impattare il provino nel modo desiderato, è fondamentale mantenere il provino fermo nei nodi di quel modo di vibrare, riducendo così lo smorzamento, e posizionare il microfono dove si verifica la massima vibrazione per quel modo, e quindi il massimo spostamento.

Ad esempio, per indurre il modo longitudinale (fig. 65 c), è necessario impattare all'estremità del provino e acquisire gli spostamenti all'altra estremità. In caso di flessione, si impatta al centro e si acquisiscono gli spostamenti all'estremità (fig. 65 a-b). Per la torsione (fig. 65 d), considerando che le linee modali sono a croce, si impatta in una zona intermedia (percepando così anche il modo flessionale).

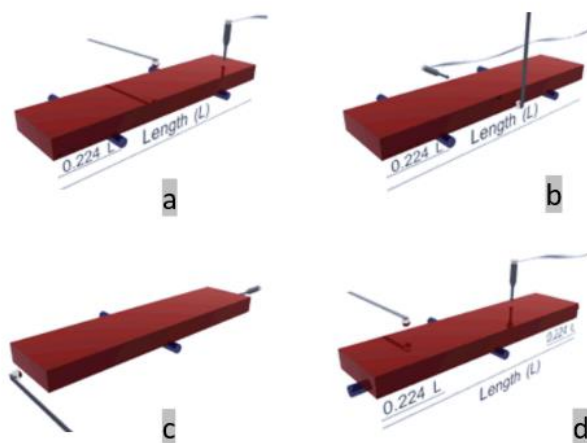


Figura 65: impatto per indurre il modo flessionale fuori dal piano (a), flessionale nel piano (b), longitudinale (c), torsionale (d) [34]

Dopo l'acquisizione del segnale, in un'apposita interfaccia, inserendo le dimensioni e la massa della barretta del materiale di interesse, il software effettua automaticamente il calcolo del modulo elastico, del modulo di taglio e del coefficiente di Poisson.

8.1.5 Realizzazione del test per le prove di fatica VHCF

In questa sezione sono dettagliati gli aspetti sperimentali relativi ai test ultrasonici, includendo una descrizione dell'attrezzatura utilizzata, del tipo di controllo implementato e delle procedure per la configurazione di tali test.

1) Macchina ad ultrasuoni per prove di fatica VHCF

La macchina impiegata per eseguire i test VHCF è stata progettata e sviluppata presso il Politecnico di Torino. Si tratta di un'apparecchiatura ad ultrasuoni progettata per condurre test in ambito giga-ciclico con un rapporto di sollecitazione $R = -1$, garantendo quindi un'uguale ampiezza di sollecitazione sia in trazione che in compressione.

Gli elementi chiave della macchina sono illustrati nell'immagine sottostante (figura 66).

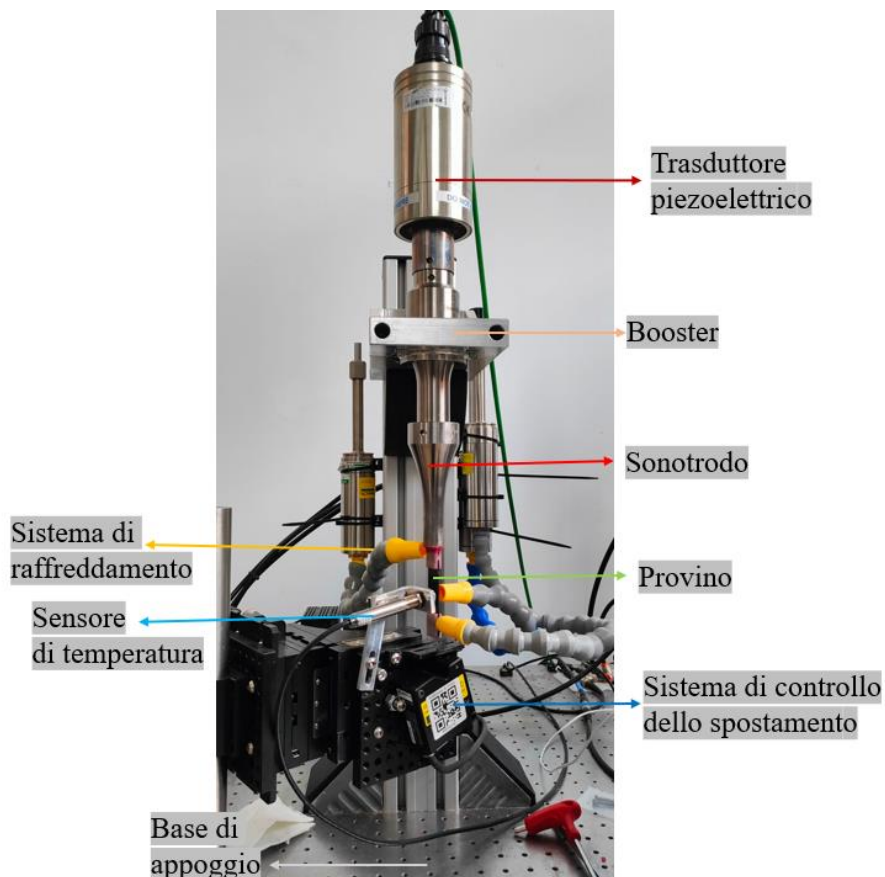


Figura 66: elementi principali della macchina per la prova VHCF

L'intero sistema è supportato da una base rigida antivibrante che conferisce elevata rigidità e consente di isolare la macchina dalle vibrazioni [35]. Un generatore elettrico ad ultrasuoni converte il segnale elettrico da 50 Hz a 20 kHz. Questo segnale elettrico viene successivamente trasformato in oscillazioni meccaniche attraverso l'uso di un trasduttore piezoelettrico. Le

oscillazioni meccaniche sono amplificate dal sonotrodo, appositamente progettato con un profilo iperbolico-cilindrico per massimizzare l'amplificazione.

L'intero setup sfrutta la condizione di risonanza del sistema sonotrodo-provino ed è progettato per garantire, per quanto riguarda lo spostamento e la tensione assiale, le forme modali illustrate nella figura 67.

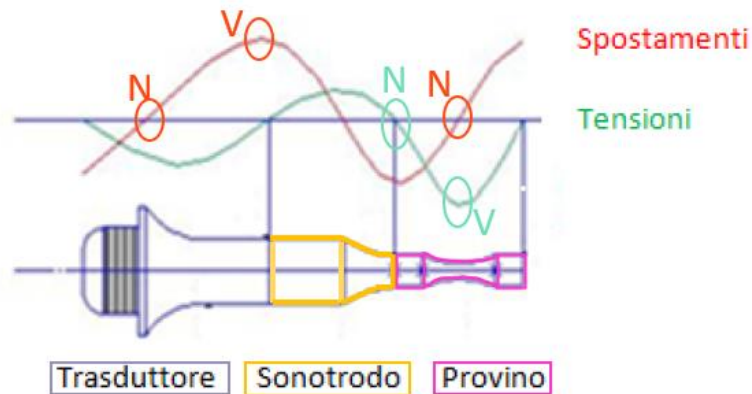


Figura 67: forme modali di spostamento (rosso) e tensione assiale (verde) con riportati i nodi (N) e i ventri (V) [35]

La forma modale dello spostamento è progettata con un nodo nel punto di contatto tra il sistema e la struttura portante (per garantire un fissaggio stabile senza trasmettere vibrazioni alla struttura), un ventre nel punto di contatto tra sonotrodo e trasduttore (per fornire al provino il massimo spostamento in ingresso) e un nodo nella sezione ristretta del provino. La forma modale del campo di tensioni assiali, invece, è progettata con un ventre nella sezione ristretta del provino, e un nodo nel punto di contatto tra sonotrodo e provino.

L'intero sistema è gestito attraverso un controllo chiuso di retroazione dello spostamento, realizzato con un sistema di triangolazione laser. Il segnale elettrico convertito in spostamento si propaga all'interno del sistema, e il laser monitora lo spostamento all'estremità del provino. La calibrazione tra la tensione elettrica in input e la deformazione del provino in output è stata eseguita con estensimetri.

Il generatore esegue automaticamente la ricerca della frequenza di risonanza del sistema composto da trasduttore-sonotrodo-provino. Una volta individuata la frequenza di lavoro durante il primo avvio, la ricerca automatica viene disattivata e il generatore mantiene costante la frequenza nei successivi cicli di accensione e spegnimento del trasduttore, necessari per il controllo della temperatura del provino. Infatti, durante i test a una frequenza così elevata (20 kHz), si evidenzia il problema del surriscaldamento del provino. La temperatura viene, infatti, attentamente monitorata da un sensore ad infrarossi. L'obiettivo è garantire che la temperatura rimanga costantemente all'interno di un range definito all'inizio del test. Per mitigare il surriscaldamento, è inoltre presente un sistema di raffreddamento ad aria compressa.

2) Setup

Dopo che il provino è stato attaccato al sonotrodo e l'adesivo è stato fatto indurire, si esegue il setup della macchina ultrasonica. Questo processo consiste in una serie di fasi finalizzate a garantire il corretto svolgimento del test. Inizialmente, si applica una vernice argentata sull'intera estremità del provino. Questo rende la superficie più luminosa, agevolando il laser nell'acquisire lo spostamento. Successivamente, la sezione centrale del provino viene colorata di nero, poiché sarà la zona di mira per il sensore di temperatura, e in questo caso è preferibile avere una superficie opaca e non riflettente. Tutto questo è visibile nella figura 68. Dopo queste operazioni, si fissa il sonotrodo al sistema di supporto e si stringono accuratamente tutte le viti per evitare vibrazioni indesiderate durante il test.

Successivamente, si regola il sistema laser affinché il segnale di luce si rifletta chiaramente sulla superficie della vernice.

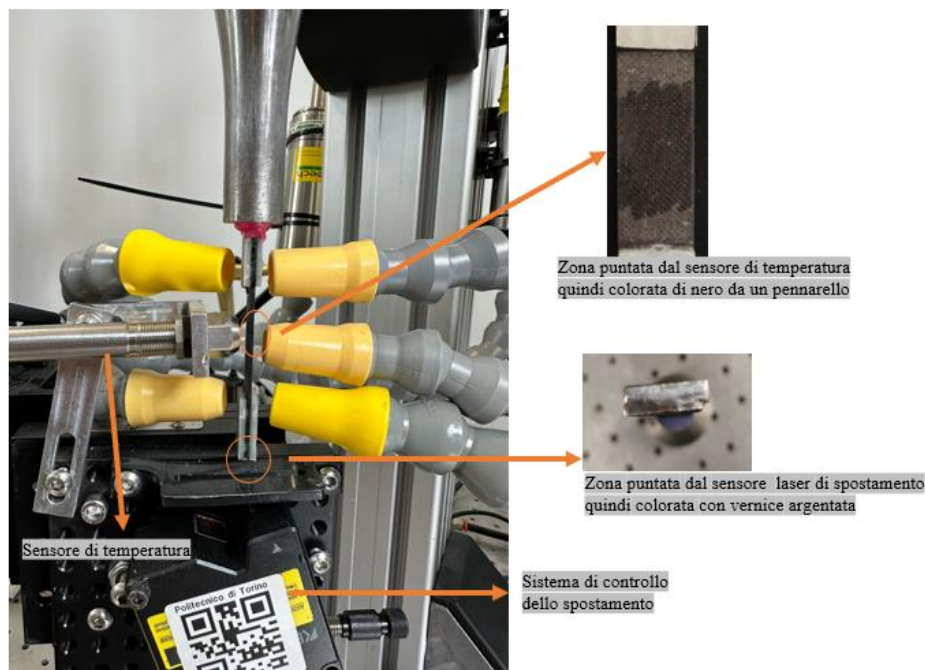


Figura 68: dettaglio di un provino incollato al sonotrodo

Si utilizza il programma *LK-Navigator* (fig.69A), dedicato alla gestione del laser. Si regola l'altezza del sistema laser in modo che possa rilevare con precisione uno spostamento che non oscilli eccessivamente. In caso contrario, durante il test potrebbe verificarsi una perdita del segnale, interrompendo la prova. Infine, si effettua la regolazione dei bracci del sistema di raffreddamento ad aria compressa, orientandoli verso le zone del provino soggette a un surriscaldamento maggiore.

3) Horn signature

Lo step successivo consiste nell'eseguire la Horn Signature (fig. 69B). Essa è una breve prova gestita da un algoritmo interno per verificare che l'intero sistema sonotrodo-provino vibri alla

frequenza di risonanza. Se la frequenza del sistema rientra nell'intervallo compreso tra 19500 Hz e 20500 Hz, allora il sistema si trova in risonanza e la prova può essere avviata.

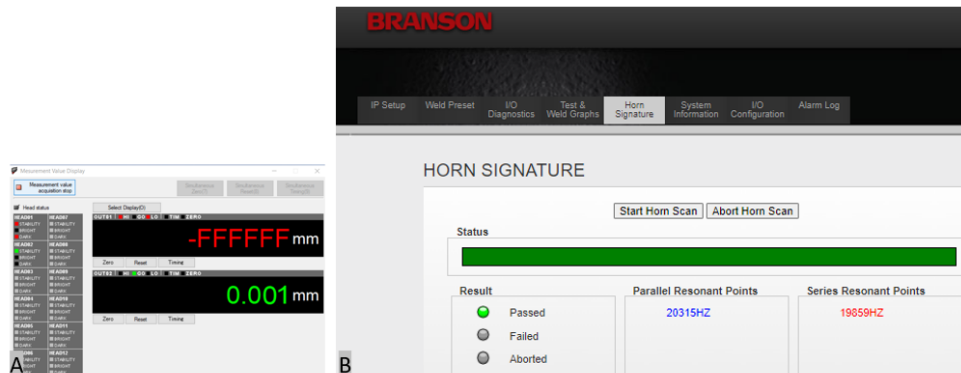


Figura 69: interfaccia del programma LK-Navigator(A)- interfaccia del sistema Branson per effettuare la Horn Signature(B).

4) Calibrazione

La calibrazione è essenziale per stabilire la relazione tra la tensione agente nel provino e lo spostamento all'estremo libero controllato dal sistema laser. Il primo passo consiste nell'ottenere la pendenza (*slope*), cioè il rapporto tra la tensione in MPa e la tensione elettrica in Volt. Questo valore viene derivato dall'analisi FEM, già validata nelle precedenti investigazioni (vedi Cap. 5). Dato che la tensione massima corrisponde a 10 V, nota la tensione massima nel provino secondo analisi FEM e supponendo il provino in campo lineare elastico per ogni livello di sollecitazione, è possibile determinare il rapporto fra tensione alterna e tensione elettrica applicata.

Ad un voltaggio in input, corrisponderà uno spostamento dell'estremo libero del provino. Durante la prova, lo spostamento dell'estremo libero del provino viene monitorato mediante laser. Ciò consente di realizzare un sistema di controllo ad anello chiuso, in quanto la tensione applicata al provino durante il test viene controllata misurando lo spostamento dell'estremo libero. A tal fine, è necessario determinare la relazione fra voltaggio elettrico e spostamento dell'estremo libero del provino.

Nell'immagine sottostante (fig. 70) è riportata l'interfaccia del file di calibrazione. La pendenza è situata nella parte inferiore, mentre i risultati della calibrazione si trovano nella parte superiore sotto forma di un diagramma stress-displacement, rappresentato da una retta che collega i punti ottenuti eccitando il sistema a 1,1V, 1,3V e 1,5V.

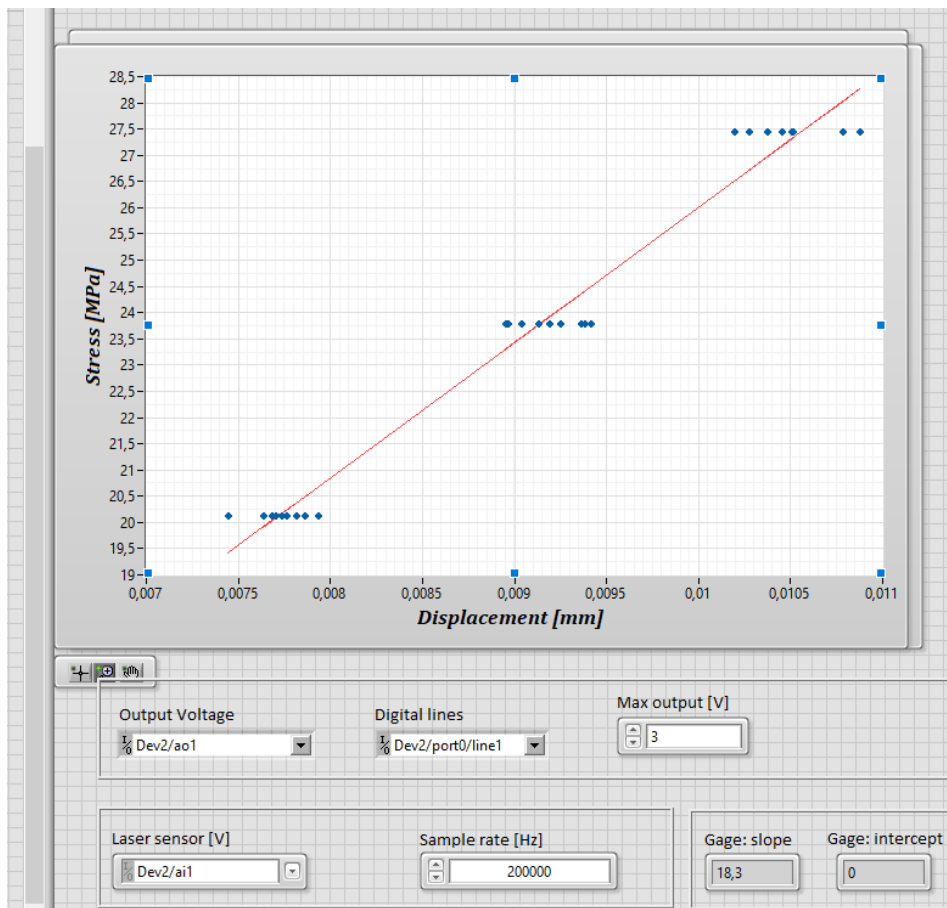


Figura 70:interfaccia del file di calibrazione. Viene cerchiata la "slope" stress-voltage

5) Avvio della prova

Il test vero e proprio inizia dopo aver completato le fasi precedentemente descritte. L'avvio della prova avviene attraverso l'interfaccia di *LabVIEW*, dove si imposta il valore di tensione in MPa desiderato per sollecitare il provino. Inoltre, si stabilisce un intervallo di valori accettabili per la temperatura, si definiscono i parametri del controllore PID e si inseriscono i dati ottenuti dalla calibrazione.

8.2 Metodi numerici

In questo paragrafo, verrà descritta la progettazione numerica dei provini. Una volta che si è esclusa la flessione fuori dal piano, e quella nel piano del provino hourglass, ed è stata confermata la presenza di tensioni di taglio, bisogna effettivamente comprendere se queste possano causare quelle rotture. Questo è stato fatto mediante due approcci: secondo il primo approccio, si è progettato un provino che non ha tensioni tangenziali (provino con tabs); nel secondo approccio è stato progettato e testato un provino che non risente delle tensioni tangenziali (provino con geometria hourglass e stacking sequence quasi-isotropa).

8.2.1 Provino con tabs

Il provino con tabs è un provino di materiale *XC110* di forma rettangolare. Su ciascuna estremità ci sono due tabs, incollati sul provino tramite un adesivo.

La progettazione è stata realizzata attraverso il software LS-Dyna per analisi agli elementi finiti. Dato che la macchina per le prove VHCF sfrutta la risonanza del sistema sonotrodo-provino, è stata eseguita un'analisi FEM modale. In questa analisi, si esplorano i modi di vibrare naturali del sistema e si determinano le rispettive frequenze associate. Il test effettuato nelle prove VHCF è di tipo assiale, perché il sistema viene sollecitato a trazione e a compressione; quindi, è stato esplorato il modo di vibrazione longitudinale.

La progettazione è stata condotta sotto alcuni vincoli specifici:

- Garantire una frequenza di risonanza nel modo longitudinale nel range 19500 Hz - 20500 Hz;
- Massimizzare il rapporto tra tensione massima e spostamento massimo;
- Evitare la prossimità con altri modi di vibrare;
- Minimizzare la tensione nell'adesivo.

La simulazione è avvenuta in modo implicito, utilizzando elementi di tipo *shell* per la barra di composito, ed elementi solidi per l'adesivo e i tabs.

La geometria è riportata in figura 71. Le proprietà dei materiali sono state inserite attraverso apposite card, utilizzando una formulazione di materiali ortotropi per la barra in CFRP e i tabs e una legge di materiale isotropo lineare elastico per l'adesivo.

Per quanto riguarda la barra in CFRP e tabs, le proprietà considerate includono E_x , E_y , ρ , ν_{xy} , G_{ab} e G_{bc} . E_x è stato ricavato dalla procedura IET, eccitando il modo longitudinale. E_y è stato posto uguale a E_x . La densità è stata ricavata tramite massa e volume, e il modulo di taglio tramite l'IET eccitando il modo torsionale. Siccome i tabs sono stati tagliati con una inclinazione di 45° , consentendo di ridurre la tensione nell'adesivo, è stata effettuata una rotazione dell'orientamento del materiale dei tabs, secondo la teoria classica della laminazione. Nel software, specifici campi possono essere compilati per specificare l'orientamento del materiale rispetto al sistema di riferimento globale del provino (in Fig. 71, il sistema X-Y-Z).

Per quanto riguarda gli adesivi, le proprietà considerate sono quelle riportate nel capitolo dei materiali.

La dimensione della mesh iniziale era di 1 mm, successivamente ridotta a 0,5 mm per una maggiore precisione nell'analisi.

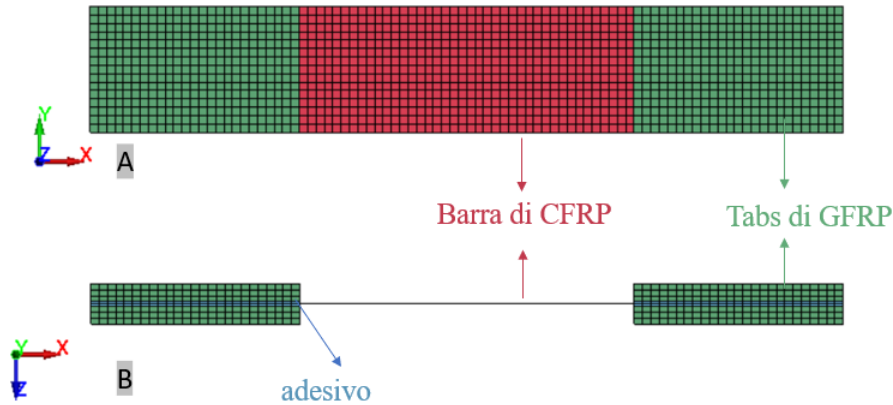


Figura 71: discretizzazione del primo provino. A: vista nel piano xy; B: vista nel piano xz

- **Analisi di sensibilità ai parametri**

Nel processo di progettazione del provino, sono stati eseguiti diversi tentativi, apportando modifiche, come la variazione della lunghezza del composito o la regolazione della lunghezza dei “tabs”, e così via. A questo scopo, è stata condotta un’analisi di sensibilità su questi parametri al fine di ottimizzare il processo di progettazione e comprendere come ciascun parametro di progettazione, come ad esempio la frequenza, possa essere influenzato dalle variazioni nella lunghezza del provino, sia essa un allungamento o un accorciamento, o da altre modifiche. Risulta interessante presentare i diagrammi ottenuti in questo contesto. Nella figura sottostante (fig. 72) ci sono quattro diagrammi:

Figura 72 A: Questa rappresentazione illustra come la frequenza del modo di vibrare longitudinale sia significativamente influenzata dalla lunghezza del provino. In particolare, si osserva che un aumento della lunghezza del provino corrisponde a una diminuzione della frequenza.

Figura 72 B: In questa visualizzazione viene evidenziato come la tensione massima nel provino subisca variazioni, in particolare una diminuzione, all’aumentare della lunghezza del provino.

Figura 72 C: Da questa rappresentazione emerge che un aumento della lunghezza del provino comporta una riduzione della tensione nell’adesivo.

Figura 72 D: Questa figura indica che allontanare i tabs produce una diminuzione della tensione massima nell’adesivo.

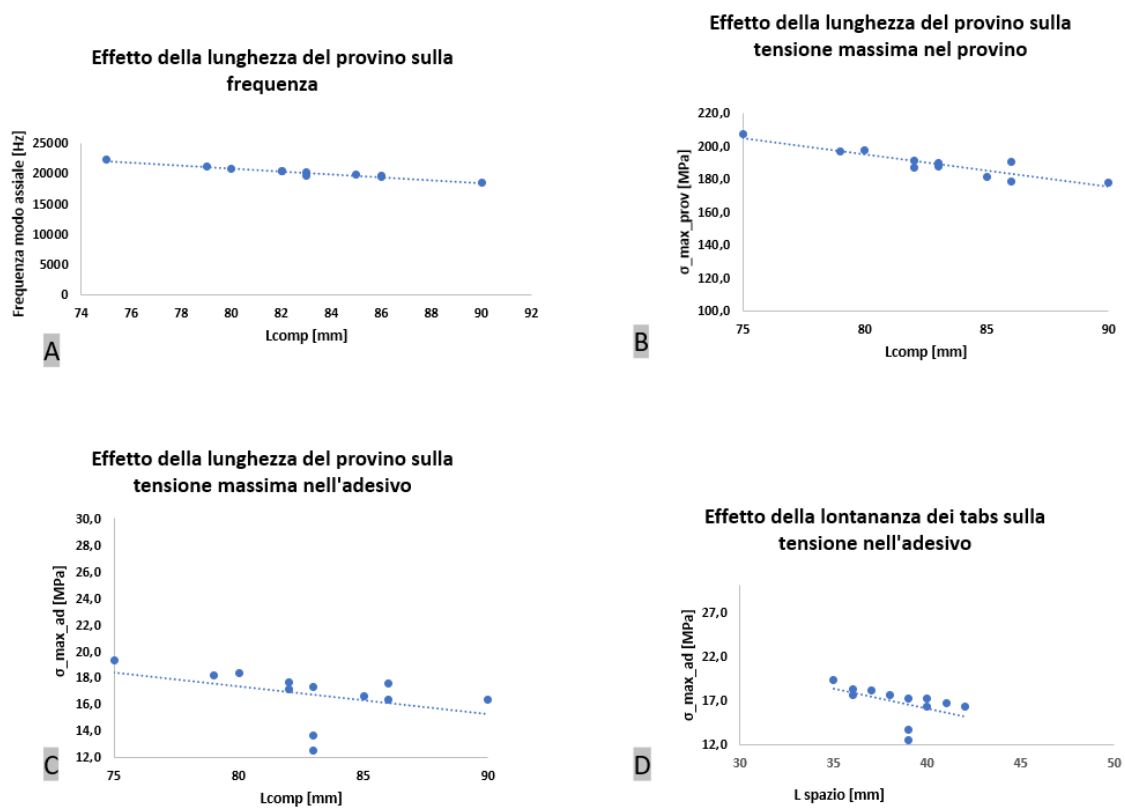


Figura 72: effetto della lunghezza del provino (L_{comp}) sulla frequenza (A), sulla tensione massima del provino (B), sulla tensione massima nell'adesivo (C) ed effetto della lontananza dei tabs sulla tensione nell'adesivo (D)

Considerando quanto detto, il primo provino con tabs progettato che riesce a garantire il soddisfacimento di tutti i vincoli presenta le seguenti caratteristiche (tabella 25):

Tabella 25: caratteristiche del primo provino con tabs progettato

Lunghezza totale	83 mm
Lunghezza dei tabs	22 mm
Lunghezza dello spazio tra i tabs	39 mm
Frequenza del modo longitudinale	19733 Hz
σ_{max} provino	189,5 MPa
σ_{max} adesivo	12,6 MPa
Spostamento massimo	4,22 mm
$\frac{\sigma_{max} \text{ adesivo}}{\sigma_{max} \text{ provino}}$	6,63 %

L'immagine sottostante (fig.73) mostra l'andamento della tensione lungo x in tutto il provino, in alto, e in basso mostra la tensione di Von Mises del solo adesivo, mostrando che le tensioni più alte si registrano in corrispondenza del cambio di spessore. Si può notare che i valori massimi non sono quelli riportati in tabella 25. Questo è dovuto al fatto che nella simulazione i valori sono relativi alla tensione di 10 V, a cui corrisponde uno spostamento iniziale di 0,085 mm. Il sistema sfrutta infatti una catena cinematica che parte dal trasduttore piezoelettrico e amplifica le oscillazioni meccaniche, fino ad ottenere uno spostamento massimo in ingresso al provino di 0.085 mm. Per calcolare i valori relativi al provino bisogna usare la seguente proporzione:

$$\sigma_{max FEM} : \sigma_{max provino} = spostamento_{max FEM} : 0.085mm$$

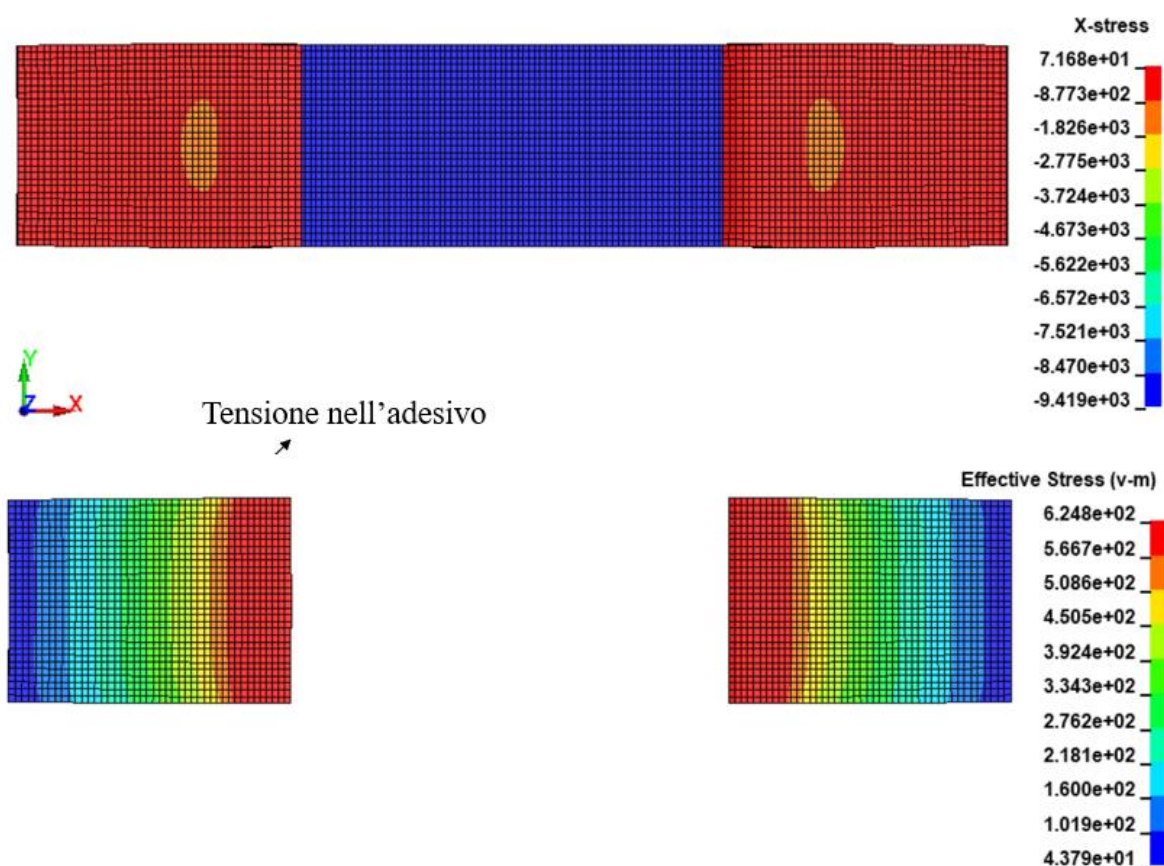


Figura 73: andamento della tensione lungo x nel provino con i tabs progettato

Questa progettazione si riferisce alla famiglia 1 dei provini con tabs, ovvero provini in CFRP con tabs in GFRP, uniti dall'adesivo SikaPower (le cui proprietà sono nella tabella 22). La progettazione è stata analoga anche nel caso delle altre famiglie, ma ovviamente per ogni famiglia sono state considerate le proprietà dell'adesivo corrispondente.

8.2.2 Provino “smooth hourglass”

E' stato progettato anche un provino di geometria hourglass, caratterizzato da una curvatura più lieve, tale da essere considerato come intermedio tra provino con tabs e provino hourglass.

I vincoli progettuali sono stati essenzialmente gli stessi del caso del provino con tabs, tranne per il fatto che il provino hourglass non ha i tabs e quindi non emerge la problematica di minimizzare la tensione nell'adesivo. Al contrario, l'hourglass presenta tensioni tangenziali non trascurabili e perciò da minimizzare. I vincoli sono:

- Garantire una frequenza di risonanza nel modo longitudinale nel range 19500 Hz -20500 Hz;
- Massimizzare il rapporto tra tensione massima e spostamento massimo;
- Evitare la prossimità con altri modi di vibrare;
- Minimizzare le tensioni tangenziali.

Data una geometria hourglass, possiamo identificare le seguenti dimensioni (fig.74):

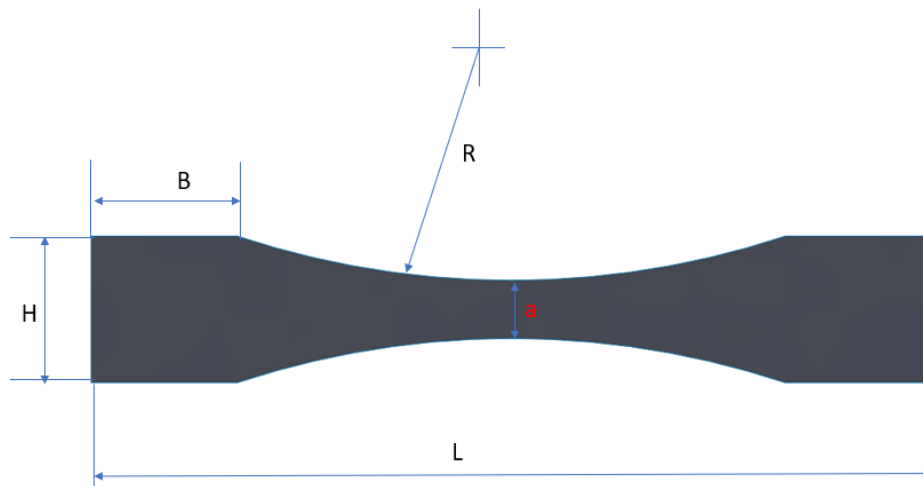


Figura 74: grandezze di riferimento di un provino di geometria hourglass

-Effetto di a (a parità delle altre dimensioni)

Osservando l'immagine 75 emerge che la sezione ristretta ha un grande effetto. La sua diminuzione causa un abbassamento della frequenza ma un aumento sia della tensione assiale massima che della tensione tangenziale massima.

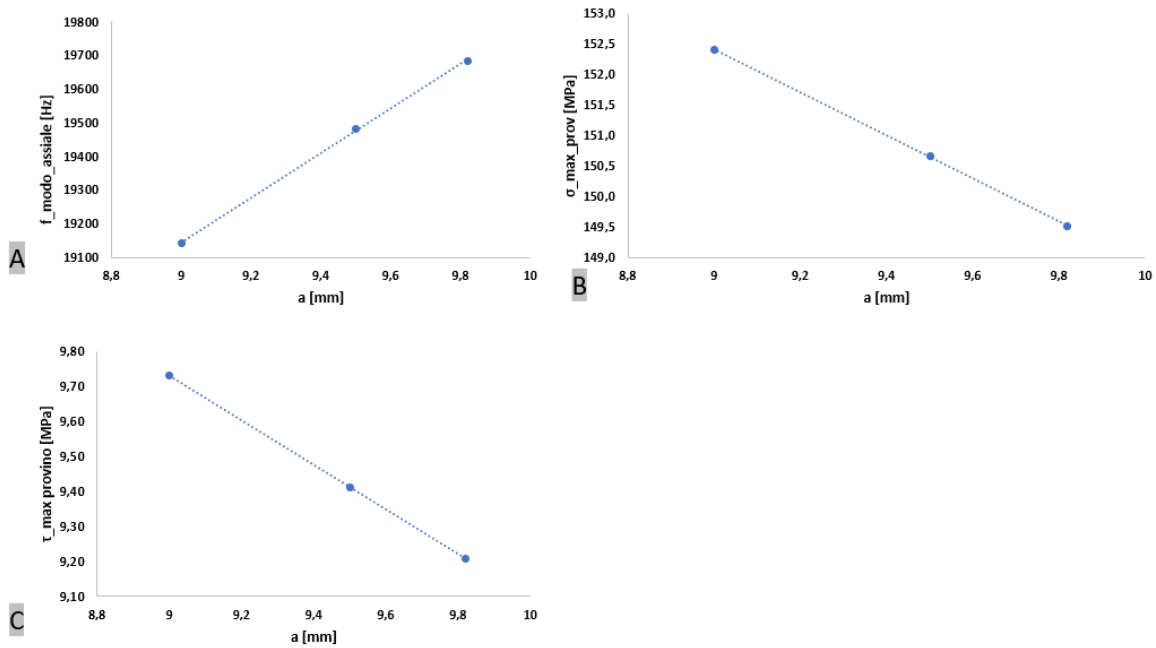


Figura 75: effetto della sezione minore dell'hourglass su frequenza (A), tensione assiale massima nel provino (B) e tensione tangenziale massima nel provino (C)

-Effetto di L (a parità delle altre dimensioni)

Dalla figura 76 si evince che aumentare la lunghezza dell'hourglass è benefico per le tensioni perché le fa diminuire, ma fa abbassare la frequenza.



Figura 76: effetto della lunghezza dell'hourglass su frequenza del modo longitudinale (A), tensione assiale massima nel provino (B) e tensione tangenziale massima nel provino (C)

- Effetto di B (a parità delle altre dimensioni)

L'aumento di B invece comporta una diminuzione della frequenza, e un aumento delle due tensioni (assiale e tangenziale). Questo è visibile dalla figura 77.

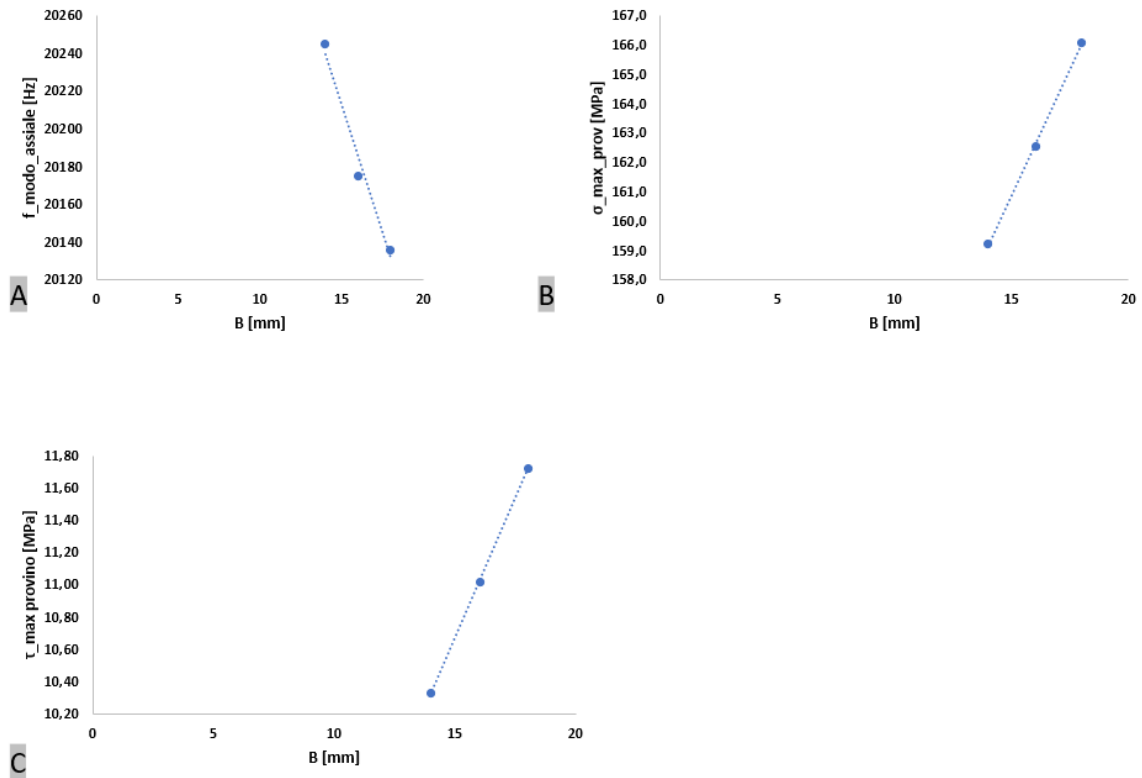


Figura 77: effetto di B sulla frequenza del modo longitudinale (A), tensione assiale massima nel provino (B) e tensione tangenziale massima nel provino (C)

Il provino progettato ha le seguenti caratteristiche (tabella 26):

Tabella 26: caratteristiche del provino smooth hourglass progettato

L	140 mm
B	17 mm
H	20 mm
a	14 mm
Frequenza del modo longitudinale	20383 Hz
σ_x max	128,17 MPa
τ_{xy} max	15,5 MPa
Spostamento massimo	5,4 mm
$\frac{\tau \max}{\sigma \max}$	4 %

Esso è caratterizzato da un ancora più piccolo rapporto tra la tensione tangenziale massima e quella assiale massima rispetto al caso del provino hourglass, in cui comunque era basso.

La figura 78 mostra l'andamento della tensione assiale, in alto, e quello della tensione tangenziale, in basso.

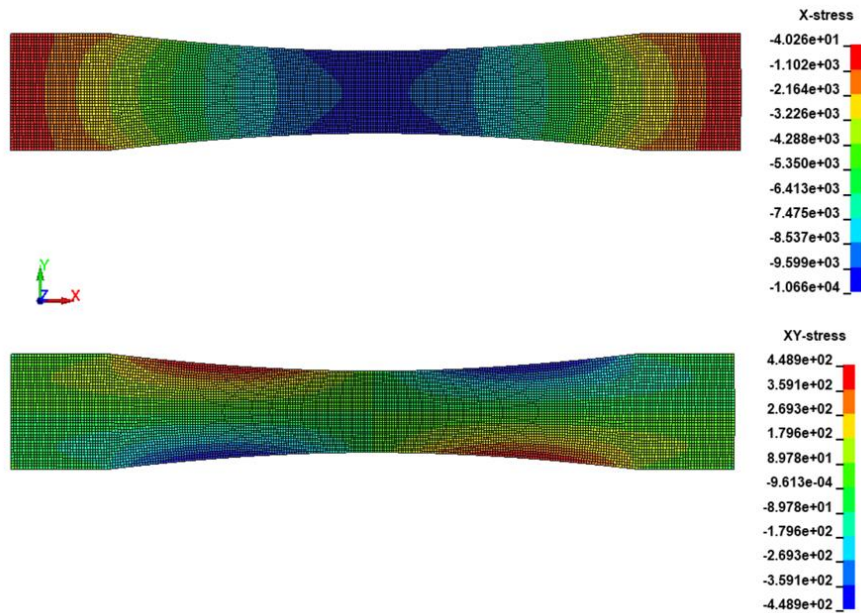


Figura 78: andamento della tensione assiale e della tensione tangenziale nel provino smooth hourglass progettato

8.2.3 Analisi di buckling

Il provino hourglass, in fase di progettazione numerica, è stato sottoposto anche a un'analisi di *buckling*. Il *buckling* si verifica quando un elemento sottoposto a una compressione assiale, perde la sua capacità di supportare il carico e curva lateralmente, improvvisamente. Questa analisi è di fondamentale importanza nell'ingegneria perché il buckling può causare cedimenti improvvisi e catastrofici se non opportunamente considerato. Tenendo conto delle rotture evidenziate nel provino hourglass, discusse nel capitolo 5, diventa fondamentale integrare questa analisi nella fase di progettazione dei provini.

Essa è stata condotta sul software LS-Dyna; la mesh considerata è identica a quella impiegata nell'analisi FEM modale, usata in precedenza. È stata realizzata su *Hypermesh*, importata su LS-Dyna, e sono state poi inserite le *card* relative all'analisi di buckling. Il modo di vibrare è tale per cui assialmente, al centro, il provino non vibra, invece alle estremità si sposta. Di conseguenza al centro si inserisce un vincolo, creando un *node-set*, con cui si impedisce lo spostamento lungo x. Poi si creano due nuovi *node-set*, uno per estremità, per i quali si vincolano tutti i gradi di libertà tranne lo spostamento lungo x, perché il moto è trasferito dal sonotrodo proprio in direzione x. In questo modo si impone il modo di vibrare assiale.

Una rappresentazione dei tre set di nodi creati è riportata nell'immagine seguente (fig. 79).

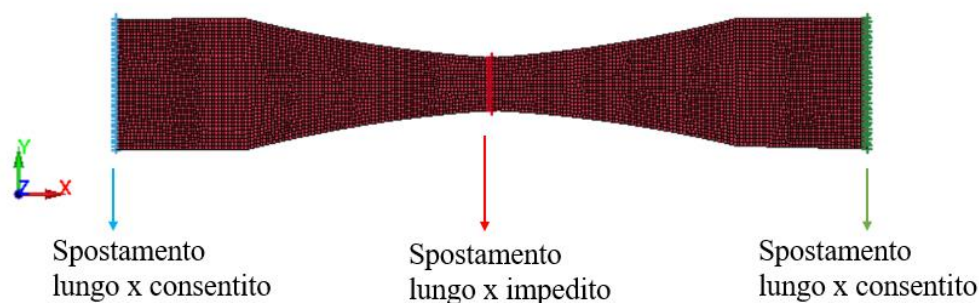


Figura 79: provino hourglass con i *node-set* evidenziati

A entrambi i set di nodi delle estremità, si dà una legge di spostamento, tramite la *card* "prescribed motion". Si crea una curva di spostamento in cui si specifica quanto spostamento dare. Ci si mette in condizioni di σ_{max} , ricavato dall'analisi modale. A questa σ_{max} corrisponde, come sappiamo, uno spostamento massimo di 0.085 mm. L'obiettivo è vedere se, applicando lo spostamento massimo, si ha buckling oppure no.

L'output dell'analisi di buckling è il "load factor". Quando questo è maggiore di 1, vuol dire che ci si trova sopra il carico critico: L'obiettivo è quindi avere un *load factor* sempre maggiore di 1. In particolare, si vuole, con lo spostamento massimo di 0,085 mm ottenere un fattore maggiore di uno, il quale dà sicurezza del fatto che in tutto il campo di applicazione di tensioni, il provino non vada in buckling. Se si salisse col carico si verificherebbe il buckling e il provino si romperebbe in maniera prematura.

L'analisi di buckling eseguita per il provino hourglass ha indicato che il provino va in buckling a 160 MPa.

8.2.4 Provino quasi isotropo

In questa sezione verrà descritto come è stato progettato il provino hourglass con stacking sequence $[0/90/45/-45]_s$. Esso è costituito da otto layer con orientazione, dal basso verso l'alto, di 0° , 90° , 45° , -45° , -45° , 45° , 90° , 0° . La progettazione è avvenuta su Ls-Dyna ma ha seguito una procedura più complicata rispetto ai casi precedenti. Questo perché, nei casi precedenti i layer avevano tutti lo stesso orientamento e quindi le proprietà sono state definite all'interno di un'unica sezione nel software, e senza essere trasformate da un sistema di riferimento locale a quello globale. In questo caso invece, poiché la card del materiale non accetta un angolo, bisogna inserire le proprietà già calcolate in quel sistema di riferimento. Di conseguenza sono state create due sezioni separate, una, "materiale 1", che contiene le proprietà dei layer a 0° (e quindi anche di quelli a 90°), un'altra, "materiale 2", che contiene le proprietà dei layer a 45° (e quindi anche di quelli a -45°). Questo è possibile vederlo nell'immagine sottostante (fig. 80).

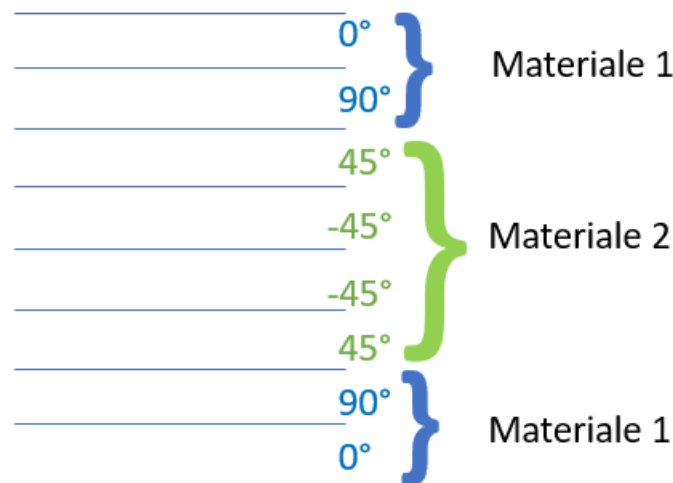


Figura 80: schematizzazione degli otto layer nel provino quasi isotropo, con specificati i materiali 1 e 2

Le proprietà del "materiale 1", che ha formulazione ortotropica, sono quelle utilizzate nei provini discussi fino ad ora (fig. 81).

```

*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC
$# mid ro ea eb ec prba prca prcb
| 11.47480E-9 59300.0 59300.0 9000.0 0.1 0.06 0.06
$# gab gbc gca aopt g sigf
| 4200.0 3100.0 3100.0 2.0 0.0 0.0
$# xp yp zp a1 a2 a3 macf ihis
| 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 1 0
$# v1 v2 v3 d1 d2 d3 beta ref
| 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

```

Figura 81: material card del materiale 1 nel provino quasi isotropo

Per calcolare le proprietà del materiale 2, invece, si parte dai valori a 0°. Questi sono riassumibili nella tabella 27.

Tabella 27: proprietà dei layer a 0°

E_a	59300 MPa
E_b	59300 MPa
E_c	9000 MPa
ν_{ab}	0,1
ν_{bc}	0,06
ν_{ac}	0,06
G_{ab}	4200 MPa
G_{bc}	3100 MPa
G_{ac}	3100 MPa

Sappiamo che, nella formulazione ortotropa, la relazione tra deformazioni e tensioni è la seguente [5]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & \frac{-\nu_{ab}}{E_a} & \frac{-\nu_{ac}}{E_a} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{ba}}{E_b} & \frac{1}{E_b} & \frac{-\nu_{bc}}{E_b} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{ca}}{E_c} & \frac{-\nu_{cb}}{E_c} & \frac{1}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{bc}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ac}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ab}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}$$

Questa relazione può essere espressa in forma sintetica come:

$$\{\varepsilon\} = [S] \{\sigma\}$$

Dove

ε è il vettore delle deformazioni;

σ è il vettore delle tensioni.

Adesso bisogna passare dal sistema di riferimento attuale a quello ruotato. Per farlo si applica questa relazione:

$$[S'] = [R]^T [S] [R]$$

Dove R è la matrice di rotazione, la cui espressione è mostrata nella figura 82.

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 0 & 0 & 0 & \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 0 & 0 & 0 & -\sin 2\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

Figura 82: tensore di rotazione

S' è la matrice nel nuovo sistema di riferimento ruotato, e da cui calcoliamo le proprietà relative ai layer a 45°. Queste, a valle di tutti i calcoli, sono (tabella 28):

Tabella 28: proprietà dei layer a 45°

E _a	14900 MPa
E _b	14900 MPa
E _c	9000 MPa
v _{ab}	0,77
v _{bc}	0,015
v _{ac}	0,015
G _{ab}	26955 MPa
G _{bc}	3100 MPa
G _{ac}	3100 MPa

A questo punto quindi, si inseriscono all'interno della card relativa al "materiale 2" (fig. 83).

```
*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC
$# mid ro ea eb ec prba prca prcb
    21.47480E-9 14900.0 14900.0 9000.0 0.77 0.015 0.015
$# gab gbc gca aopt g sigf
    26955.0 3100.0 3100.0 2.0 0.0 0.0
$# xp yp zp a1 a2 a3 macf ihis
    0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 1 0
$# v1 v2 v3 d1 d2 d3 beta ref
    0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
```

Figura 83: material card del materiale 2 nel provino quasi isotropo

Per il resto, la progettazione è stata analoga a quella condotta per lo smooth hourglass.

Inoltre, in questo contesto, dato che la necessità di progettare un provino quasi isotropo deriva dall'obiettivo di analizzare gli effetti delle tensioni tangenziali, si è cercato di lasciare la parte curva identica a quella dell'hourglass, intervenendo solo sulla parte rettilinea, nei limiti degli altri vincoli presenti (quello della frequenza è il più stringente). Questo approccio consente di effettuare un confronto mantenendo costante la geometria (la parte rettilinea non è soggetta a tensioni tangenziali), consentendo così di valutare esclusivamente gli effetti della nuova stacking sequence ([0/90/45/-45]_s).

Da questa ne consegue che il provino hourglass quasi isotropo progettato ha le seguenti dimensioni nominali (tabella 29):

Tabella 29: dimensioni nominali dell'hourglass quasi isotropo

L	94 mm
B	18 mm
H	16 mm
a	5 mm

Dall'immagine 84 si possono vedere i due provini a confronto, con le dimensioni a confronto. Notare che il raggio di curvatura è uguale e la dimensione della sezione ristretta pressoché la stessa.

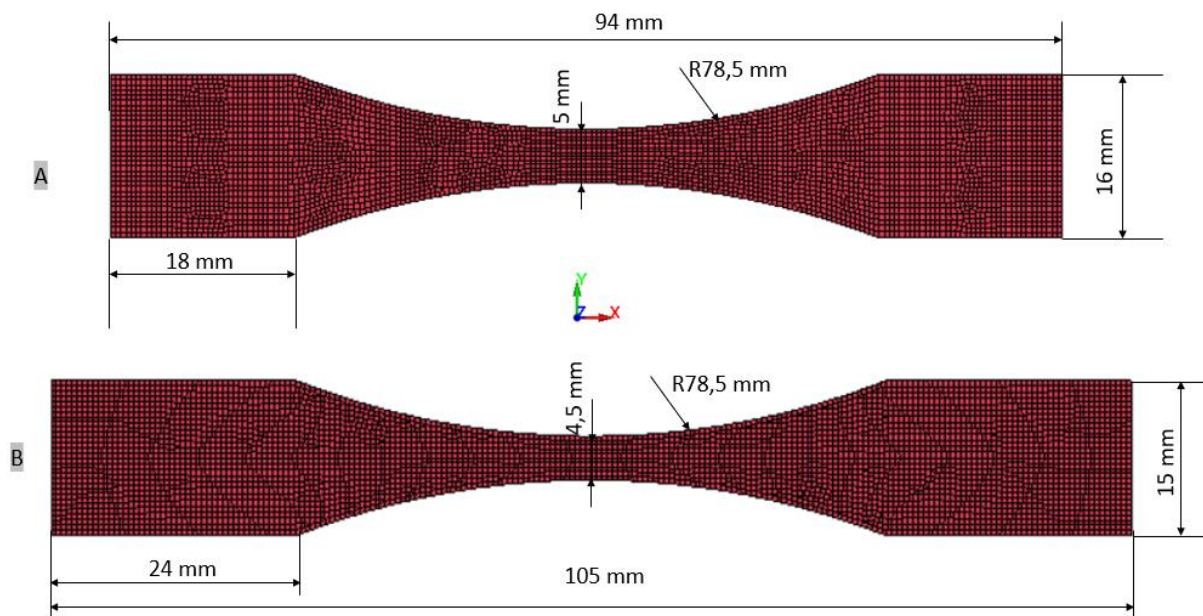


Figura 84: confronto tra la geometria dell'hourglass quasi isotropo (A) e geometria dell'hourglass (B)

Il provino, dopo la progettazione, è stato realizzato. Le dimensioni reali, a valle del taglio della Water Jet sono risultate diverse da quelle nominali. Esse sono (tabella 30):

Tabella 30: dimensioni reali dell'hourglass quasi isotropo

L	93,6 mm
B	18,2 mm
H	16 mm
a	5,28 mm

Ne consegue una frequenza del modo di vibrare longitudinale di 20709 Hz, leggermente più elevata del limite massimo consentito, ma che col sonotrodo è diventata accettabile (minore di 20500 Hz).

9. Risultati

In questo capitolo sono presentati tutti i risultati ottenuti e gli accorgimenti adottati, derivanti dai test a ultrasuoni, condotti sui provini realizzati. Risulta pertanto più chiaro suddividere questo capitolo in due sezioni distinte: “Risultati e considerazioni per i provini con tabs” e “Risultati e considerazioni per i provini quasi isotropi”.

9.1 Risultati e considerazioni per i provini con tabs

- **FAMIGLIA 1**

In questa sezione si preferisce usare una rappresentazione tabellare che indichi il tipo di adesivo impiegato, il tipo e la superficie di incollaggio, la tensione nominale del test, il numero di cicli realizzati fino a rottura e altre informazioni.

Tabella 31: resoconto dei test condotti sulla famiglia 1

Nomenclatura provino	Frequenza di risonanza [Hz]	Adesivo impiegato	Superficie di applicazione dell'adesivo	Tipo di superficie tab/provino a contatto	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rottura
1	19700	SikaPower®-1277	tabs	Liscio-liscio e liscio ruvido	90	0	Due tabs lato liscio-liscio (rottura adesiva)
2	20152	SikaPower®-1277	tabs	Liscio-liscio e liscio ruvido	90	2520	Due tabs lato liscio-liscio (rottura adesiva)
3	19838	SikaPower®-1277	tabs e provino	Tabs incollati dalla parte ruvida	90	6480	Due tabs lato ruvido ruvido (rottura mista)
3'	20052	SikaPower®-1277	tabs e provino	Ruvido liscio ovunque	90	0	Un tab lato rugoso-liscio (rottura mista)

La prima prova è stata quella relativa al provino "1". Inizialmente, è stata eseguita la tecnica IET (Impulse Excitation Technique) del provino per verificarne la risonanza dopo la procedura di realizzazione. Si è confermato che il provino era in risonanza con una frequenza compresa

nel range consentito. In questo provino, l'adesivo è stato applicato esclusivamente sui tabs, poiché studi precedenti suggerivano che fosse la procedura corretta. Applicando l'adesivo solo da un lato si otteneva uno spessore minimo, presumibilmente garantendo un'ottimale adesione. Considerando che le piastre, sia di CFRP che di GFRP, presentano un lato ruvido (dovuto al peel-ply) e uno liscio, i quattro tabs sono stati incollati sul loro lato liscio. La prova è stata avviata a 90 MPa, con l'aspettativa che, dopo un elevato numero di cicli (dato che l'ambito di studio è la VHCF), si sarebbe rotto il provino. L'obiettivo successivo era confrontare la posizione di rottura di questo provino (senza tensioni tangenziali) con quella dei provini hourglass (dove sono presenti tensioni tangenziali). Tuttavia, il risultato della prova ha sorpreso: immediatamente dopo l'avvio della prova, due tabs si sono staccati.

Questa situazione è comunemente conosciuta in inglese come "tab failure" [1], che si traduce in italiano come "rottura dei tabs". Tuttavia, va sottolineato che questa rottura non è considerata consentita, poiché le rotture ammesse sono riferite al provino nel suo complesso, non ai singoli tabs.

Poiché il problema si era verificato una sola volta, si è scelto di ripetere il test con le stesse modalità per il provino "2", al fine di determinare se quanto accaduto con il provino "1" fosse un evento accidentale o ripetitivo. Il risultato è stato simile, poiché anche per il provino "2" la prova si è interrotta presto a causa della rottura di due tabs (fig. 85 A).

Sembrava quindi che il problema fosse ricorrente. Inizialmente, si è ipotizzato che il surriscaldamento del provino durante la prova potesse essere la causa, ma, analizzando le superfici di rottura, è emerso che il problema potesse essere più legato a un difetto di incollaggio, in quanto la rottura era di tipo adesivo e non coesivo. Si è quindi deciso di apportare una modifica per il provino "3", incollando i tabs dalla loro parte ruvida, e mettendo l'adesivo non solo sui tabs ma anche sul provino, supponendo che questo potesse migliorare la presa e l'adesione. Sebbene il numero di cicli raggiunti (a parità di tensione nominale) sia stato maggiore rispetto ai casi precedenti, rimaneva comunque molto limitato (6480 cicli). Inoltre, la prova si è interrotta nuovamente a causa del distacco dei tabs, non della rottura del provino (fig. 85 B).

La buona notizia è che la superficie di rottura presentava caratteristiche miste tra rottura adesiva e rottura coesiva, indicando che si stava progredendo nella giusta direzione: l'adesione era sicuramente migliorata incollando il tab dalla parte ruvida. Tuttavia, si è notato che il distacco si è verificato nella zona di contatto tra due superfici ruvide. Si ipotizza che potrebbe essersi accumulata troppa aria nel contatto, causando difetti nell'adesivo. Pertanto, per il provino "3", si è modificato il processo di incollaggio, in modo che il contatto fosse sempre tra una superficie liscia e una superficie ruvida. Purtroppo, anche in questo caso, la prova si è interrotta immediatamente a causa del distacco di un tab (fig. 85 C).

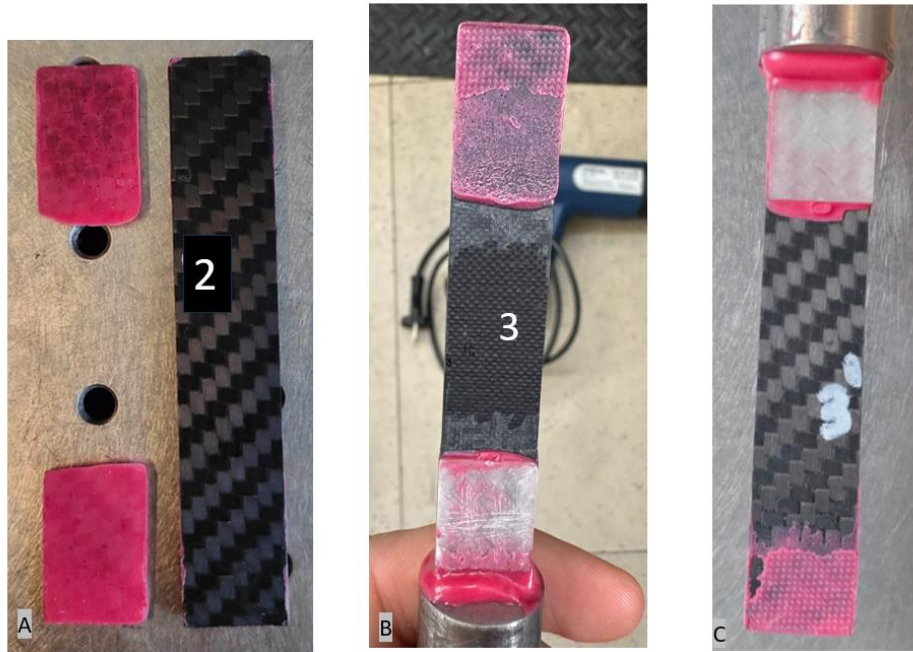


Figura 85: rottura dei tabs nei provini 2(A); 3 (B); 3' (C)

Quindi, per affrontare il problema, la decisione successiva è stata quella di utilizzare un diverso tipo di adesivo per incollare i tabs, e qui entra in gioco la famiglia 2.

- **FAMIGLIA 2**

Nella famiglia 2, la scelta è caduta sull'utilizzo della resina IN2 Epoxy Infusion Resin come adesivo. Dato che il problema della "tab failure" è emerso come ricorrente, si è optato per un approccio di studio simultaneo di diversi casi all'interno della stessa famiglia. Di conseguenza, la famiglia 2 è stata suddivisa ulteriormente nelle famiglie A, B, C e D, ognuna delle quali presenta caratteristiche specifiche, come dettagliato nel paragrafo dedicato.

Per una visione più immediata e comparativa dei vari casi, si è scelto di utilizzare una tabella (tabella 32).

Tabella 32: resoconto dei test condotti sulla famiglia A

Nomenclatura provino	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rottura
1 A	Loctite HY 4070	20391	0,2	2	90	6219	1 tab, parte ruvida del composito
2 A	Loctite HY 4070	20794	0,2	2	90	12	2 tabs, parte liscia del composito
3 A	Loctite HY 4070	20241	0,2	2	90	60477	1 tab, parte liscia del composito
4 A	SikaPower®-1277	20718	0,2	2	90	26	1 tab, parte liscia del composito
5 A	SikaPower®-1277	20729	0,2	2	70	74000	1 tab, parte liscia del composito

Come si evince dalla tabella 32, sono presenti colonne aggiuntive e colonne eliminate rispetto alla tabella 31. Ciò è dovuto al fatto che, da questa famiglia in poi, si è deciso di applicare costantemente i tabs in modo che il contatto avvenisse sempre tra una superficie liscia e una superficie ruvida. Questa scelta si basa sull'esperienza acquisita dalla famiglia precedente, dove si è compreso che tale approccio è benefico, rendendo superfluo specificare nuovamente questa modalità.

Le colonne aggiuntive, invece, riguardano dei tempi. Questo perché, a partire da questo momento, si è optato per l'adozione della tecnica del "*pulse & pause*" [15,16] Questa strategia è utilizzata per prevenire il surriscaldamento eccessivo dei provini durante i test di fatica VHCF. La tecnica prevede l'applicazione ciclica di carichi pulsati seguiti da pause durante il test, permettendo al materiale di raffreddarsi tra i singoli caricamenti.

Nei cicli ad alta frequenza tipici della fatica VHCF, i materiali possono surriscaldarsi a causa delle deformazioni cicliche. La tecnica "*pulse & pause*" affronta questo problema introducendo pause tra i cicli di carico: Durante la fase di "*pulse*", si applica il carico ciclico, mentre durante la fase di "*pause*", il carico viene interrotto, consentendo al materiale di dissipare il calore accumulato e di tornare a una temperatura più bassa. Questo ciclo di carico e pausa viene ripetuto nel corso del test, riducendo così il rischio di surriscaldamento.

Di conseguenza, prima di avviare i test, è stato condotto uno studio su un provino in CFRP realizzato in un'attività precedente. L'obiettivo era comprendere i tempi ideali di "*pulse*" e "*pause*" per le frequenze coinvolte (20 kHz). Questo studio aveva lo scopo di trovare un

compromesso tra la sollecitazione applicata e il raffreddamento del provino. In altre parole, si cercava di determinare il tempo di "pulse" e il tempo di "pause" ottimali per garantire che il provino avesse il tempo di sperimentare la sollecitazione imposta durante il test e, allo stesso tempo, avesse il tempo necessario per raffreddarsi tra un caricamento e il successivo.

Sono state eseguite prove pratiche applicando estensimetri sulla barra e variando i tempi di "pulse" e "pause". I risultati ottenuti sono stati confrontati. Dopo l'analisi, è emerso che il tempo ottimale per la fase di "pulse" è di 0,2 secondi, mentre il tempo ottimale per la fase di "pause" è di 2 secondi, tempi non nuovi perché anche nella letteratura scientifica i valori sono pressoché uguali. Un esempio di grafico ottenuto in queste prove è presente nell'immagine 86.

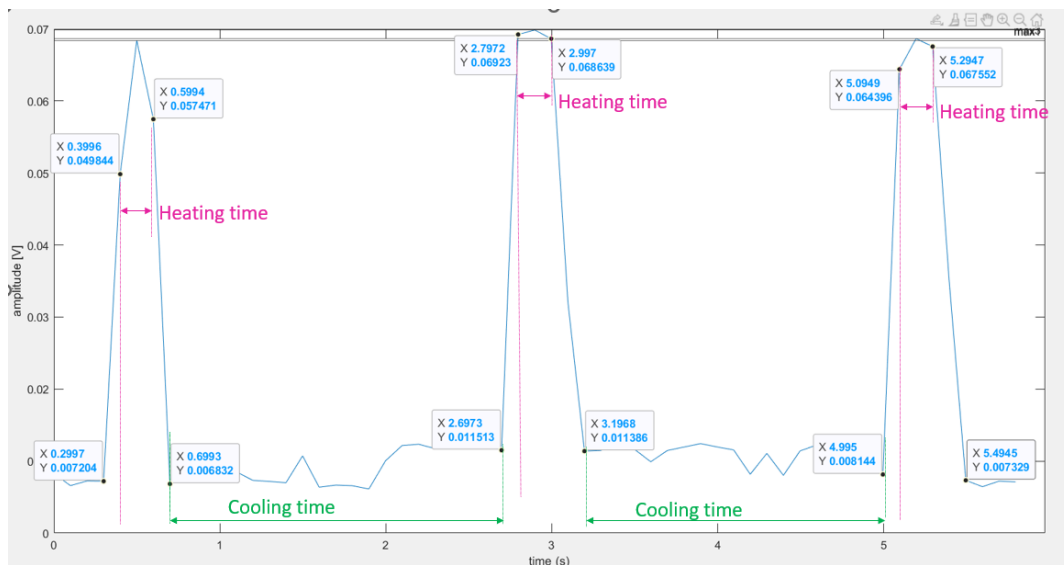


Figura 86: esempio di una delle prove condotte con gli estensimetri per identificare il tempo di "pulse" (heating time) e il livello di "pause" (cooling time) ottimali

Riguardo alla famiglia A, è stata adottata la tecnica del *pulse & pause* in cui i tempi sono fissati, per garantire un'uniformità e controllo sui tempi di applicazione della vibrazione. Nella precedente configurazione, invece, la temperatura del provino veniva monitorata mediante un sensore di temperatura agli infrarossi. Se la temperatura del provino supera un limite imposto dall'utente a causa del riscaldamento indotto dalla deformazione meccanica e dalla vibrazione, il test viene arrestato e non riprende fino a che la temperatura non scende sotto un altro valore imposto dall'utente. Il monitoraggio della temperatura richiede tempi di elaborazione anche di alcuni secondi, il che determina i) delle disuniformità nei tempi di applicazione del carico; 2) tempi che possono essere eccessivamente prolungati per gli adesivi, la cui resistenza meccanica è particolarmente sensibile alle variazioni di temperatura.

A questo scopo, si è deciso poi di eseguire la calibrazione prima e la prova successivamente, utilizzando tre getti di aria compressa. Due di questi erano diretti verso l'adesivo tra il provino e il sonotrodo, mentre uno puntava al centro del provino, sottoposto a tensioni maggiori. Questa strategia mirava a mitigare il surriscaldamento del provino, garantendo un adeguato raffreddamento tra le fasi di carico.

Tuttavia, come evidenziato dalla tabella 34, i risultati non sono migliorati; i tabs si sono staccati in ogni caso e il provino non si è mai rotto. Il numero di cicli raggiunto, con una tensione massima nominale di 90 MPa, non ha mai superato i 10^5 cicli. Anche cambiando l'adesivo utilizzato per incollare il provino al sonotrodo, impiegando la *Loctite* (nei provini 1 A, 2 A e 3 A), non sono stati ottenuti risultati accettabili. La figura 88 illustra il distacco dei tabs nei provini 1 A (fig. 87 A), 2 A (fig. 87 B), 4 A (fig. 87 C) e 5 A (fig. 87 D). Le superfici di rottura, possiamo notare, continuano a presentare caratteristiche miste (adesive-coesive), tranne per il provino 4 A (fig. 87 C) la cui superficie è totalmente adesiva.

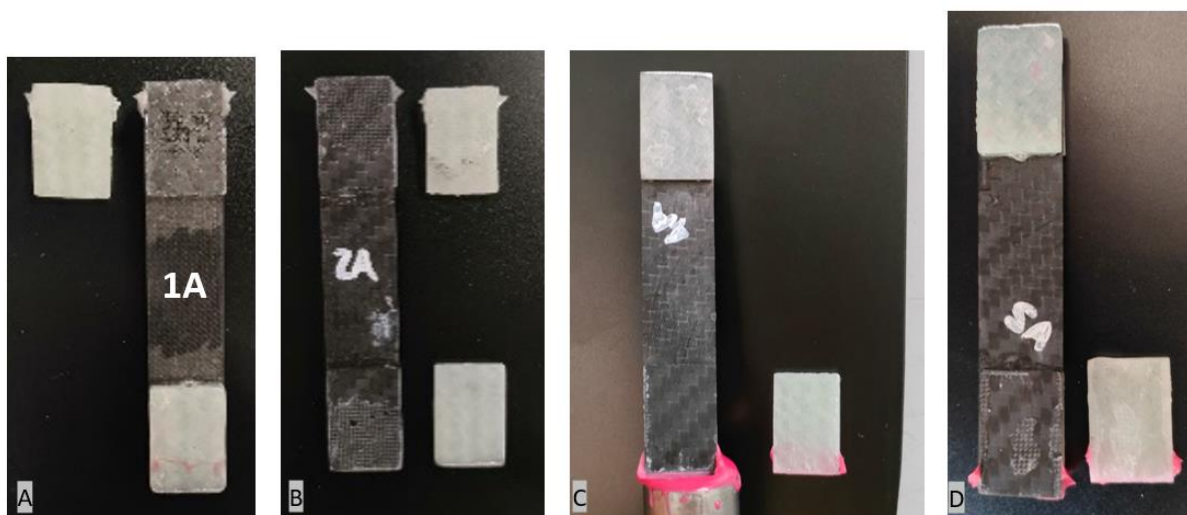


Figura 87:rotture dei tabs nei provini 1A (A); 2A (B); 4A (C); 5A (D)

Per quanto riguarda la famiglia B, essa era caratterizzata da tabs svasati, che riducono la tensione nell'adesivo. I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella 33.

Tabella 33: resoconto dei test condotti sulla famiglia B

Nomenclatura provino	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rottura
1 B	SikaPower®-1277	20877	0,2	2	90	12037	2 tabs
2 B	SikaPower®-1277	20929	0,2	3	90	24147	1 tab
3 B	SikaPower®-1277	20798	0,2	2	70	4929	2 tabs
4 B	SikaPower®-1277	21096	-	-	-	-	-
5 B	SikaPower®-1277	20277	0,2	2	70	12000	2 tabs

Ciò che si osserva è che la frequenza di risonanza è aumentata rispetto ai casi precedenti. Questo è dovuto al fatto che i tabs sono smussati. Essi possiedono meno massa rispetto al caso precedente, il che determina un aumento della frequenza. Il fatto che la frequenza sia leggermente superiore a quella massima consentita non rappresenta nemmeno un problema. Ciò si verifica perché, quando il provino viene successivamente incollato al sonotrodo, la frequenza di risonanza dell'intero sistema sonotrodo-provino diventa una sorta di media pesata (sulla massa) tra la frequenza del sonotrodo e quella del provino. Dato che il sonotrodo è più massivo, il provino, con la sua frequenza di risonanza elevata, ha un peso relativamente ridotto in questo contesto. Questo però non è risultato valido per il provino 4B, che aveva una frequenza molto più alta della massima consentita e di conseguenza è stato scartato.

La tabella include esclusivamente i valori di tensione nominale ai quali le prove si sono interrotte. Va detto che, al fine di verificare l'efficacia del programma e comprendere se la tensione percepita dal provino corrispondesse effettivamente alla tensione nominale, sono stati inizialmente eseguiti test a tensioni inferiori, ad esempio a 50 MPa o 60 MPa. Questi provini vibravano molto meglio rispetto a quelli della famiglia A. Tuttavia, con l'applicazione di tensioni di 70 MPa o 90 MPa, il numero di cicli è risultato basso, con un valore comparabile a quelli osservati nella famiglia A. Nella figura 88 ci sono le foto scattate ai provini della famiglia B.

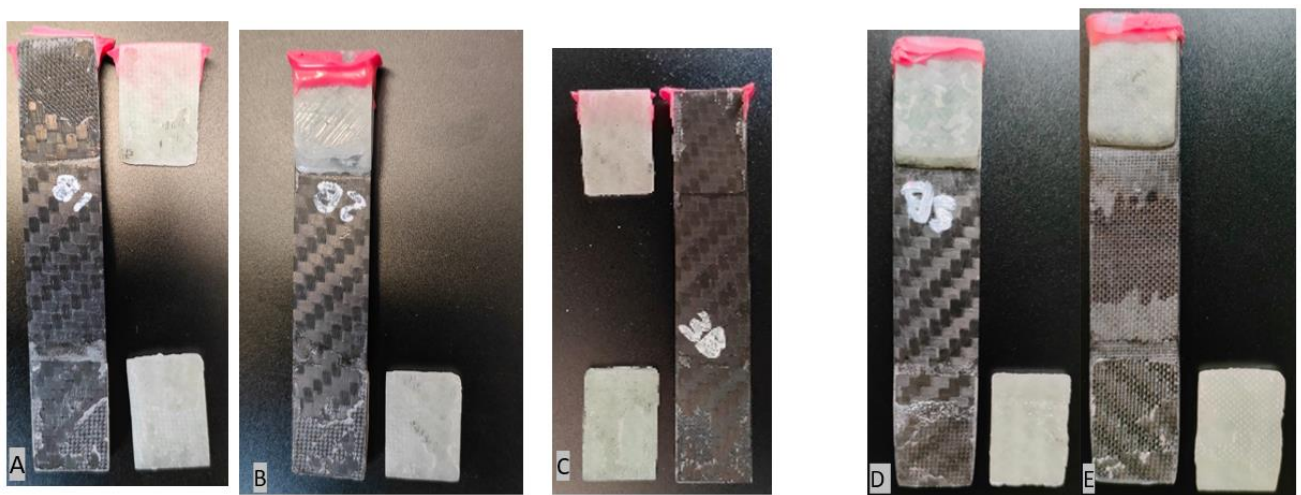


Figura 88: distacco dei tabs nella famiglia B: 1B (A); 2B (B); 3B (C); 5B (D, E)

Per quanto riguarda la famiglia C, essa era composta da soli due provini. Questa scelta è stata fatta per accelerare l'individuazione della causa della "tab failure" in modo più efficiente, poiché non avrebbe avuto senso realizzare cinque provini se tutti avessero condotto agli stessi risultati. I provini, denominati 1C e 2Cs (dove "s" sta per smussato), sono stati realizzati utilizzando piastre create con due strati di peel-ply. Di conseguenza, entrambe le barre in CFRP presentano una superficie ruvida, che si è dimostrata essere un elemento positivo per l'adesione dell'adesivo.

Il provino 2Cs è stato concepito con l'ipotesi che avrebbe mostrato una migliore performance a fatica, poiché presentava diverse migliorie: una superficie ruvida e tabs smussati. Inoltre, è stato implementato un maggiore sistema di raffreddamento, utilizzando più getti di aria compressa diretti anche sui tabs, al fine di evitare un surriscaldamento eccessivo in quella zona e, di conseguenza, prevenire eventuali problemi con l'adesivo.

Il resoconto dei risultati della prova è presentato nella tabella 34.

Tabella 34: resoconto dei test condotti sulla famiglia C

Nomenclatura provino	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rottura
1 C	SikaPower®-1277	20675	0,2	3,8	100	130000	1 tab
2 Cs	SikaPower®-1277	20793	0,1	2,5	110	27475	1 tab

Per entrambi i provini, oltre ai tempi precedentemente descritti di pulse & pause, sono stati esplorati altri intervalli di tempo. Questa famiglia ha dimostrato un miglior comportamento a fatica rispetto alle famiglie precedenti, permettendo di aumentare la tensione, pur richiedendo un aumento del tempo di "pause". È stato possibile raggiungere una tensione nominale di 110 MPa (effettivi circa 100 MPa) per 27475 cicli. Il raffreddamento, in combinazione con le accortezze precedentemente descritte, quali impiego di superfici rugose e tabs smussati, ha portato ad un considerevole miglioramento della durata del provino con tabs. La figura 89 illustra i distacchi dei tabs nei due provini testati, dove è evidente una superficie pressoché interamente coesiva.

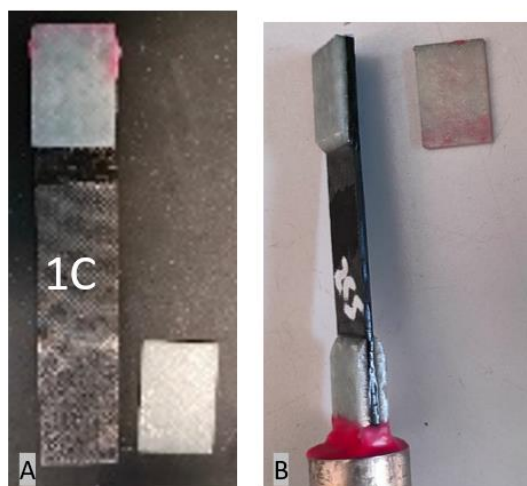


Figura 89: distacco dei tabs nella famiglia C: 1C (A); 2Cs (B)

L'ultima famiglia del gruppo che utilizza la resina è la D. Essa è costituita da tabs in CFRP quindi identici alla barra, tagliati sempre a 45°. Nella tabella 35 sono riportati tutti i dettagli delle prove.

Tabella 35: resoconto dei test condotti sulla famiglia D

Nom. Pr.	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rot-tura
1 D	SikaPower®-1277	20294	0,2	4	110	401456	1 tab
2 D	SikaPower®-1277	20427	0,2	4	130	189760	2 tabs
3 D	SikaPower®-1277	20396	0,2	4,5	120	220000	2 tabs
4 Ds	SikaPower®-1277	20532	0,2	4	110	617998	2 tabs
5 Ds	3MScotch-Weld	20352	0,2	4	110	2710033	2 tabs

Le frequenze di risonanza, determinate a valle dell'IET, hanno già suggerito un comportamento migliore di questi provini, il che è stato confermato dagli esiti delle prove. Poiché si aveva un'aspettativa positiva riguardo ai risultati di questa famiglia e, considerando la sensibilità del problema del surriscaldamento, si è deciso di adottare il numero massimo di getti di aria dal sistema di raffreddamento da questo momento in avanti. L'immagine 90 illustra il setup che si è rivelato ottimale.

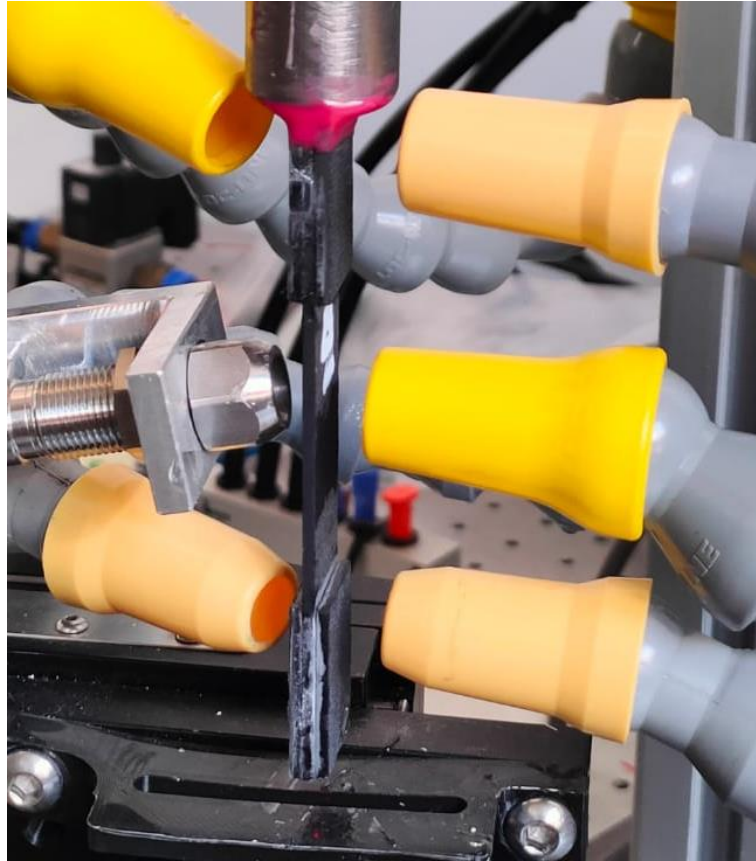


Figura 90: visualizzazione dei cinque getti di aria compressa sulle zone più critiche del provino (1D)

Le prove condotte sui primi tre provini, 1D, 2D e 3D, hanno confermato la supposizione basata sull'esperienza che si stava accumulando. Questi provini hanno raggiunto numeri di cicli mai registrati in precedenza, a condizione di aumentare il tempo di "pause". Un aspetto particolarmente interessante da notare (fig. 91 B-C e fig. 92 A-B) è che i provini 2D e 3D, nonostante il distacco dei tabs, presentano una superficie di frattura significativamente diversa rispetto a quelli testati fino a questo punto. Nelle immagini, si osserva una zona liscia e una zona rugosa di propagazione instabile che ricorda il comportamento a fatica tipico dei materiali metallici.

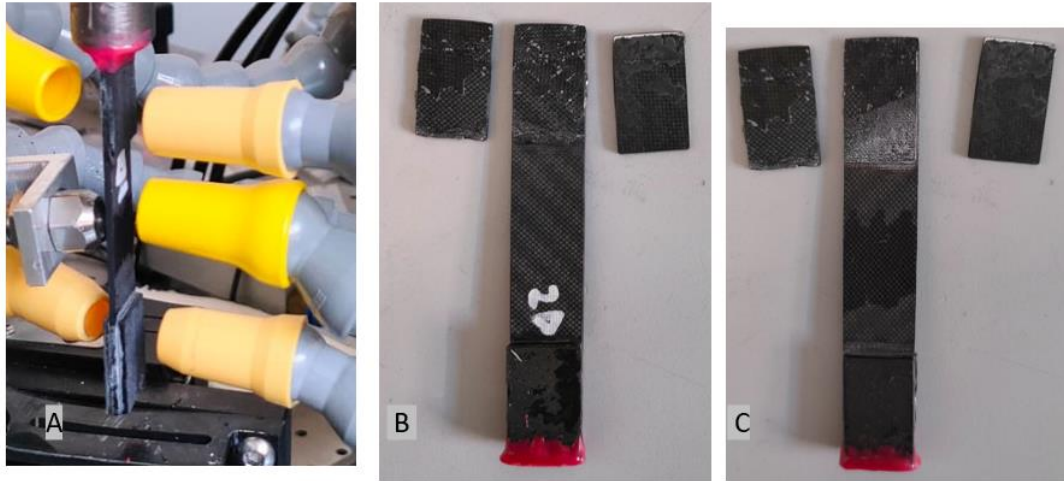


Figura 91: rottura dei tabs nel provino 1D (A) 2D (B e C)

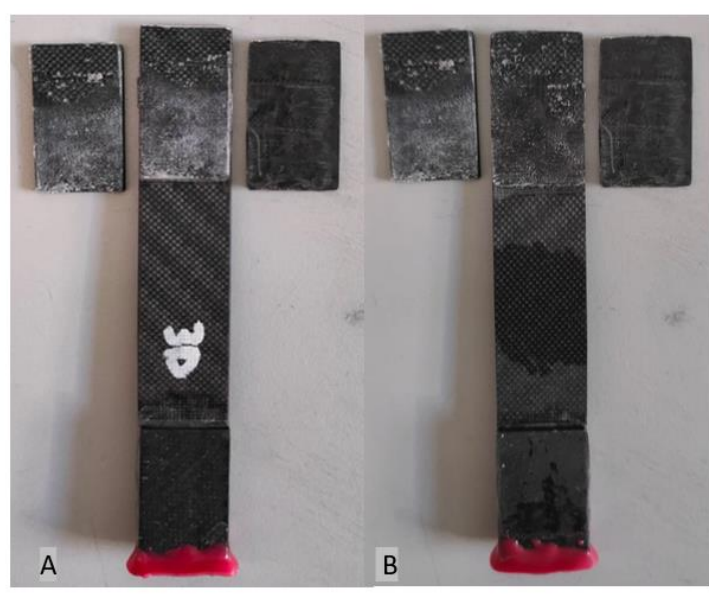


Figura 92: rottura dei tabs nel provino 3D (A e B)

Successivamente, si è proceduto con i test sui provini 4Ds e 5Ds: questi provini presentavano tabs in carbonio, smussati, ruvidi, e sfruttavano il massimo raffreddamento disponibile.

Il provino 4Ds ha raggiunto un numero notevole di cicli, arrivando a 617998 cicli con una tensione nominale di 110 MPa, il che rappresenta un valore molto elevato rispetto ai casi precedenti. In questo specifico caso, è stata osservata una cricca nell'adesivo tra il provino e il sonotrodo (fig. 93), probabilmente causata dalla prolungata esposizione a numerosi cicli.



Figura 93: rottura adesivo e tab nel provino 4D s

Per il provino 5Ds, si è quindi optato per l'utilizzo dell'adesivo 3M Scotch-Weld per incollare il provino al sonotrodo. Il risultato è stato sorprendente: la prova si è interrotta dopo 2,7 milioni di cicli. Analizzando la superficie di frattura (fig. 94), è evidente che questa superficie è significativamente diversa da quella osservata nelle altre famiglie: sembra proprio una classica superficie di frattura da fatica, in cui è chiaramente visibile la zona di propagazione stabile iniziale, che diventa instabile alla fine. È diventato evidente che questa configurazione di provino, insieme al metodo di test e all'adesivo utilizzato, fosse ottimale, e quindi si è proceduto con la famiglia 3.

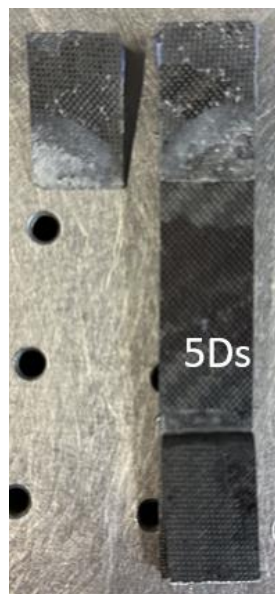


Figura 94: rottura tab nel provino 5Ds

- **FAMIGLIA 3**

Dopo tutte le considerazioni e l'esperienza acquisita, si è optato per il riutilizzo di alcuni provini, previa pulizia accurata, impiegando l'adesivo 3M Scotch-Weld non solo per fissare i provini ai sonotrodi, ma anche per incollare i tabs ai provini.

Sono stati testati inizialmente i provini: 4B, il 2Cs (fig 95).

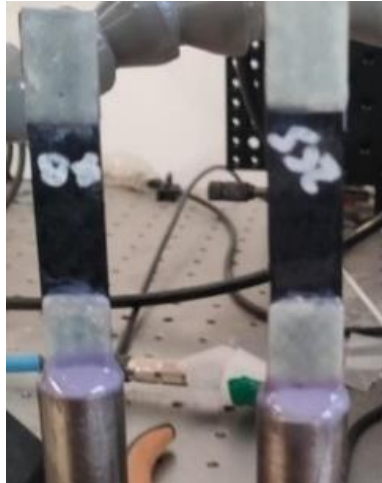


Figura 95: 4B e 2Cs nella famiglia 3 (3M Scotch-Weld)

Tabella 36: resoconto prova su provini 4B' e 2Cs'

Nom. provino	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rot-tura
4B'	3M Scotch-Weld	20600	0,2	4	100	15914	1 tab
2Cs'	3M Scotch-Weld	20538	0,2	4	100	487953	2 tabs

Tabella 37: resoconto prova su provini 4B e 2Cs

Nom. provino	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rot-tura
4B	SikaPower®-1277	20277	0,2	2	70	12000	2 tabs
2Cs	SikaPower®-1277	20793	0,1	2,5	110	27475	1 tab

Esaminando la tabella 36, relativa alle prove effettuate sui provini 4B e 2Cs, è chiaro un miglioramento rispetto ai corrispondenti nelle precedenti famiglie (tabella 37), confermando così che questo adesivo risulta essere migliore.

Sono state anche ripulite le superfici dei provini 1D e 2D, ma è emerso che, dopo il processo di cura, questi presentavano una frequenza di risonanza nettamente bassa, intorno a 19200 Hz. Nonostante questa limitazione, si è scelto di utilizzare comunque i provini, al fine di esaminare più approfonditamente gli effetti dell'adesivo 3M Scotch-Weld da solo, escludendo l'influenza della superficie ruvida ottenuta mediante la piastra con doppio peel-ply. Questo perchè le superfici, dopo essere state accuratamente pulite con acetone e carta abrasiva (e, nei casi più ostinati, con l'utilizzo della pistola termica per rimuovere vecchi residui di adesivo), non mostravano più picchi di rugosità derivanti dal doppio peel-ply. Di conseguenza, è stato deciso di accorciare questi provini per farli entrare in risonanza utilizzando dremel. In questo modo, 1D ha raggiunto una frequenza di 19998 Hz e 2D ha raggiunto una frequenza di 20126 Hz.

Successivamente, è stato quindi testato il provino 1D (tab. 38), ma purtroppo si sono subito staccati due tabs.

Tabella 38: resoconto della prova sul provino 1D' in confronto al provino 1D

Nom. Pr.	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rot-tura
1D'	3M Scotch-Weld	19998	0,2	4	100	7637	2 tabs
1D	SikaPower®-1277	20294	0,2	4	110	401456	1 tab

Questa situazione ha sollevato il dubbio che la superficie potesse essere troppo compromessa per riutilizzare il provino, il che potrebbe spiegare la frequenza insolitamente bassa (ricordiamo che la famiglia D ha raggiunto il maggior numero di cicli). Interessante notare che il provino

2D, avendo precedentemente realizzato un numero inferiore di cicli rispetto all'1D, ha ottenuto questa volta un numero di cicli superiore (tabella 39).

Tabella 39: resoconto della prova sul provino 2D' in confronto al provino 2D

Nom. Pr.	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rot-tura
2D'	3M Scotch-Weld	20126	0,2	4	100	1158394	1 tab
2D	SikaPower®-1277	20427	0,2	4	130	189760	2 tabs

In conclusione, al fine di esaminare gli effetti combinati dell'adesivo 3M Scotch-Weld, degli smussi sui tabs, dei tabs in carbonio e del massimo raffreddamento con il numero massimo di getti, si è scelto di creare appositamente due nuovi provini, denominati provino "1V" e provino "2V".

Tabella 40: resoconto delle prove sui provini 1 (4Ds') e 2 (5Ds')

Nom. Pr.	Incollaggio al sonotrodo	Frequenza di risonanza [Hz]	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Numero di cicli	Rottura
1V	3M Scotch-Weld	20398	0,2	4	110	102902933	2 tabs
1V'	3M Scotch-Weld	20398	0,2	4	110	108214050 totali	ROT. PR.
2V	3M Scotch-Weld	20291	0,2	5	130	2432906	ROT. PR.

I risultati sono stati eccellenti (tabella 40): il provino 1, a 110 MPa, ha completato circa 103 milioni di cicli. La prova si è interrotta perché si sono staccati due tabs. Successivamente, è stata intrapresa un'operazione di pulizia sulle superfici dei soli tabs staccati, seguita dal loro riattacco. Il provino è stato quindi sottoposto a un secondo test nelle stesse condizioni, con un numero iniziale di cicli pari a quello raggiunto precedentemente (103 milioni). Inoltre, al posto dello spray argentato, è stato utilizzato un foglietto di alluminio posizionato sulla superficie che riflette la luce del laser. Grazie alla sua superficie liscia, il laser ha potuto seguire senza problemi lo spostamento del provino, consentendo una calibrazione estremamente precisa.

Il secondo test è stato eseguito fino a raggiungere $1.08 \cdot 10^8$ cicli.

Osservando il provino, però, i tabs non si erano staccati. Quindi è stato effettuato l'IET, che ha rilevato una frequenza di 19070 Hz. La frequenza era notevolmente diminuita, suggerendo

chiaramente una cosa: per la prima volta, si era rotto il provino e non si erano staccati i tabs. Per confermare questa constatazione, si è deciso di staccare i tabs e di effettuare l'IET solo sulla barretta di composito, confrontando la frequenza del provino (presunto danneggiato) con quella di un provino integro.

Per la barretta presunta danneggiata, non è stato identificato alcun picco di risonanza; la risposta in frequenza era molto frastagliata, indicando chiaramente che il provino si era danneggiato. L'osservazione della sua superficie ha confermato questa conclusione, mostrando una cricca con parziale delaminazione (figura 96).

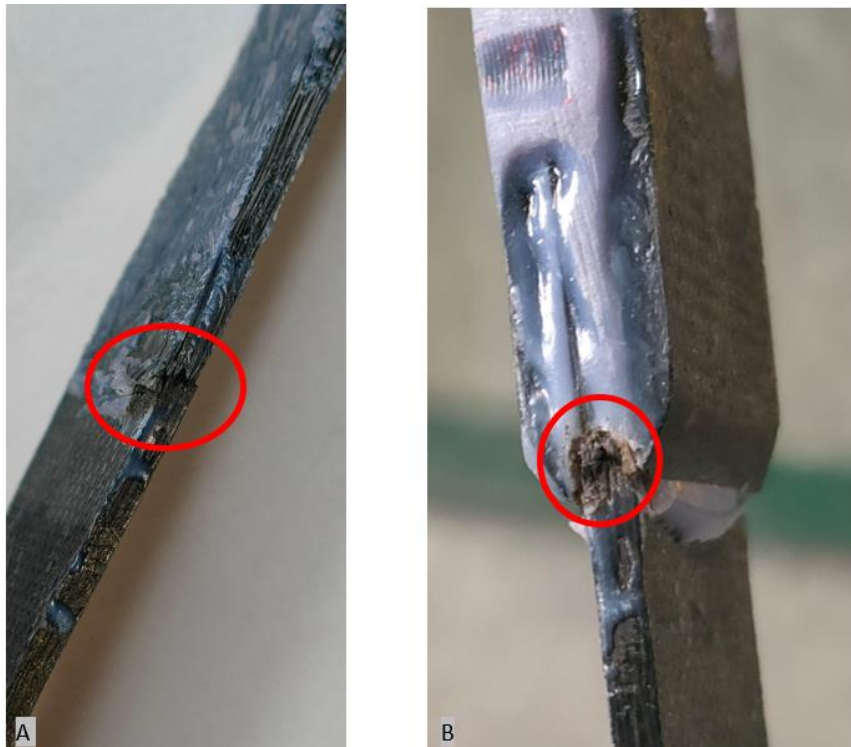


Figura 96: rottura del provino 1

Il provino 2 ha invece completato $2.4 \cdot 10^6$ cicli a 130 MPa (effettivi 150 MPa). Anche in questo caso, si è verificata la rottura del provino e non dei tabs (figura 97).

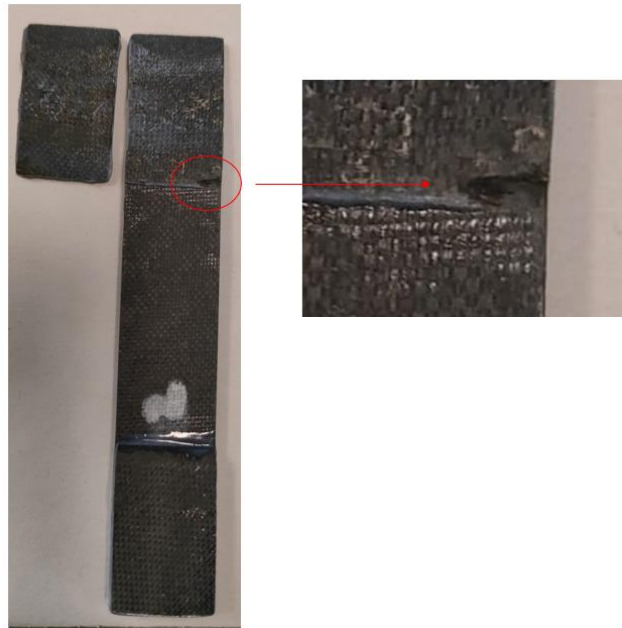


Figura 97: rottura del provino 2

9.2 Risultati e considerazioni per i provini quasi isotropi

Un "provino quasi isotropo" sebbene non presenti proprietà uniformi in tutte le direzioni, è progettato per avvicinarsi il più possibile a un comportamento isotropo. In questo modo, si cerca di raggiungere prestazioni simili in tutte le direzioni, nonostante il materiale non sia effettivamente isotropo. L'obiettivo era confrontare il comportamento meccanico (statico e a fatica) di provini hourglass con la medesima geometria, ma con stacking sequence $[0]_{8s}$ e $[0/90/45/-45]_s$. La sequenza di impilaggio quasi-isotropa permette di ridurre le tensioni tangenziali nel provino dovute alla geometria hourglass. Confrontando la posizione delle superfici di frattura e la durata a fatica dei due provini hourglass, è possibile dunque stabilire se vi è un'influenza delle tensioni tangenziali nella risposta a fatica dei provini hourglass $[0]_{8s}$.

Il confronto è stato eseguito sia su prove statiche sia su prove a fatica ad ultrasuoni. In particolare, applicando il criterio di Tsai-Wu, sono state individuate le regioni di cedimento. In particolare, il criterio di Tsai-Wu è stato applicato ad ogni ad ogni elemento del modello agli elementi finiti dei provini hourglass, in quanto le tensioni assiale e tangenziale variano di elemento in elemento. Per applicare il criterio di Tsai-Wu, sono state determinate le resistenze a trazione, a compressione e a taglio secondo le normative ASTM [36,37,38]. Infine, ipotizzando che la forma della superficie di cedimento sia la stessa in condizione statiche e a fatica, si applica il criterio di Tsai-Wu con i parametri determinati staticamente, ma considerando lo stato tensionale risultante dal test agli ultrasuoni. La posizione delle zone di cedimento previste dal criterio di Tsai-Wu vengono confrontate con le superfici di frattura osservate sperimentalmente. Di seguito un riepilogo delle attività condotte:

- Prove statiche a trazione, taglio e compressione su barrette di CFRP $[0]_{8s}$, utilizzando le normative ASTM, per determinare le resistenze a trazione, taglio e compressione del materiale;
- Analisi FEM a trazione su provino *hourglass* e su *smooth hourglass*;
- Applicazione del criterio di Tsai-Wu nella statica per ogni elemento su provino *hourglass* e su *smooth hourglass*;
- Individuazione delle zone critiche (Tsai-Wu) sia del provino *hourglass* che di quello *smooth hourglass* nel caso di trazione/compressione quasi-statica;
- Confronto con le posizioni delle rotture in caso di test quasi-statico di *hourglass* e di *smooth hourglass*
- Analisi FEM modale su provino *hourglass* e su *smooth hourglass* per individuazione delle zone di cedimento previste dal criterio di Tsai-Wu e confronto con i risultati sperimentali
- Prove statiche a trazione e compressione su barrette di CFRP $[0/90/45/-45]_s$ (quasi isotrope) utilizzando le normative ASTM;
- Applicazione del criterio di Tsai-Wu nella fatica per ogni elemento per ogni lamina per *hourglass q.i.*;
- Confronto con le posizioni delle rotture di *hourglass q.i.* nei test a fatica ad ultrasuoni.

Il primo obiettivo che è stato posto è stato quello di applicare il criterio di rottura di Tsai-Wu a ciascun elemento del provino hourglass, cercando di determinare l'elemento che per primo

diventa critico, ovvero raggiunge un coefficiente di Tsai-Wu unitario. Per raggiungere questo obiettivo, è stato necessario conoscere i moduli di resistenza del materiale e conoscere lo stato tensionale di ciascun elemento. Si è iniziato a fare ciò nell'ambito della statica, con un test di trazione quasi statico che è stato impostato in questo modo:

- 1) È stata creata la geometria. È stata utilizzata la geometria dell'hourglass dalla precedente attività discussa nel capitolo 5 per effettuare gli opportuni confronti tra il caso iniziale e il caso quasi isotropo;
- 2) La discretizzazione è stata effettuata mediante l'utilizzo di elementi shell;
- 3) È stata utilizzata la formulazione ortotropa del materiale;
- 4) Le condizioni al contorno sono state applicate vincolando i nodi colorati di rosso nell'immagine 98 lungo l'asse x e assegnando una curva di spostamento ai nodi colorati di azzurro.

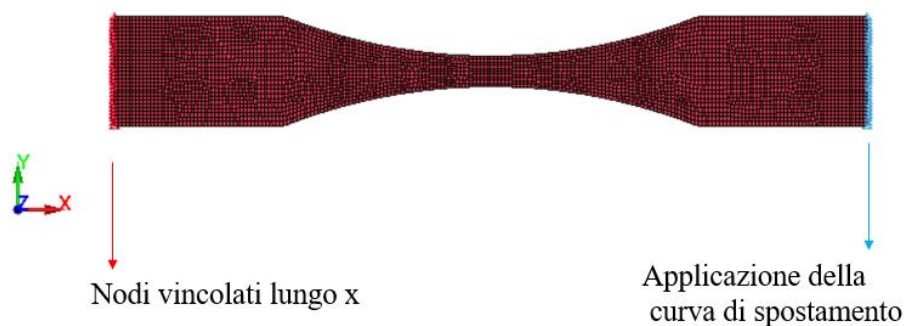


Figura 98: visualizzazione dei set di nodi vincolati e lasciati liberi nel provino hourglass nel test a trazione

L'output dell'analisi consiste nella visualizzazione dell'hourglass nello stato iniziale (Figura 99A) e nello stato finale (Figura 99 B).

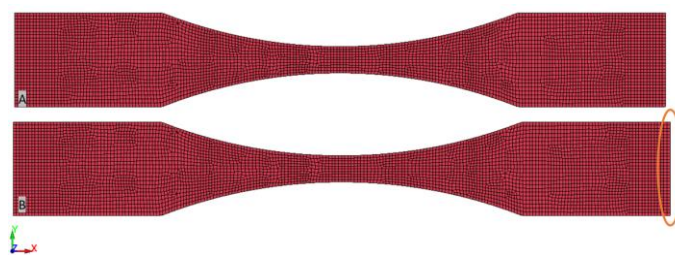


Figura 99: output dell'analisi di trazione. A:stato 0;B:stato 1. Notare che i nodi delle estremità si sono spostati

L'andamento delle tensioni assiali e delle tensioni tangenziali nella prova di trazione è il seguente (fig. 100 A e B).

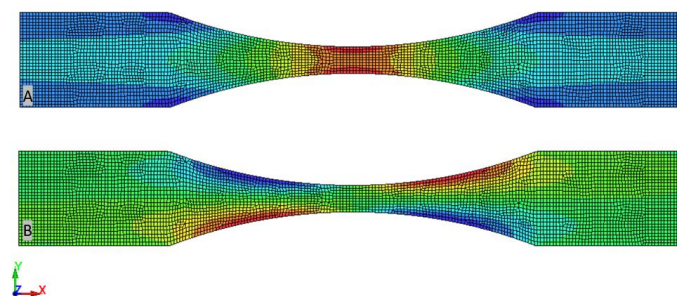


Figura 100: Andamento delle tensioni assiali (A) e tangenziali (B) nel test di trazione sul provino hourglass

Poiché l'obiettivo è comprendere quale elemento cederà per primo si è deciso di utilizzare il criterio di rottura di Tsai-Wu e applicarlo a ciascun elemento. Dall'analisi di trazione, si estraggono vettori contenenti i valori di σ per ogni elemento e τ per ogni elemento. Restano ora da conoscere i valori di T, C, S, ovvero i moduli di resistenza del materiale. Per ottenere tali valori, si applica la normativa ASTM.

- **Prova di trazione secondo la normativa ASTM D3039 [36]**

Le dimensioni del provino da utilizzare in questa prova possono essere riportate in tabella 41.

Tabella 41: dimensioni provino da trazione ASTM D3039

Lunghezza, L	200 mm
Larghezza, b	25 mm
Lunghezza dei tabs (facoltativi)	50 mm

La prova è regolamentata, quindi è necessario seguire procedure standard. Sono stati realizzati due provini per garantire risultati ripetibili e, di conseguenza, più affidabili. Il test è stato condotto utilizzando la macchina Zwick Roell Z050 [39], una macchina in grado di eseguire diverse prove (trazione, compressione, flessione), dotata di vari dispositivi di presa specifici per ciascuna di esse. Inoltre, è possibile utilizzare un sistema laser che monitora lo spostamento di punti sulla superficie del provino. Il test consiste nell'applicazione di una forza al provino a una determinata velocità, fino a quando il provino si rompe. Nell'immagine 101 è mostrato il provino da trazione T1 all'interno degli afferraggi della Zwick Roell Z050.



Figura 101: provino per prova di trazione all'interno della macchina Zwick Roell Z050

La macchina acquisisce tutte le informazioni in un file che contiene colonne quali *elongation*, *force*, *test time* e altre informazioni.

Queste sono state analizzate attraverso MATLAB. In particolare, si è ottenuta la curva che illustra l'andamento del carico in funzione del tempo del test. Dopo, utilizzando il carico e la sezione del provino, si è calcolata la tensione assiale, la cui variazione nel tempo viene rappresentata graficamente. La Figura 102 mostra questo diagramma nel caso del test di trazione del provino T1.

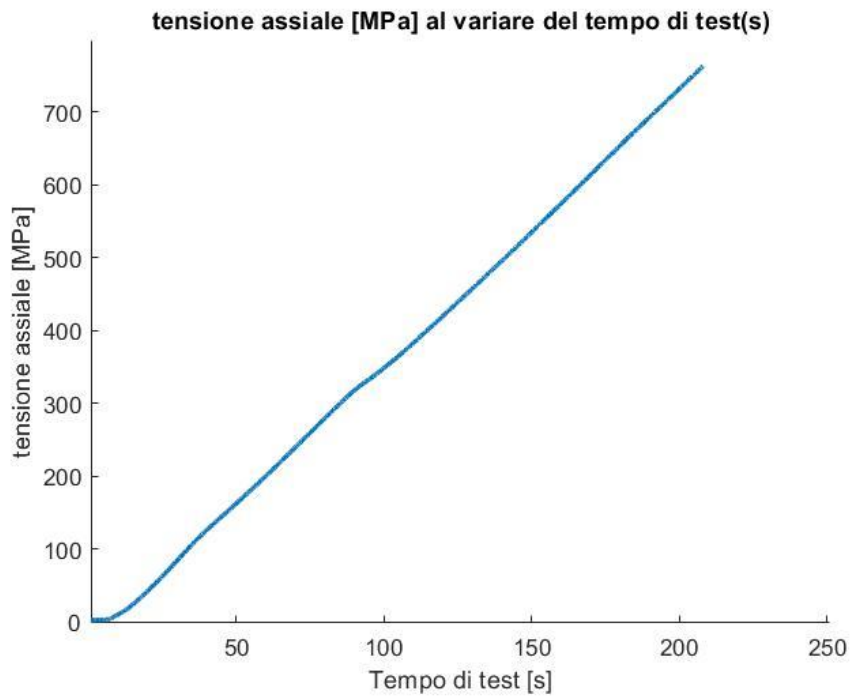


Figura 102: tensione assiale al variare del tempo di test nel provino T1 nella prova di trazione secondo la normativa ASTM

La norma indica che il valore di resistenza a trazione è il massimo valore di tensione assiale raggiunto nella prova. Nel caso del provino T1 (fig. 103) è di 762 MPa.

Viene eseguita la stessa procedura anche per il secondo provino da trazione (T2) dal quale si ottiene un valore di resistenza a trazione di 731 MPa. Di conseguenza viene fatta la media, che risulta essere di 747 MPa.

- **Prova di compressione secondo la normativa ASTM D3410 [37]**

Le dimensioni del provino da utilizzare in questa prova sono in tabella 42.

Tabella 42: dimensioni dei provini C1 e C2 da compressione (ASTM D3410)

Lunghezza, L	140 mm
Larghezza, b	10 mm

Anche in questo caso sono stati realizzati e testati due provini, C1 e C2. Gli afferraggi sono stati, in questo caso, supportati da un sistema anti-buckling (fig.103) per evitare instabilità dovute alla compressione.



Figura 103: afferraggio con dispositivo anti-buckling

La prova, molto simile a quella di trazione, ha portato a un valore di resistenza a compressione medio pari a 598 MPa. In figura 104 è mostrato il diagramma della tensione assiale al variare del tempo di test, per il provino C2, come esempio.

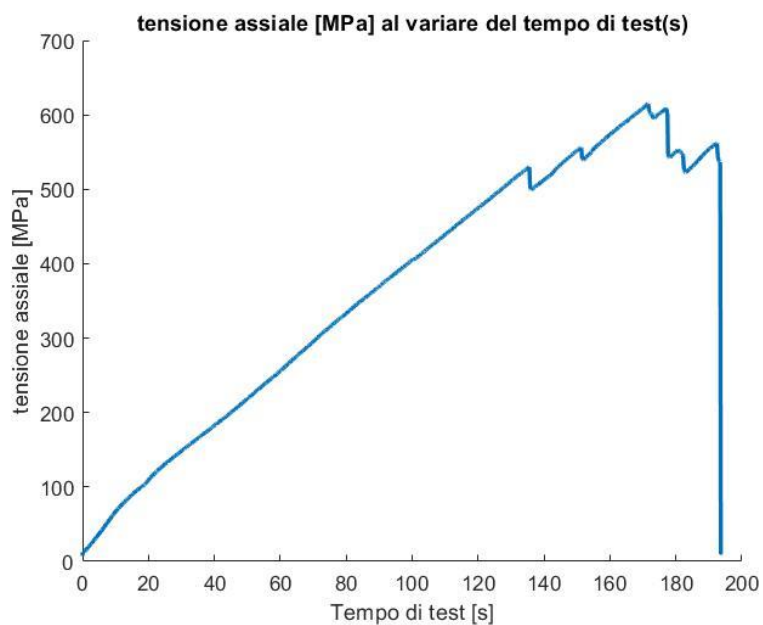


Figura 104: tensione assiale al variare del tempo di test nel provino C2 da compressione

- **Prova di taglio secondo la normativa ASTM D3518[38]**

Per condurre la prova di taglio al fine di determinare la resistenza al taglio, è stata presa la decisione di effettuare il taglio del provino secondo una direzione inclinata di 45°. Questo approccio consente di utilizzare la stessa macchina impiegata nelle prove di trazione e compressione. Nonostante la forza sia applicata assialmente, essa genera una componente di taglio nel provino.

Le dimensioni del provino da utilizzare in questa prova sono riportate nella tabella 43.

Tabella 43: dimensioni provini da taglio TA1, TA2 e TA3 (ASTM D3518)

Lunghezza, L	200 mm
Larghezza, b	25 mm
Lunghezza dei tabs	50 mm

In questo caso, a differenza dei test precedenti, è stato utilizzato anche un laser con l'obiettivo di monitorare la deformazione del provino. Prima del test, sono stati marcati dei punti sulla superficie della barretta da testare con un pennarello. Questi punti sono stati seguiti durante l'intera durata del test. Al termine del test, è stata eseguita un'analisi attraverso il programma *Digital Image Correlation Engine (DICe)*.

La *Digital Image Correlation (DIC)*, nota anche come Correlazione Digitale d'Immagini, rappresenta un metodo ottico senza contatto per misurare lo spostamento, le deformazioni e le vibrazioni nei materiali soggetti a forze applicate. [40]

La prima cosa che si fa è creare dei riferimenti sulla prima immagine, tracciando dei rettangoli sui puntini di cui si vuole seguire lo spostamento nel tempo di test. L'immagine 105 mostra un esempio in cui si sono creati tre riferimenti (tracker).

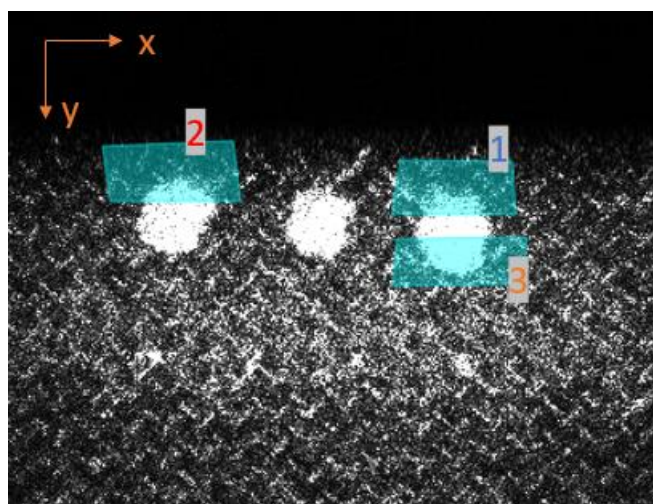


Figura 105: esempi di riferimenti (sono tre in questo caso) in DICe

A questo punto il software confronta ogni tracker di ciascuna foto con i tracker di riferimento della prima immagine, creando un diagramma “percentuale di spostamento-foto”. Ad esempio, nella figura 106 ci sono due diagrammi. Il primo è la percentuale di spostamento lungo x al variare delle foto e il secondo è quello lungo y.

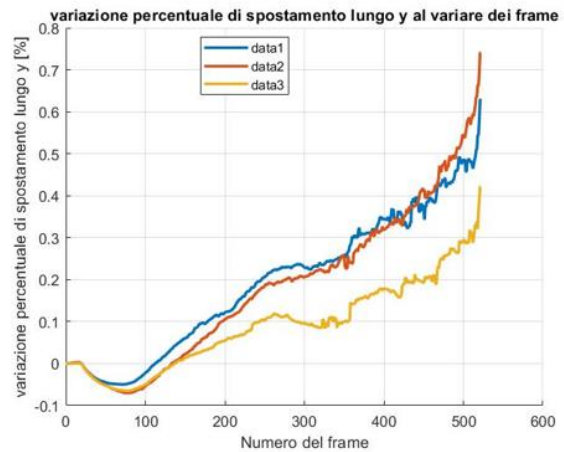
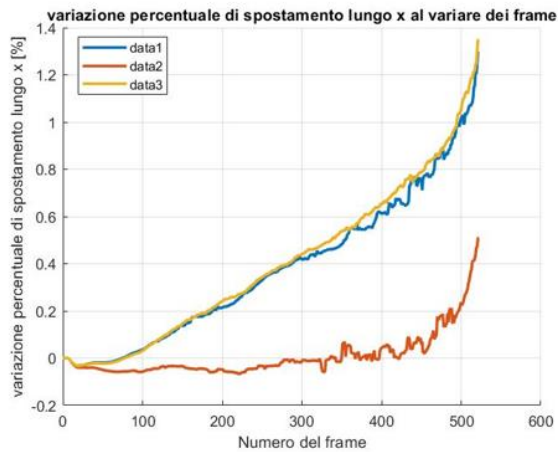


Figura 106: %x-frame ; %y-frame in DICe su TA1

Tramite delle operazioni svolte su Matlab si è riusciti a ottenere il diagramma del carico al variare della deformazione percentuale, in x (fig. 107 A) e in y (fig. 107 B).

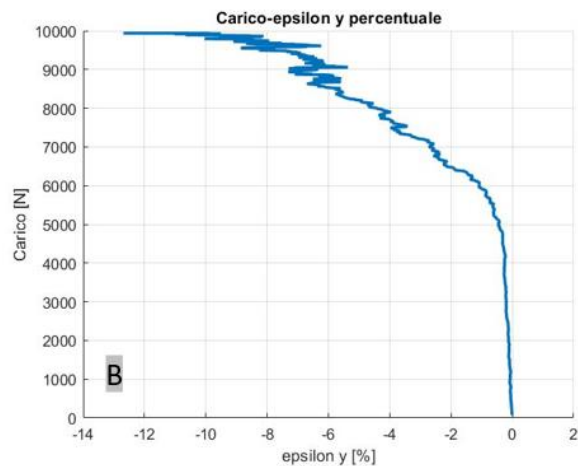
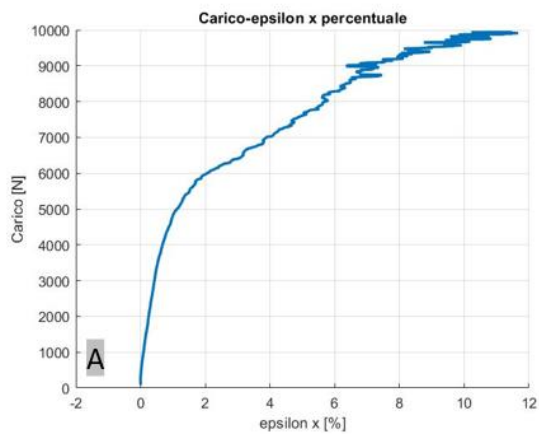


Figura 107: carico-epsilon x (A) e epsilon y(B)

Considerando che:

$$\Upsilon = \varepsilon_x - \varepsilon_y$$

$$\tau = \frac{P}{2A}$$

si ottiene agevolmente il diagramma τ - Υ percentuale, interrompendolo a un valore di gamma pari al 5%, come indicato dalla normativa (fig. 108).

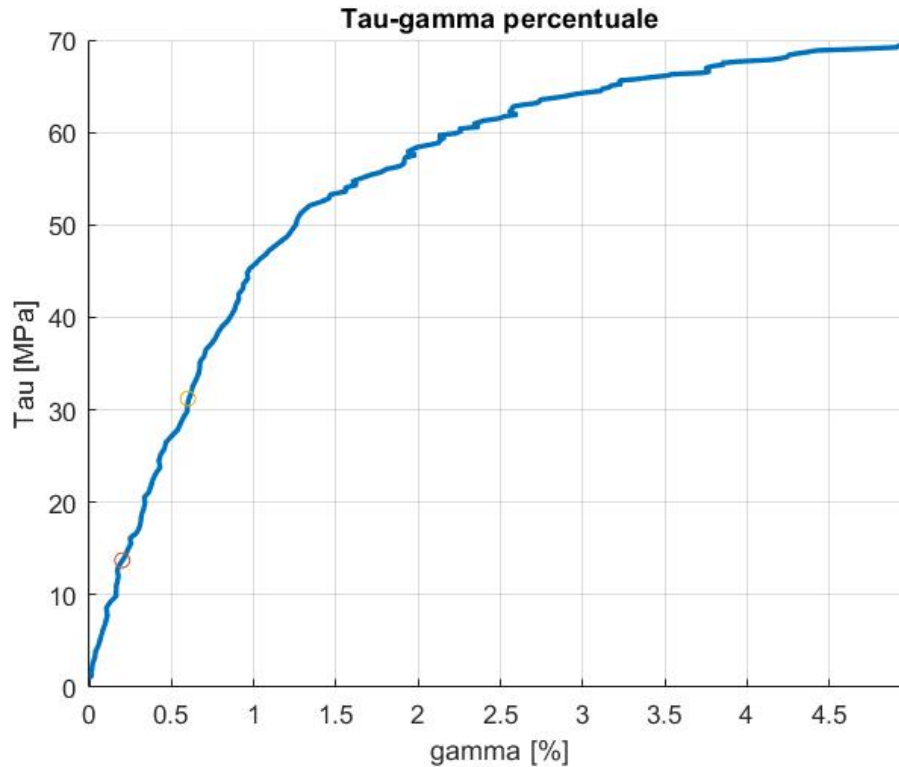


Figura 108: grafico $\tau - \gamma$ percentuale

A questo punto, la normativa suggerisce di calcolare la resistenza al taglio come il valore della tensione tangenziale in corrispondenza del 5% di scorrimento angolare. La media tra i tre risultati ottenuti testando tre provini (Ta_1 , Ta_2 , Ta_3) è di 69 MPa.

Ecco che si hanno tutte le informazioni a disposizione per applicare il criterio di rottura di Tsai Wu, ovvero i tre moduli di resistenza (tabella 44):

Tabella 44: moduli di resistenza dei provini iniziali

T	747 MPa
C	598 MPa
S	69 MPa

e i valori di tensione assiale e di tensione tangenziale ottenuti dal test di trazione del provino hourglass. Tutto questo viene fatto anche per il provino smooth hourglass.

Il codice del calcolo è stato realizzato su Matlab, e consiste di fatto in un ciclo FOR che applica il criterio di Tsai-Wu per ogni elemento della mesh. Esso si interrompe non appena un elemento sperimenta un valore di Tsai-Wu uguale a 1. Quando il ciclo for si interrompe, viene creata una mappa dell'andamento del coefficiente di Tsai-Wu nel provino.

Nel caso del provino quasi isotropo è stata svolta la stessa procedura, ma a monte sono stati calcolati dei valori di T, C per il quasi isotropo. Cioè sono state realizzate analoghe barrette ma

questa volta a partire da un piastra con stacking sequence $[0/90/45/-45]_s$ e sono state applicate le prove descritte dalle normative ASTM. Sono stati ottenuti i valori riportati in tabella 45.

Tabella 45: moduli di resistenza dei provini quasi isotropi

T_{qi}	531 MPa
C_{qi}	361 MPa

A questo punto, è stata fatta l'ipotesi che la forma del cedimento che si ha nella statica, la si ha anche in fatica, ma in questo caso con un carico minore (perché la sollecitazione è ciclica).

È stato quindi applicato il criterio di Tsai-Wu sia nell'hourglass che nello smooth hourglass sia in versione iniziale che in versione quasi isotropa, considerando però lo stato tensionale nel caso di test agli ultrasuoni, ovvero quello risultante dall'analisi FEM modale. Alla fine, sono state confrontate tutte le mappe ottenute (fig. 110, 111) con i casi reali di rotture reali.

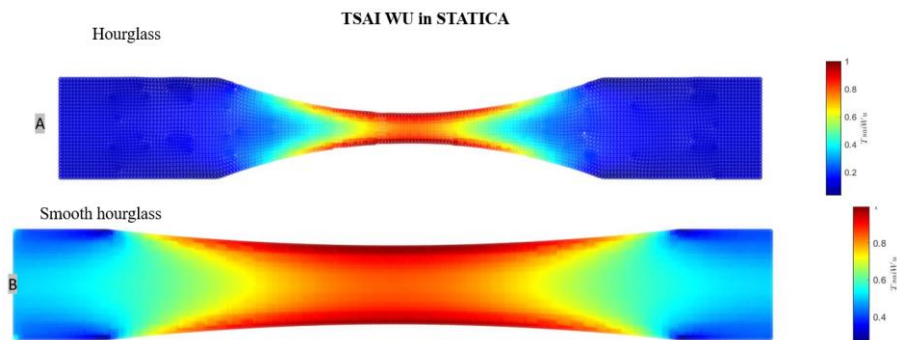


Figura 109: mappa di Tsai Wu nel caso della statica nell'hourglass(A) e nello smooth hourglass(B)

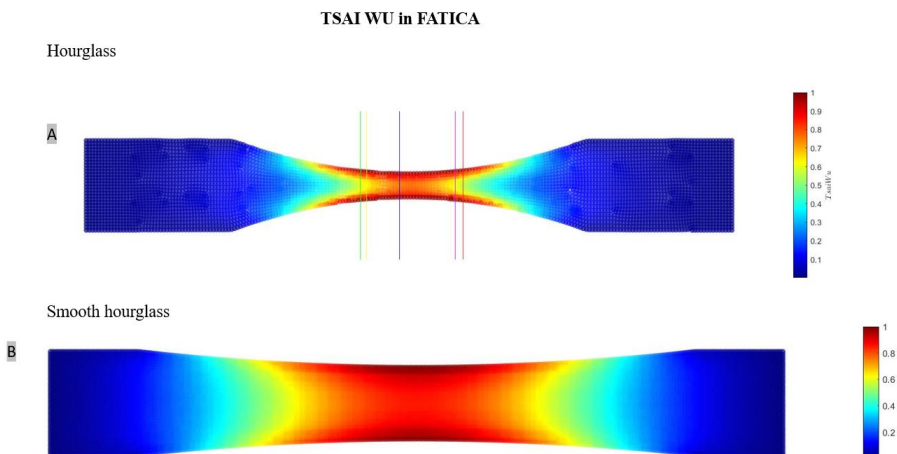


Figura 110: (A) mappa di Tsai Wu nel caso della fatica nell'hourglass (con riportate le posizioni delle superfici di frattura) e nello smooth hourglass(B)



Figura 111: posizione di rottura dell'hourglass nel caso quasi statico



Figura 112: posizione di rottura dello smooth hourglass nel caso quasi statico

Come si può notare dalle figure 111 e 112, le rotture, nel caso dei test quasi statici, si sono originate sui raggi di raccordo, proprio come preannuncia il criterio di Tsai-Wu (fig.109).

Il criterio di Tsai-Wu predice bene anche nel caso della fatica, e ciò si può notare confrontando la figura 110 A con la figura del capitolo 5 in cui si illustrava la precedente attività.

Passando ai provini quasi isotropi, sono stati realizzati sette provini hourglass quasi isotropi, di cui due, con una frequenza leggermente superiore al limite massimo, sono stati sottoposti a test statico. L'esito della prova ha confermato l'aderenza al criterio di Tsai Wu e alla previsione iniziale: nei provini quasi isotropi, in condizioni statiche, la frattura ha avuto origine dal centro. Analizzando il dettaglio mostrato nello zoom della figura 113 B, è interessante notare che la frattura ha avuto origine dal centro della sezione (strato a 45°). La propagazione della frattura, tuttavia, ha seguito un percorso non spiegabile da nessuna teoria consolidata: si è verificata una delaminazione, la quale può propagarsi in molteplici modi, dipendendo dalle interazioni tra i diversi strati e dal campo tensionale. L'unica certezza è che ha avuto origine da uno strato a 45° nella sezione centrale del provino.

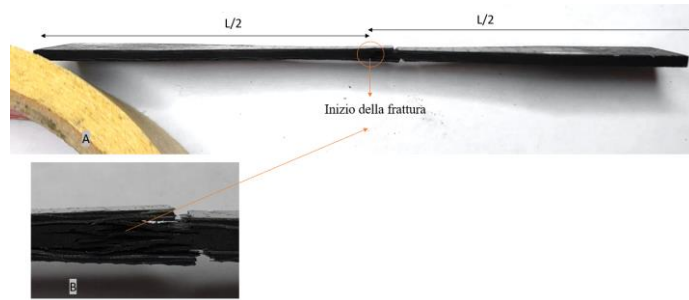


Figura 113: rottura in statica del primo provino hourglass quasi isotropo (A), dettaglio (B)

Anche nel caso del secondo provino hourglass quasi isotropo testato staticamente, la rottura è avvenuta al centro, come illustrato nella figura 114. Dal dettaglio mostrato nella figura 114 B, è evidente che la delaminazione ha un andamento diverso rispetto a quella precedente, fornendo così una prova della natura randomica del percorso della delaminazione.

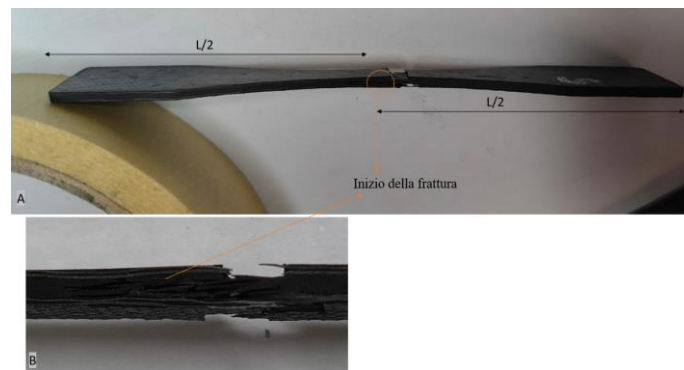


Figura 114: rottura in statica del secondo provino hourglass quasi isotropo(A), dettaglio (B)

In figura 115 è presente un ingrandimento delle due superfici di frattura dei due provini hourglass quasi isotropi testati staticamente, in cui si nota che la frattura si è originata da un layer orientato a 45° .



Figura 115: ingrandimento delle superfici di frattura dei due provini hourglass q.i. testati staticamente

A fatica, invece sono stati testati cinque provini hourglass quasi isotropi, la cui frequenza di risonanza era (tabella 46):

Tabella 46: frequenze dei cinque hourglass q.i. testati a fatica

Nomenclatura hourglass q.i.	Frequenza di risonanza [Hz]
2	20346
3	20243
4	20386
6	20388
7	20454

Il resoconto dei test condotti su questi provini, può essere riportato in una tabella (tabella 47).

Tabella 47: resoconto dei test condotti sui provini hourglass quasi isotropi

Nom. Pr.	Incollaggio al sonotrodo	Tempo di carico ("pulse") [s]	Tempo di riposo ("pause") [s]	Tensione nominale [MPa]	Tensione e effettiv a media [MPa]	Numero di cicli	Posizione di rottura
2	3M Scotch-Weld	0,2	4	100	113	979.323.843	Centrale
3	3M Scotch-Weld	0,2	4	110	70	1.007	Centrale
4	3M Scotch-Weld	0,3	4	100		In fase di test al momento della scrittura	In fase di test al momento della scrittura
6	3M Scotch-Weld	0,2	4	100	96	2.878.910	Centrale
7	3M Scotch-Weld	0,3	4	100	113	617.498.463	Centrale

Per tutti i test è stato utilizzato l'adesivo 3M Scotch-Weld per incollare il provino al sonotrodo, poiché ha dimostrato di essere il migliore tra quelli provati. Inoltre, al fine di garantire una calibrazione più precisa e consentire al laser di seguire bene lo spostamento dell'estremità dei provini, è stato utilizzato il foglietto di alluminio anziché lo spray argentato. Il sistema di raffreddamento dei provini consisteva in quattro getti d'aria, di cui due posizionati in corrispondenza dell'adesivo tra sonotrodo e provino e due nella sezione centrale. È importante

notare che, poiché in questo caso non sono presenti i tabs, non sussiste il problema del loro distacco. Il setup è mostrato nella figura 116.



Figura 116: raffreddamento dei provini hourglass quasi isotropi testati a fatica

Guardando la tabella 47, emerge chiaramente che questi provini hanno ottenuto prestazioni superiori agli analoghi provini con sequenza di impilaggio monodirezionale: ad esempio, il provino "2" ha raggiunto i $9.80 \cdot 10^8$ cicli con una tensione effettiva 105 MPa.



Figura 117: provini hourglass q.i. testati a fatica, rotti al centro

In questo contesto (manca l'immagine relativa al provino "4" poiché questo in fase di scrittura è ancora sottoposto al test) tutte le fratture (fig.117) sono partite dal centro, in accordo con le previsioni del criterio di Tsai-Wu. Ciò dimostra che, nel caso dei provini hourglass monodirezionali ($[0]_{8s}$), le tensioni tangenziali influenzano significativamente la risposta a fatica del provino, la cui superficie di frattura non è al centro. Pertanto, nell'analisi dei dati dei provini hourglass monodirezionali è necessario tenere in conto in maniera opportuna dello stato tensionale del provino e della presenza delle tensioni tangenziali.

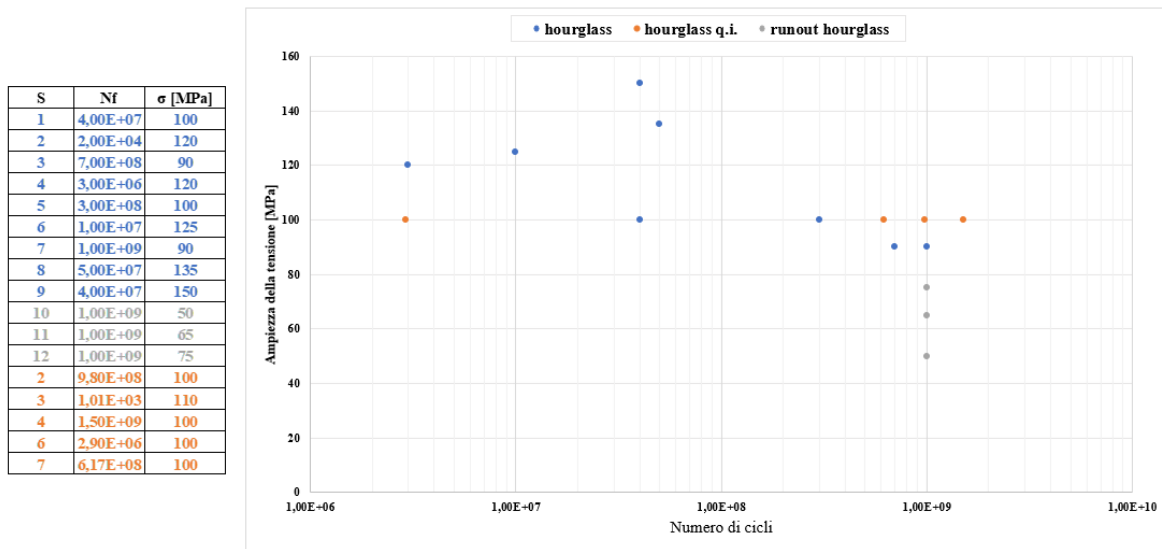


Figura 118: diagramma SN(hourglass e hourglass q.i.)

Questo è visibile anche nel diagramma SN (tensione-durata) relativo agli hourglass e agli hourglass quasi isotropi (fig.118). Si osserva che i provini hourglass, mediamente, hanno presentato durata inferiore rispetto ai provini hourglass quasi isotropi. Nei casi in cui entrambi hanno registrato lo stesso numero di cicli, il provino hourglass era comunque soggetto a una tensione maggiore.

Osservando l'immagine 117, va notato che la rottura dei provini "3" e "6" è stata diversa rispetto agli altri. Il provino "3", dopo 1007 cicli a 110 MPa nominali, si è spezzato in due. Questo ha sollevato preoccupazioni riguardo alla possibilità di buckling.

Anche se non è stato chiaramente spiegato per tutte le famiglie, prima di testare i provini, è stata sempre condotta un'analisi FEM di buckling, come descritto nel capitolo dei metodi, per determinare la tensione critica dei provini. In particolare, per eseguire l'analisi di buckling dei provini hourglass quasi isotropi, è stata implementata la seguente procedura:

Gli otto strati con stacking sequence $[0/90/45/-45]_s$ sono stati modellati, per l'analisi di buckling, come otto strati con stacking sequence $[0]_{8s}$ con proprietà equivalenti. Queste proprietà sono state calcolate utilizzando il programma Buzz-o-sonic mediante la tecnica IET su barre con stacking sequence quasi isotropa. L'obiettivo era comprendere le proprietà compressive del laminato, essendo composto da lamine con diversi orientamenti e quindi con

proprietà diverse in ogni strato. Sono state impattate tre barre, ottenendo $E_1 = 42,7$ GPa, $E_2 = 42,8$ GPa, $E_3 = 43$ GPa. La media di questi valori è risultata essere 42,83 GPa.

Il materiale è stato considerato elastico isotropo, poiché in piano questi provini sono quasi isotropi. La figura 119 mostra una parte del file di testo di Ls-Dyna creato per questa analisi.

```

*PART_COMPOSITE
$#
shell_4p
$# pid elform shrf nloc marea hgid adpopt ithelfrm
    1 16 0.0 0.0 0.0 0 0 0
$# mid1 thick1 b1 tmid1 mid2 thick2 b2 tmid2
    1 0.2225 0.0 0 1 0.2225 0.0 0
    1 0.2225 0.0 0 1 0.2225 0.0 0
    1 0.2225 0.0 0 1 0.2225 0.0 0
    1 0.2225 0.0 0 1 0.2225 0.0 0
*MAT_ELASTIC
$# mid ro e pr da db not used
    11.47480E-9 42830.0 0.3 0.0 0.0 0.0
*BOUNDARY_SPC_SET
$# nsid cid dofx dofy dofz dofrx dofry dofz
    1 0 1 0 0 0 0 0
    3 0 0 1 1 1 1 1
    2 0 0 1 1 1 1 1
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
    3 1 2 1 1.0 01.00000E28 0.0
    2 1 2 1 -1.0 01.00000E28 0.0
*DEFINE_CURVE
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp lcint
$# al ol
    0.0 0.0
    1.0 1.0

```

Figura 119: card dell'analisi di buckling su hourglass q.i.

L'output ha indicato che questi provini vanno in buckling a 118 MPa.

Riguardo alle superfici di frattura, i provini "3" e "6" sono quelli che hanno raggiunto un numero di cicli inferiore rispetto agli altri e presentano delle superfici diverse, essendosi spezzati in due pezzi. Si ritiene che durante il caricamento possa esserci stato un sovraccarico che ha creato un'instabilità di compressione in questi provini.

10. Conclusioni

Nel corso di questa attività di tesi, l'obiettivo era comprendere lo stato tensionale di provini in materiale composito rinforzato con fibre di carbonio, focalizzandosi sulla fatica ad altissimo numero di cicli (VHCF) e sull'eventuale ruolo delle tensioni tangenziali nel danneggiamento dei provini. Questo perché, in precedenti test di fatica gigaciclica su provini di geometria hourglass, tutte le rotture si sono verificate in posizioni intermedie tra zone a massima tensione assiale e zone a massima tensione tangenziale, specificamente sui raggi di raccordo dei provini. Ciò risultava inatteso poiché la sezione centrale dei provini (zona di massima tensione assiale) era notevolmente più caricata rispetto alle altre, suggerendo che la rottura dovesse verificarsi al centro, come nei materiali metallici. Inoltre, le tensioni tangenziali erano di un ordine di grandezza inferiore rispetto alle tensioni assiali.

Per raggiungere l'obiettivo, sono state intraprese due strade parallele: la progettazione e la realizzazione di provini senza tensioni tangenziali, ovvero "provini con tabs", e la creazione di provini indipendenti dalle tensioni tangenziali, ossia "hourglass quasi isotropi". L'intento era confrontare le rotture di questi due casi con quelle dei provini hourglass della precedente attività, dove le rotture si verificavano nelle posizioni discusse. Tuttavia, durante i test dei provini con tabs, è emerso il problema della "tab failure". Questo, insieme ad altre difficoltà, è una delle ragioni per cui ci sono ancora pochi studi scientifici sulla fatica VHCF dei compositi.

Per affrontare i problemi emersi durante le prove, tra cui il surriscaldamento dei provini, il controllo del test e il monitoraggio del danneggiamento, sono state progettate diverse "famiglie" di provini con tabs, ciascuna con una configurazione di test appropriata. Dopo numerosi test, il problema della "tab failure" è stato risolto attraverso vari accorgimenti, come dettagliato nel capitolo 9.1.

Per quanto riguarda la seconda strada, è stato progettato un provino hourglass con una stacking sequence opportuna per renderlo quasi isotropo e indipendente dalle tensioni tangenziali.

I dati raccolti sono stati rappresentati su un diagramma S-N (tensione-durata), evidenziando che i provini senza tensioni tangenziali (barrette con tabs) e quelli indipendenti dalle tensioni tangenziali (hourglass quasi isotropi) hanno una durata superiore rispetto agli hourglass con tensioni tangenziali. Inoltre, gli hourglass quasi isotropi si sono rotti tutti al centro, fornendo una duplice dimostrazione che le tensioni tangenziali, anche in misura molto ridotta rispetto alle tensioni assiali, influenzano significativamente il cedimento a fatica nei materiali compositi. Questa dimostrazione è evidente sia in termini di resistenza meccanica, con i provini senza tensioni tangenziali che durano di più, sia in termini di posizione della superficie di rottura, con gli hourglass quasi isotropi che si rompono al centro, a differenza di quelli con tensioni tangenziali.

Raggiungere questa consapevolezza è stato un processo che ha richiesto tempo e sforzi considerevoli. Si è seguito un approccio scientifico, applicando accorgimenti, valutando i risultati ottenuti e, soprattutto, comprendendo quando ci si stava allontanando dalla giusta direzione o quando si stava intraprendendo la strada corretta per risolvere le problematiche. Alla fine, attraverso numerosi accorgimenti, sia di natura progettuale che pratica, è emersa la conferma, in modi diversi, che le tensioni tangenziali giocano un ruolo cruciale in questo contesto.

Questa scoperta rappresenta un punto di partenza, non un punto d'arrivo, per la progettazione di applicazioni con materiali compositi. Nonostante le sfide siano numerose, il futuro dei compositi si preannuncia luminoso, come già evidente negli attuali impieghi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] De Baere, I., Van Paepegem, W., Quaresimin, M., & Degrieck, J. (2011). On the tension–tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part I: Limitations of the ASTM D3039/D3479 standard. *Polymer Testing*, 30(6), 625-632.; part II: Evaluation of a dumbbell-shaped specimen. *Polymer Testing*, 30(6), 663-672.
- [2] Quaresimin, M., Susmel, L., & Talreja, R. (2010). Fatigue behaviour and life assessment of composite laminates under multiaxial loadings. *International Journal of Fatigue*, 32(1), 2-16.
- [3] Shabani, P., Taheri-Behrooz, F., Samareh-Mousavi, S. S., & Shokrieh, M. M. (2021). Very high cycle and gigacycle fatigue of fiber-reinforced composites: A review on experimental approaches and fatigue damage mechanisms. *Progress in Materials Science*, 118, 100762.
- [4] “Materiale Composito.” Wikipedia, 2 Dec. 2023, it.wikipedia.org/wiki/Materiale_composito.
- [5] Reddy, J N. *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells*. CRC Press, 24 Nov. 2003.
- [6] Paolino D.S., Belingardi G., [2023], slide del corso *Design of Lightweight & Composite Structures*
- [7] *Fiber-Reinforced Composites Tipology.svg* - Wikipedia.
- [8] Iucolano F. [2022-23], slide del corso di *Materiali*
- [9] Licciulli A. [2006], slide del corso *Compositi e Rinforzi*
- [10] “CompositesWorld.” <https://www.compositesworld.com/articles/woven-fabrics-the-basics>
- [11] Degrieck and, J., & Van Paepegem, W. (2001). Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials. *Appl. Mech. Rev.*, 54(4), 279-300
- [12] Ghobadi, A. (2017). Common type of damages in composites and their inspections. *World Journal of Mechanics*, 7(02), 24-33.
- [13] Cricri G, slide del Corso *Meccanica della Frattura*
- [14] Vassilopoulos, A. P. (2020). The history of fiber-reinforced polymer composite laminate fatigue. *International Journal of Fatigue*, 134, 105512.
- [15] Flore, D., Wegener, K., Mayer, H., Karr, U., & Oetting, C. C. (2017). Investigation of the high and very high cycle fatigue behaviour of continuous fibre reinforced plastics by conventional and ultrasonic fatigue testing. *Composites Science and Technology*, 141, 130-136.
- [16] Hosoi, A., S15uzuki, T., Kosugi, K., Atsumi, T., Shimamura, Y., Tsuda, T., & Kawada, H. (2020). Very high-cycle fatigue characteristics of cross-ply CFRP laminates in transverse crack initiation. In *ICAF 2019–Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing: Proceedings of the 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue*, June 2-7, 2019, Krakow, Poland (pp. 838-846). Springer International Publishing.

- [17] Premanand, A., & Balle, F. (2022). Development of an axial loading system for fatigue testing of textile-composites at ultrasonic frequencies. *Materials Letters: X*, 13, 100131.
- [18] Ajovalasit, A. *Introduzione alla analisi sperimentale delle tensioni*. Aprile 2009.
- [19] Avalle M. [2001/2002], slide del corso *Meccanica Sperimentale*
- [20] “Estensimetri|Luchsinger.” Luchsinger.it, 2018, www.luchsinger.it/it/sensori/deformazione/estensimetri-esa/.
- [21] MicroMeasurements. *General Purpose Strain Gauges- Stacked Rosette*, docs.micro-measurements.com/?id=6110.
- [22] SignalExpress Download.” www.ni.com, www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.signalexpress.html#322415.
- [23] “Methods of Obtaining Magnitude and Direction of Principal Stress (Rosette Analysis) - Learn/Examine | KYOWA.” Product.kyowa-Ei.com, product.kyowa-ei.com/en/learn/strain-gages/kfgs_rosetteanalysis.
- [24] “LY Estensimetri Lineari Con 1 Griglia Di Misura.” HBM, 2 Sept. 2019, www.hbm.com/it/4561/ly-estensimetri-lineari-con-1-griglia-di-misura/?product_type_no=LY%20Estensimetri%20Lineari%20con%201%20Griglia%20di%200Misura.
- [25] “XY Rosette a T Con 2 Griglie Di Misura.” HBM, 2 Sept. 2019, www.hbm.com/it/3443/xy-rosette-a-t-con-2-griglie-per-analizzare-sollecitazioni-biassiali-di-tensione/?product_type_no=XY%20Rosette%20a%20T%20con%202%20Griglie%20di%20Misura
- [26] “Easy composites”. <https://www.easycomposites.eu>
- [27] Boursier Niutta, C., Ciardiello, R., Tridello, A., & Paolino, D. S. (2023). Epoxy and Bio-Based Epoxy Carbon Fiber Twill Composites: Comparison of the Quasi-Static Properties. *Materials*, 16(4), 1601.
- [28] “IN2 Epoxy Infusion Resin - Easy Composites.” www.easycomposites.co.uk/in2-epoxy-infusion-resin
- [29] “SikaPower®-1277.” ita.sika.com/it/industria/trasporti/adesivi-per-metalli/sikapower-1277.html.
- [30] www.henkeladhesives.com/it/itprodotto/structuraladhesives/loctite_hy_40700.html.
- [31] “3M™ Scotch-Weld™ Structural Epoxy Adhesive EC-9323 B/A, 20 L, Redorange | 3M Italia.” 3mitalia.it, MMM-ext, 2023, www.3mitalia.it/3M/it_IT/p/d/v000118256
- [32] “Wazer Products”|<https://wazer.com/product>
- [33] ASTM International. E1876-22 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration
- [34] “Buzz-o-Sonic Software.” Www.buzzmac.com, www.buzzmac.com/bs.html

- [35] Paolino, D. S., Rossetto, M., Chiandussi, G., & Tridello, A. (2012). Sviluppo di una macchina a ultrasuoni per prove di fatica gigaciclica, AIAS 2012-130
- [36] ASTM International. D3039/D3039M-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- [37] ASTM International. D3410/D3410M-16 Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading
- [38] ASTM International. D3518/D3518M-18 Standard Test Method for In-Plane Shear Response of of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate
- [39] “Zwick Roell” <https://www.zwickroell.com/>.
- [40] “Digital Image Correlation | Luchsinger.” Luchsinger.it, 2018, www.luchsinger.it/it/sensori/deformazione/dic-digital-image-correlation/