



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

CLASSE L-9

**ANALISI DEL COMPORTAMENTO A CRASH DI
MATERIALI COMPOSITI CFRP SOTTOPOSTI A
INVECCHIAMENTO IN AMBIENTE SALINO**

Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relatore

Prof. Maria Pia Falaschetti

Presentata da

Susanna Borelli

Correlatore

Prof. Enrico Troiani

Anno Accademico 2024/2025

*"Nella vita non c'è niente da temere,
solo da capire."*

- Marie Curie

Prefazione

La scelta di approfondire lo studio dei *materiali compositi* nasce dall'interesse verso le tecnologie impiegate nel settore aerospaziale, dove massa ridotta e alte prestazioni costituiscono requisiti indispensabili per lo sviluppo di sistemi strutturali efficienti. In questo contesto, i materiali compositi rinforzati in fibra di carbonio (CFRP) rivestono un ruolo centrale grazie all'elevato rapporto resistenza/peso e alla loro capacità di rispondere efficacemente a carichi statici e dinamici.

Il presente elaborato si inserisce in continuità con l'attività svolta durante il tirocinio curriculare, che ha portato alla stesura della relazione finale dal titolo “*Definizione di una campagna sperimentale per la caratterizzazione a crush di materiali compositi*”.

La tesi ne rappresenta un approfondimento e ha l'obiettivo di valutare l'influenza degli ambienti aggressivi sulle prestazioni dei CFRP. L'impiego dei protocolli di invecchiamento accelerato in laboratorio consente infatti di anticipare fenomeni di degrado che, nel corso della vita operativa, possono compromettere l'affidabilità dei componenti.

La struttura del lavoro prevede una parte introduttiva dedicata a presentare i concetti essenziali relativi ai materiali compositi e i principali meccanismi di deterioramento, seguita da una sezione in cui viene descritta la campagna sperimentale. I risultati ottenuti sono quindi analizzati e discussi, ponendoli in relazione con quanto riportato in letteratura. L'ultima parte raccoglie le conclusioni del lavoro, evidenziando i risultati principali, i limiti dello studio e i possibili sviluppi futuri.

Indice

Capitolo 1 - Introduzione ai materiali compositi.....	1
1.1 Matrici polimeriche.....	1
1.2 Fibre di Rinforzo	2
Capitolo 2 - Carbon Fiber Reinforced Polymer	4
2.1 Proprietà meccaniche dei laminati CFRP	4
2.2 Meccanismi di danneggiamento a crash	6
2.3 Energia assorbita e propagazione del danneggiamento	8
Capitolo 3 - CFRP T700/DT120	12
3.1 Sistema fibra-matrice impiegato	12
3.2 Realizzazione e cura dei laminati.....	13
3.3 Esposizione a invecchiamento.....	16
Capitolo 4 - Descrizione e analisi preliminari	17
4.2 Configurazione del piano sperimentale	17
4.2 Test a schiacciamento quasi-statico	18
4.3 Protocolli di invecchiamento	18
4.4 Provini vergini	19
4.5 Provini dopo 1 mese in soluzione salina.....	24
4.6 Confronto tra provini a 0 e 1 mese di invecchiamento	28
Capitolo 5 - Invecchiamento prolungato sui CFRP	30
5.1 Prestazioni dopo 5 mesi in <i>soluzione salina</i>	30
5.2 Prestazioni dopo 3 mesi in <i>Salt Spray Chamber</i>	37
5.3 Confronto tra campagne sperimentali	42
Capitolo 6 - Conclusioni	45
6.1 Riepilogo risultati.....	46
6.2 Sviluppi futuri.....	46
Bibliografia	47
Ringraziamenti	48

Capitolo 1

Introduzione ai materiali compositi

I *materiali compositi* rappresentano oggi una delle soluzioni più avanzate nel settore aerospaziale; il loro impiego è in continua crescita non solo in strutture primarie e secondarie degli aeromobili, ma anche in applicazioni spaziali, dove la riduzione della massa strutturale costituisce un fattore determinante per l'efficienza complessiva della missione.

In generale, un materiale composito è costituito da due componenti principali: le fibre, che rappresentano l'elemento resistente e conferiscono al sistema elevate proprietà meccaniche, e la matrice, la quale ha il compito di “inglobare” le fibre, trasferire i carichi e proteggere il rinforzo da agenti esterni. Quest'ultime possono appartenere a diverse categorie – come quelle polimeriche, ceramiche o metalliche - ognuna delle quali tipica di uno specifico campo di applicazione.

Questa possibilità di modulare il comportamento in funzione dei requisiti progettuali rende i compositi particolarmente idonei ad applicazioni in cui leggerezza, resistenza specifica e configurabilità strutturale rappresentano requisiti fondamentali.

1.1 Matrici polimeriche

La *matrice* rappresenta la fase continua del composito e svolge un ruolo fondamentale nel mantenere l'integrità geometrica del laminato, garantendo la coesione tra le fibre di rinforzo e permettendo al sistema di comportarsi come un materiale unitario.

Nei compositi strutturali di impiego aerospaziale, la matrice è tipicamente realizzata da *polimeri termoindurenti*, tra i quali le *resine epossidiche* risultano le più diffuse grazie alla loro elevata capacità di adesione alle fibre, alla buona stabilità termica e

alla ridotta suscettibilità al *creep*.

Oltre a sostenere il rinforzo durante l'applicazione dei carichi, la matrice contribuisce alla risposta del laminato nelle direzioni prive di fibre, influenzando la resistenza fuori piano e concorrendo alla dissipazione di energia nelle fasi iniziali di danneggiamento.

Questa fase svolge inoltre una funzione protettiva nei confronti delle fibre, schermandole da agenti ambientali potenzialmente dannosi. Tuttavia, fenomeni quali assorbimento d'acqua o la degradazione chimica possono compromettere la rigidità della matrice e l'efficacia dell'*interfaccia*, favorendo l'innescare di cricche e processi di *delaminazione*.

1.2 Fibre di Rinforzo

Le fibre di rinforzo costituiscono la fase strutturalmente resistente del materiale composito e sono le principali responsabili delle sue proprietà meccaniche, in particolare di rigidità e resistenza a trazione. La scelta del tipo di fibra incide profondamente sulle prestazioni finali del composito e può essere effettuata in funzione della natura chimica e delle prestazioni meccaniche. Le categorie più comuni includono:

1. *Fibre di vetro* (GFRP)
2. *Fibre di carbonio* (CFRP)
3. *Fibre aramidiche*

Un ruolo determinante è svolto dalla morfologia e dall'architettura fibrosa che influenzano la distribuzione degli sforzi e la risposta meccanica del materiale; tra le numerose configurazioni possibili, tre sono particolarmente rilevanti:

1. *Rovings unidirezionali* (UD), fasci di fibre orientate lungo un'unica direzione, ideali per massimizzare le proprietà meccaniche lungo un asse specifico.
2. *Tessuti bidirezionali*, intrecci ortogonali di fibre (ordito e trama) che conferiscono resistenza sia lungo l'asse longitudinale ("warp") sia trasversale

("weft").

3. *Strutture multiassiali*, o *non-crimps fabrics*, sovrapposizioni di strati orientati in più direzioni (es. 0° , $\pm 45^\circ$, 90°) che permettono di ottimizzare la risposta meccanica multidirezionale riducendo l'effetto di *crimp*.

Per facilitarne la comprensione della morfologia, in **Figura 1** è riportato un esempio grafico di laminato composito bidirezionale ($0^\circ/90^\circ$) ottenuto da strati unidirezionali ortogonali.

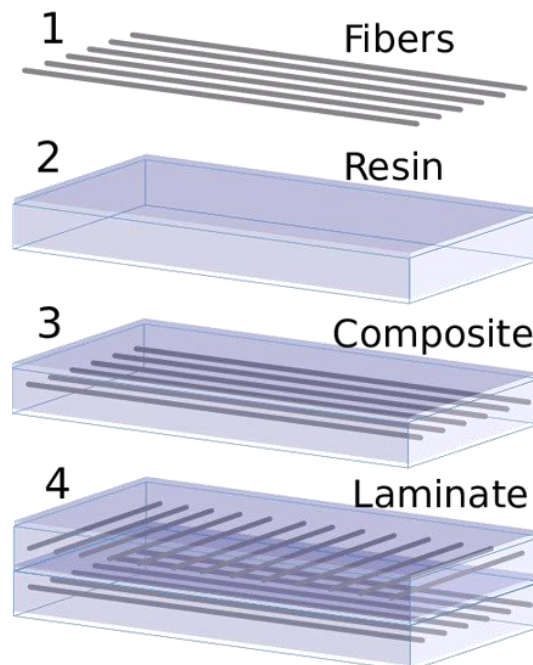


Figura 1: Schema di laminato composito bidirezionale ($0^\circ/90^\circ$) ottenuto da strati unidirezionali

Complessivamente, il comportamento del laminato è determinato da una combinazione di fattori: tipologia di fibra, volume di rinforzo, orientazione e architettura delle fibre. Particolarmente rilevante è la qualità dell'interfaccia fibra-matrice, che condiziona la capacità del materiale di trasferire efficacemente i carichi, la resistenza a fatica e i meccanismi di danneggiamento – quali *debonding* di interfaccia, *pull-out* delle fibre e *delaminazione* -.

Capitolo 2

Carbon Fiber Reinforced Polymer

I materiali compositi rinforzati in fibra di carbonio (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) rappresentano una delle soluzioni più avanzate e versatili nel campo dell'ingegneria dei materiali. Sebbene siano già stati introdotti nei capitoli precedenti, si rende necessario un approfondimento mirato per esaminare le loro proprietà meccaniche e il comportamento sotto specifiche condizioni di sollecitazione.

2.1 Proprietà meccaniche dei laminati CFRP

Tra le caratteristiche meccaniche più rilevanti si evidenziano:

1. *Elevata rigidità;*
2. *Alta resistenza a trazione;*
3. *Comportamento fragile.*

La rottura avviene in modo improvviso e senza deformazione plastica significativa; questo comportamento è dovuto alla scarsa duttilità della matrice polimerica e alla natura fragile delle fibre stesse (i valori tipici sono riportati in **Tabella 1** e **Tabella 2**).

Tuttavia, per una valutazione completa del comportamento strutturale dei laminati CFRP, è necessario considerare anche aspetti secondari ma altrettanto rilevanti:

1. *Buona resistenza a fatica*

Sebbene i CFRP siano fragili a rottura, mostrano una notevole capacità di resistere a carichi ciclici, soprattutto lungo la direzione delle fibre, caratteristica che li rende adatti a strutture soggette a vibrazioni/sollecitazioni ripetute.

2. Vulnerabilità fuori piano

Come già accennato, la resistenza dei CFRP è elevata nel piano laminato, ma significativamente inferiore nella direzione dello spessore; questa anisotropia rende il materiale sensibile a impatti fuori-piano, delaminazioni e carichi trasversali, che possono compromettere l'integrità strutturale.

3. Sensibilità a difetti di produzione

La qualità del processo produttivo è cruciale: difetti come porosità, disallineamento delle fibre o imperfezioni nella laminazione riducono in generale le prestazioni meccaniche.

Tabella 1 : Proprietà generali della fibra di carbonio (FC)

<i>Proprietà</i>	<i>Valori Tipici</i>	<i>Note</i>
Modulo elastico (E)	230 - 600 GPa	Dipende dal tipo di fibra
Resistenza a rottura	3 - 7 GPa	Elevata lungo direzione fibre
Allungamento a rottura	0,5 - 2%	Scarsa deformazione plastica
Densità	1,75 – 1,95 g/cm ³	Circa ¼ dell'acciaio

Tabella 2 : Proprietà della matrice (resina epossidica curata)

<i>Proprietà</i>	<i>Valori tipici</i>	<i>Note</i>
Natura chimica	Resina epossidica	Termoindurente
Temperatura di cura	120 – 200 °C	Dipende dal sist. epossidico
Densità resina curata	1,1 – 1,3 g/ cm ³	Inferiore rispetto alla fibra
Modulo elastico (E)	2 – 4 GPa	Più basso rispetto a FC
Allungamento a rottura	2 – 5 %	Più duttile di FC, ma fragile rispetto ai metalli

2.2 Meccanismi di danneggiamento a crash

Il comportamento a *crash* dei laminati CFRP è critico per la loro affidabilità strutturale. Tra i più comuni meccanismi di danneggiamento si evidenziano: *cricche*, *delaminazione* e instabilità locale (*microbuckling*) che possono compromettere la resistenza residua anche in assenza di rottura macroscopica.

Cricche nella matrice (“Matrix Cracking”)

Le cricche, schematizzate in

Figura 2, si formano nella matrice polimerica quando l'energia dell'urto supera la sua tenacità: le fratture si propagano lungo le direzioni deboli del laminato e si manifestano inizialmente come microfratture parallele alla direzione delle fibre.

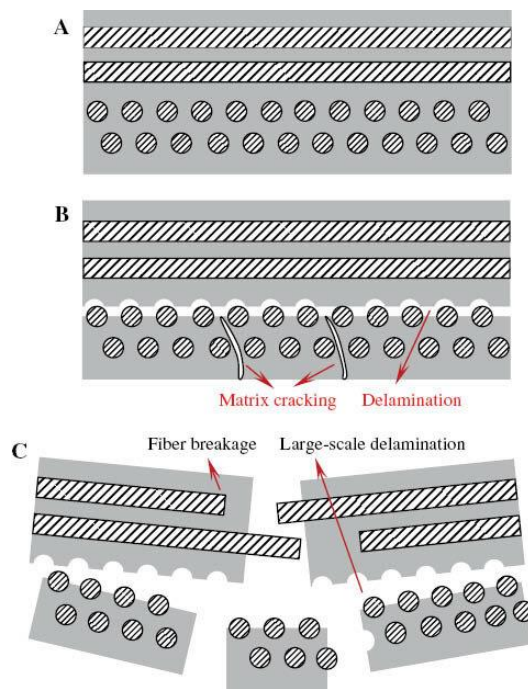


Figura 2: Rappresentazione schematica della propagazione della cricca

Queste microfratture non causano immediata rottura del componente, ma fungono da innesco per danni più gravi, come la delaminazione, e alterano la distribuzione degli sforzi nel laminato.

Delaminazione

La delaminazione rappresenta uno dei danni più critici nei compositi stratificati. Consiste nella separazione interlaminare tra i vari layer del materiale ed è causata da sollecitazioni fuori piano o, ove presenti, difetti di fabbricazione.

La propagazione della delaminazione può essere descritta secondo tre modalità di frattura (**Figura 3**):

1. *Modo I* (apertura), caratterizzato da una separazione perpendicolare al piano del laminato;
2. *Modo II* (scorrimento), in cui si verifica uno slittamento tangenziale tra gli strati lungo il piano della delaminazione;

3. *Modo III* (strappo), associato ad uno scorrimento fuori piano parallelo al fronte di cricca.

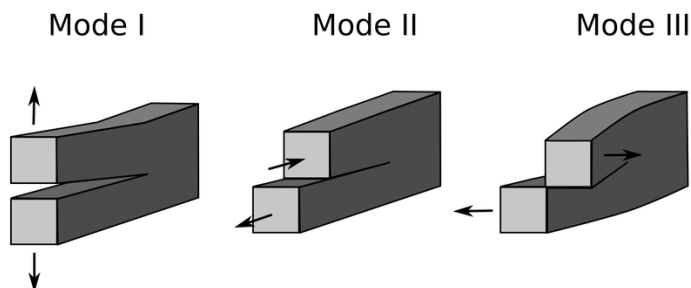


Figura 3: Grafica dei tre metodi di delaminazione

In condizioni operative reali, la presenza di delaminazione nei compositi CFRP può portare a cedimenti improvvisi, in particolare in condizioni di carichi critici o in ambienti dinamici – come quelli aerospaziali. In particolare, questo tipo di danneggiamento riduce la capacità del materiale di dissipare energia da impatto, riducendo la tolleranza ai danni e aumentando la vulnerabilità a ulteriori sollecitazioni. La riparazione di tali difetti risulta spesso complessa e onerosa, richiedendo interventi specifici e talvolta la sostituzione del componente. Di conseguenza, la conoscenza approfondita dei meccanismi di delaminazione e delle modalità di propagazione sono essenziali per lo sviluppo di strategie di prevenzione e per garantire la durabilità e la sicurezza delle strutture realizzate in CFRP.

Instabilità locale delle fibre (microbuckling)

A causa di piccoli disallineamenti iniziali e della limitata resistenza a taglio della matrice, le fibre possono instabilizzarsi formando *kink bands*, con una rapida riduzione della rigidezza e della capacità portante del laminato.

Il microbuckling, raffigurato schematicamente in **Figura 4**, è spesso associato all'innescò di delaminazioni e fenomeni di frammentazione progressiva del materiale, risultando particolarmente rilevante nella risposta a schiacciamento e nei processi di assorbimento di energia in condizioni di crash.

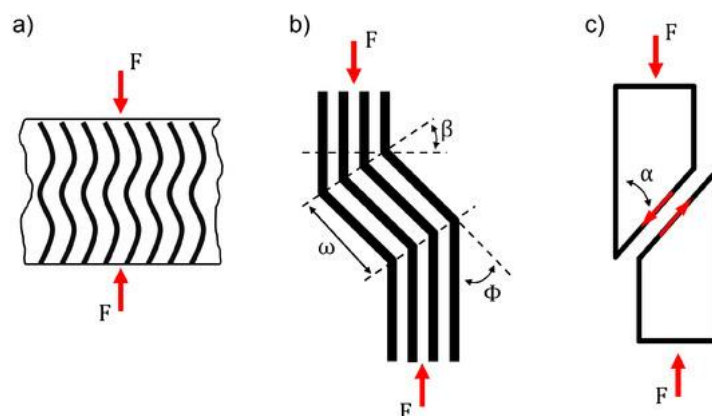


Figura 4: a) instabilità locale delle fibre; b) geometria delle kink bands; c) rottura a taglio

2.3 Energia assorbita e propagazione del danneggiamento

Il comportamento dei materiali compositi CFRP in compressione quasi-statica è fortemente condizionato dalla loro marcata *anisotropia*: la risposta meccanica dipende dalla direzione di carico rispetto all'orientazione delle fibre, dalla sequenza di laminazione e dalla frazione volumica di rinforzo. Laminati con orientazione prevalente 0° rispetto all'asse di schiacciamento manifestano collassi *fibra-dominant*, mentre configurazioni più bilanciate ($\pm 45^\circ$, 90°) inducono una quota maggiore di deformazione governata dalla matrice e dall'interfaccia, con effetti diretti su meccanismi di danneggiamento e sulla capacità di assorbimento dell'energia. Negli elementi strutturali progettati per la *crashworthiness*, lo schiacciamento lungo l'asse principale è concepito per innescare un collasso progressivo e controllato, con un fronte di danneggiamento che avanza gradualmente lungo la lunghezza del componente, garantendo una dissipazione efficace dell'energia dovuta all'impatto.

Analiticamente, i meccanismi di rottura si riflettono sulla tipica curva *carico-spostamento* del provino, la quale presenta una fase iniziale di aumento del carico, fino a un picco massimo (associato all'innescio del collasso), seguita da una regione caratterizzata da una sequenza di picchi e plateau (**Figura 5**). I picchi locali

corrispondono a eventi di danneggiamento più intenso (nuove fratture di fibre, delaminazioni estese), mentre i plateau rappresentano fasi in cui il fronte di frantumazione avanza in modo più regolare. L'ideale, in ottica di *crashworthiness*, sarebbe un comportamento con plateau relativamente stabile e senza bruschi cali di carico, così da garantire una dissipazione controllata e prevedibile dell'energia.

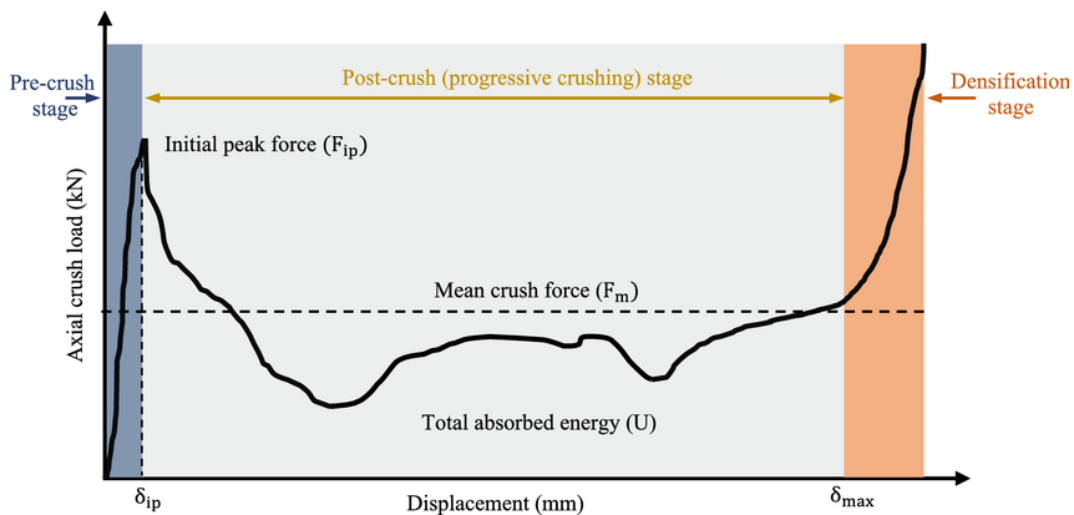


Figura 5: Schema esemplificativo della curva carico-spostamento

Il diagramma di *crash* ci consente di avere una panoramica chiara delle grandezze in gioco, in particolare:

1. Spostamento (*Displacement*)

Lo spostamento l – è la quantità di “struttura sacrificata” durante l’evento d’impatto, ossia la lunghezza lungo l’asse di schiacciamento che il componente percorre dalla condizione iniziale fino alla configurazione deformata finale.

2. Forza di picco iniziale (F_{ip})

La forza massima, o carico massimo, è il valore di picco della forza registrata sul diagramma forza-spostamento; è generalmente associato all’innescio del collasso globale.

3. Forza media di schiacciamento (F_m)

La forza media di schiacciamento, o carico sostenuto, rappresenta il valore medio della forza durante la fase di collasso progressivo. Può essere definita in funzione della corsa massima come

$$F_m = \frac{l}{l_{max}} \int_l^{l_{max}} F(l) dl$$

dove $F(l)$ è la forza misurata in funzione della corsa l .

4. Total Absorbed Energy (U)

L' *Energy Absorbed* (EA), indicata nel grafico con U , è pari all'area totale sottesa al diagramma forza-spostamento e rappresenta la quantità di energia dissipata dal componente durante lo schiacciamento

$$EA = \int_l^{l_{max}} F(l) dl$$

5. Specific Energy Absorption (SEA)

Definita come l'energia assorbita per unità di massa del componente sottoposto a schiacciamento ed è tipicamente espressa in J/g (o J/kg):

$$SEA = \frac{EA}{m}$$

Con m la massa del provino o dell'elemento testato. Questo parametro consente il confronto tra configurazioni e materiali diversi su base peso-specifica, risultando particolarmente rilevante per applicazioni aerospaziali.

6. Pre-crush stage

Fase iniziale del processo di schiacciamento che precede il collasso progressivo "utile" per l'assorbimento di energia. In questa fase:

- i. La struttura è sostanzialmente integra – deformazioni inizialmente elastiche, poi plastiche/localizzate;
- ii. La forza cresce rapidamente fino al raggiungimento di F_{ip} ;

- iii. Si attivano i meccanismi di innesco del collasso (trigger geometrico, instabilità locali, delaminazioni).

Dal punto di vista dell'EA, il pre-crush stage contribuisce limitatamente al computo dell'energia totale assorbita, ma è cruciale per definire ed analizzare il punto di innesco del crushing progressivo.

7. *Densification stage*

Fase finale del processo di schiacciamento, quando la struttura è ormai fortemente danneggiata. In questa fase:

- i. Il materiale danneggiato viene ulteriormente compresso e “densificato”;
- ii. La rigidità appare crescente;
- iii. La deformabilità residua è molto bassa – l'elemento non opera più in modo efficiente come assorbitore di energia.

Per la progettazione *crashworthy*, l'obiettivo è massimizzare l'EA nel plateau di crushing progressivo (tra δ_{ip} e δ_{max}) e ritardare il più possibile l'ingresso dell'ultima fase.

Capitolo 3

CFRP T700/DT120

Nel presente capitolo verranno analizzate le caratteristiche meccaniche del materiale impiegato nella sperimentazione condotta per questa tesi, con particolare riferimento alla risposta del composito a sollecitazioni di schiacciamento quasi-statico (*crash*). Saranno inoltre approfondite la configurazione dei provini, la natura

della fibra e della matrice utilizzate, nonché le caratteristiche prestazionali che ne derivano.

3.1 Sistema fibra-matrice impiegato

Il materiale composito impiegato per la realizzazione dei provini è un composito CFRP ottenuto mediante sovrapposizione di 32 strati di *pre-preg* unidirezionale, ciascuno costituito da fibre di carbonio ad alta resistenza (*T700-150*) e matrice epossidica termoindurente (*DTI20-36*). Il *pre-preg* è fornito sottoforma di nastro in rotolo, con larghezza pari a 600mm e grammatura di 150 g/m², conservata in congelatore a -18 °C per inibire l'avvio prematuro della reazione di *polimerizzazione* e garantire la stabilità del sistema nel tempo.

La fibra di carbonio utilizzata è una *PAN-based* di tipo *T700-150* (*standard modulus, high strength*), in grado di fornire elevate prestazioni e una buona stabilità dimensionale, risultando particolarmente adeguata alla realizzazione di laminati strutturali sottoposti a carichi di compressione. In modo rigoroso, le proprietà della suddetta fibra vengono riportate nella **Tabella 3**.

Tabella 3: Proprietà FC di tipo T700

<i>Proprietà</i>	<i>Valori tipici</i>
Modulo elastico (E)	230 - 240 GPa
Resistenza a rottura	4,8 - 5 GPa
Allungamento a rottura	1,9 %
Densità	1,7 – 1,8 g/cm ³

La matrice del nostro laminato è una resina epossidica termoindurente *toughened* di tipo *DTI20-36*, sviluppata per applicazioni strutturali con la finalità di garantire buone proprietà meccaniche in condizioni standard e ambienti caldi. La sua

formulazione è ottimizzata per l'utilizzo in autoclave, assicurando una buona impregnazione del rinforzo e un contenuto di vuoti ridotto. Come per le FC, anche per la matrice sono riportate le proprietà principali nella **Tabella 4** sottostante.

Tabella 4 : Proprietà resina epossidica (curata) DT120-36

<i>Proprietà</i>	<i>Valori tipici</i>
Temperatura di cura	80 – 135 °C
Densità resina curata	1,22 g/ cm ³
Modulo elastico (E)	2 – 3 GPa
Allungamento a rottura	3 - 5 %

In sintesi, la combinazione T700-150 / DT120-36 permette di ottenere un laminato CFRP con elevate prestazioni specifiche, stabilità termica e resistenza all'impatto, risultando particolarmente adatto allo studio del comportamento a *crash*.

3.2 Realizzazione e cura dei laminati

Come già accennato, le lastre di materiale composito, da cui sono stati successivamente ricavati i provini, sono state realizzate mediante sovrapposizione di strati pre-preg unidirezionali con una sequenza di laminazione globale riconducibile a uno schema $[0_2/90_2]_{4s}$. In particolare, procedendo dalla superficie esterna verso l'interno, il *lay-up* è stato ottenuto disponendo inizialmente due strati orientazione delle fibre a 0°, seguiti da due strati con FC a 90°; a metà spessore la sequenza viene invertita, con due strati a 90° e due a 0°, ripetendo questo schema fino al 32° layer (in modo da garantire simmetria del laminato rispetto al piano medio). Gli strati di pre-preg sono stati posizionati tra due lastre di vetro, anteceduti da uno strato di distaccante liquido (*Locite Frekote 100NC*) per garantire la corretta estrazione del laminato, mantenere il corretto allineamento delle fibre e garantire una buona planarità del laminato durante la fase di cura. L'intero pacchetto è stato quindi inserito in un sacco sottovuoto completo di materiali

bleeder/breather, in modo da consentire l'evacuazione dell'aria e la gestione dei gas durante la polimerizzazione.

Il ciclo di cura, graficato in ***Error! Reference source not found.***, è stato eseguito in autoclave secondo le specifiche del sistema T700-150/DT120-36: temperatura di 120 °C e pressione 5 bar per una durata di 90 minuti. La temperatura è stata incrementata e successivamente ridotta con un delta di ± 2 °C/min, in sovrapposizione a una rampa di pressione fino al raggiungimento dei 5 bar. Per l'intera durata del ciclo di cura, il sacco è stato mantenuto a -1 bar rispetto alla pressione ambiente, garantendo così un adeguato compattamento del laminato e un contenuto di vuoti ridotto.

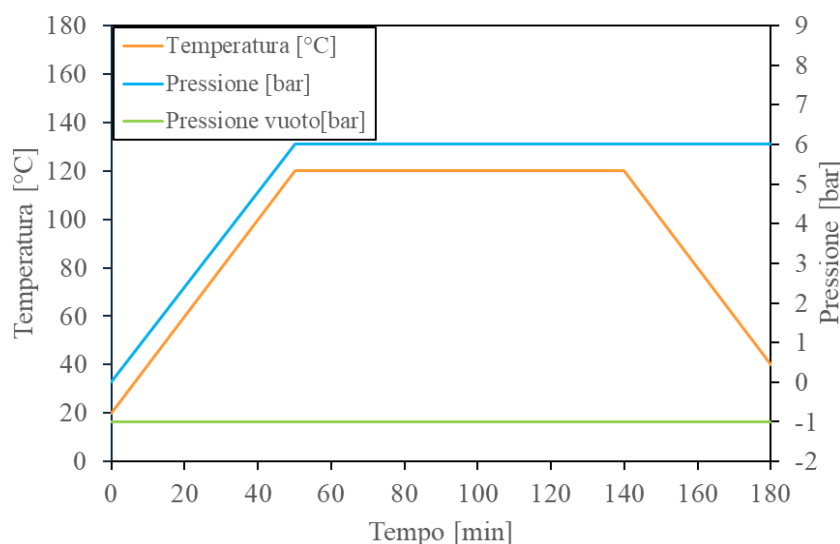


Figura 6: Ciclo in autoclave

Le lastre di laminato (400 x 400 mm) sono state successivamente tagliate mediante fresa ottenendo 41 provini (dimensioni teoriche: 130 x 40 x 45 mm), di cui 34 sono stati ricavati con direzione principale delle fibre a 0° e 7 con direzione a 90° (delle prime 2 sono stati scartati per difetti, mentre delle seconde citate due erano difettati).

I provini sono stati successivamente rifiniti in modo da garantire l'ortogonalità degli spigoli ed è stato realizzato un *45-degree steeple trigger* su un'estremità (**Figura 7**). Il trigger, ottenuto tramite smussatura post-cura, introduce un indebolimento

localizzato volto ad innescare e guidare in modo controllato il collasso del provino, favorendo la propagazione della delaminazione a partire da una zona di concentrazione di tensioni.

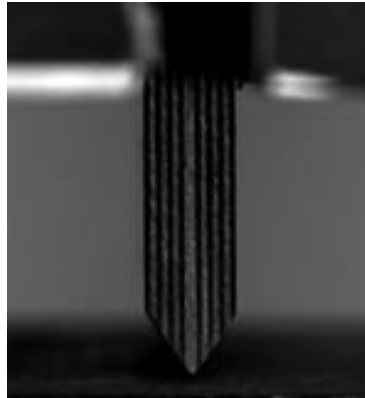


Figura 7: Dettaglio del 45-degree steeple trigger su un'estremità del provino

Nel complesso, per il sistema T700-150/DT120-36 con trigger a 45° ci si aspetta, nei provini 0°, un collasso progressivo guidato dalla zona di innesco, con un buon compromesso tra picco iniziale, plateau di carico e energia assorbita; nei provini con orientazione a 90°, invece, ci si aspetta una risposta meccanica più debole e maggiormente influenzata dalla matrice e dall'interfaccia (utile come termine di confronto per evidenziare il ruolo dell'orientazione e dei meccanismi di danneggiamento sulla *crashworthiness* del composito).

3.3 Esposizione a invecchiamento

In teoria, essendo il materiale composito caratterizzato da una matrice epossidica sensibile all'assorbimento di umidità, è ragionevole aspettarsi che l'esposizione prolungata ad ambiente salino modifichi la risposta a compressione dei provini. In particolare, questa esposizione potrebbe indurre fenomeni di plasticizzazione con riduzione del modulo elastico, nonché un indebolimento dell'interfaccia fibra-matrice. Di conseguenza, ci si attende una diminuzione della rigidità iniziale del sistema e una riduzione della forza di picco iniziale (F_{ip}) rispetto al materiale

vergine, in quanto l'innesco dei meccanismi di danneggiamento può avvenire a valori di carico inferiori.

Dal punto di vista della curva forza-spostamento, tali modifiche possono tradursi in un plateau di schiacciamento meno regolare e, in generale, in una riduzione dell'energia totale assorbita (EA) e dell'energia specifica assorbita (SEA). In alcune condizioni, una matrice più plasticizzata potrebbe contribuire a rendere il collasso localmente più morbido, attenuando parzialmente il picco iniziale con conseguente aumento della *crash force efficiency* CFE (intesa come rapporto tra F_m / F_{ip}); tuttavia, questo effetto verrebbe controbilanciato dalla diminuzione del carico medio di schiacciamento F_m .

In termini di danneggiamento, rispetto ai provini vergini, potremmo supporre che i nei materiali invecchiati siano presenti un maggior numero di delaminazioni estese, una più facile nucleazione di microcricche nella matrice e una propagazione più rapida delle zone danneggiate a partire dal trigger. Al termine di questo elaborato il confronto tra provini vergini e invecchiati, in termini di F_m , F_{ip} , EA , SEA e CFE , consente di valutare quantitativamente l'impatto dell'invecchiamento in ambiente salino sulla *crashworthiness* del laminato CFRP studiato.

Capitolo 4

Descrizione e analisi preliminari

Il presente capitolo ha l'obiettivo di descrivere la campagna sperimentale adottata per valutare l'effetto dell'invecchiamento in ambiente salino sul comportamento a *crash* dei provini di laminato CFRP T700-150/DT120-36. Dopo una presentazione delle serie di provini e delle condizioni specifiche di esposizione, si riportano sinteticamente alcuni risultati già disponibili relativi ai provini nelle condizioni di 0 mesi (materiale vergine) e 1 mese di immersione in soluzione salina. Tali risultati, ottenuti in una precedente tesi sperimentale (*Analisi degli effetti di invecchiamento in immersione su materiali compositi*), comprendono sia i dati quantitativi (*carico massimo, forma media di schiacciamento, EA, SEA*) sia i diagrammi forza-spostamento rappresentativi del comportamento a crash per le due condizioni di invecchiamento considerate.

4.1 Configurazione del piano sperimentale

I provini oggetto di prova sono stati ricavati dalle lastre di laminato descritte nel capitolo precedente e differenziati, sia in funzione dell'orientazione principale delle fibre (0° e 90°) che del tempo e del tipo di invecchiamento.

Come riferimento è stata considerata una condizione iniziale (0 mesi) corrispondente al materiale non esposto ad ambienti aggressivi. In questa configurazione sono stati ottenuti complessivamente 8 provini:

- i. 7, di cui 1 difettato, con orientazione delle fibre a 0° ;
- ii. 1 con orientazione a 90° .

Per valutare l'effetto di un'esposizione relativamente breve ad ambiente salino, è stato definito uno stato di invecchiamento a 1 mese in immersione; con questa modalità sono stati analizzati quattro provini, di cui:

- i. 3 con orientazione delle fibre a 0° ;
- ii. 1 con orientazione a 90° .

Per tempi più lunghi di esposizione sono state considerate due ulteriori configurazioni:

- i. 5 mesi in immersione salina, per i quali sono stati preparati 4 provini a 0° ;
- ii. 3 mesi in camera a nebbia salina, con un totale di 8 provini di cui 7 a 0° , compreso 1 difettato, e 1 a 90° .

4.2 Test a schiacciamento quasi-statico

Le prove di *crash* sono state eseguite utilizzando una pressa idraulica con opportuno sistema di fissaggio (*fixture*) per il corretto alloggiamento dei provini, in modo da limitare fenomeni di instabilità globale ed assicurare un allineamento quanto più possibile assiale tra la direzione di applicazione del carico e l'asse del provino.

I test sono stati condotti in condizioni di schiacciamento quasi-statico, imponendo uno spostamento controllato della traversa con velocità pari a circa 2 mm/min. Per tutte le configurazioni analizzate, i provini sono stati posizionati con il *45-degree steeple trigger* orientato verso il basso, favorendo l'innescò del collasso dell'estremità inferiore e garantendo uno sviluppo del *crushing* lungo l'asse del campione. Durante la prova sono stati acquisiti continuamente i valori di carico applicato e spostamento assiale della traversa, così da poter ricavare le curve forza-spostamento utilizzate per l'analisi dei parametri caratteristici della *crashworthy*.

4.3 Protocolli di invecchiamento

La simulazione di un'atmosfera aggressiva è stata effettuata tramite esposizione dei provini in una camera a nebbia salina (*Salt Spray Chamber, SC450*, prodotta da

Weiss Umwelttechnik Ges.m.b.H e fornita da Premium Aerotech).

Il programma di prova è basato sulla normativa standard ISO 9227:2017, secondo il metodo *Neutral Salt Spray (NSS)*: all'interno dell'abitacolo viene nebulizzata in continuo una soluzione di acqua demineralizzata NaCl al 5% (considerando un errore approssimativo di $\pm 1\%$), in condizioni controllate di temperatura, umidità e portata (riportate in **Tabella 5**).

Tabella 5: Parametri operativi della Salt Spray Chamber

Temperatura ambiente di prova	35 °C
Temperatura circuito di umidificazione	49 °C
Pressione interna della camera	1 bar
Portata di soluzione	25 ml/h

I provini sono stati collocati all'interno della *Salt Spray Chamber* in modo da garantire un'esposizione uniforme all'*aerosol* salino e sono stati mantenuti in nebbia continua per i tempi indicati dalla campagna sperimentale.

Parallelamente alle prove in nebbia salina, è stato adottato un protocollo di invecchiamento per immersione, al fine di valutare un contatto diretto e continuativo del laminato con l'ambiente aggressivo. Per questa fase, è stata utilizzata una soluzione di acqua demineralizzata al 5% di NaCl (si considera un errore approssimativo di $\pm 1\%$), mantenuta ad una temperatura ambiente pari a circa 25 °C.

4.4 Provini vergini

Nella **Tabella 6** sono riportati i dati di crash ottenuti dalle prove sui provini vergini, eseguite secondo le modalità descritte nei capitoli precedenti. I dati includono: forza media di schiacciamento (F_m), forza di picco iniziale (F_{ip}), energia assorbita totale (EA) e specifica (SEA), oltre all'efficienza di crash (CFE), fornendo un quadro completo del comportamento meccanico dei campioni durante lo schiacciamento.

Per completezza di indagine, nella tabella è stata aggiunta la *SEA steady state*, ossia la SEA calcolata solo nella fase più “stabilizzata” della curva, escludendo i picchi e le oscillazioni iniziali. I suddetti parametri, analizzati congiuntamente e supportati da indici statistici di dispersione quali la *deviazione standard* ed il coefficiente di variazione (*CoV*), consentono di confrontare in modo oggettivo le prestazioni dei diversi campioni.

Deviazione standard (Dev. Str.)

Quantifica la dispersione dei dati rispetto alla loro media. Valori contenuti indicano che le misure sono concentrate attorno alla media; al contrario, segnalano una maggiore variabilità e una distribuzione più ampia dei risultati.

Coefficiente di variazione (CoV)

È un indice relativo che esprime il rapporto tra deviazione standard e media:

$$CoV [\%] = \frac{\text{dev. str.}}{\text{media}} \times 100$$

Nel contesto delle prove sperimentali adottate sui provini, è possibile adottare, in prima approssimazione, le seguenti soglie indicative per l’interpretazione del CoV:

- i. < 10% → dispersione bassa, ottima ripetibilità;
- ii. 10% – 20% → dispersione moderata, ripetibilità discreta;
- iii. > 20% → dispersione alta, poca ripetibilità.

Tra i provini analizzati:

- i. i campioni 0_5 e 0_9_90 sono stati esclusi dalla rappresentazione grafica dei risultati in quanto: 0_5 mostra un comportamento anomalo rispetto agli altri provini con fibre a 0°, mentre lo 0_9_90 ha fibre a 90° per cui schematizzato separatamente;
- ii. Lo 0_8_D e il 0_9_90 non sono riportati nella tabella generale in quanto, a causa della loro natura, non sono stati coinvolti nei calcoli di media,

deviazione standard e CoV (sono comunque stati inseriti in **Tabella 7** a parte).

Tabella 6: Dati riassuntivi a crash test dei provini vergini

	F_m [kN]	F_{ip} [kN]	EA [J]	SEA [J/g]	SEAss [J/g]	CFE %
<i>0_1</i>	5,23	22,73	236,91	27,60	27,34	23,0
<i>0_2</i>	3,12	22,68	160,38	23,75	22,14	14,0
<i>0_3</i>	5,72	28,08	251,29	28,81	27,56	20,0
<i>0_4</i>	4,13	24,15	197,28	26,27	25,81	17,0
<i>0_5</i>	4,29	20,61	203,90	28,95	26,57	21,0
<i>0_6</i>	3,23	22,57	164,23	23,11	22,02	14,0
<i>0_7</i>	2,58	19,28	142,36	22,24	21,43	13,0
<i>Media</i>	4,043	22,32	193,764	25,819	24,696	17,43
<i>Dev. Str.</i>	1,065	2,589	37,635	2,579	2,516	3,66
<i>CoV %</i>	26,35	11,32	19,42	9,99	10,19	20,99

Tabella 7: Dati riassuntivi dei provini 0_8_D e 0_9_90

<i>0_8_D</i>	2,05	23,34	118,08	20,93	19,37	9,0
<i>0_9_90</i>	1,53	22,32	111,26	19,29	18,40	7,0

Dallo studio dei dati in **Tabella 6** emergono alcune significative considerazioni sulla *crashworthiness* dei provini in condizioni iniziali (0 mesi di invecchiamento).

La forza media di schiacciamento (F_m), calcolata nel tratto compreso tra 5 e 35 mm, varia da un minimo di 2,58 kN (provino 0_7) a un massimo di 5,72 kN (provino 0_3), con un valore medio pari a circa 4,04 kN.

I *load* massimi (F_{ip}) risultano complessivamente uniformi tra i diversi provini, con una media di circa 23 kN. Alcuni campioni, come il 0_3, raggiungono tuttavia picchi più elevati (28,08 kN), indicativi di una maggiore rigidità iniziale e di una

capacità superiore di opporsi al carico nella fase di *pre-crash*. Dal punto di vista pratico, un picco di carico molto elevato non è necessariamente positivo: se da un lato testimonia una buona resistenza iniziale, dall'altro può generare sollecitazioni poco controllate (non ideali in ottica di protezione degli occupanti in uno scenario di *crash* reale). Al contrario, un *peak load* più moderato, accompagnato da un plateau di schiacciamento relativamente stabile, favorisce un assorbimento di energia più progressivo e moderato (nel nostro caso, lo 0_1 può esserne un esempio).

Le prove mostrano inoltre una buona ripetibilità per i principali parametri di carico ($CoV \approx 10\text{--}12\%$), mentre una maggiore dispersione è osservata per i parametri F_m e $CFE\%$, con CoV superiore al 20%. Ne consegue che questi parametri sono meno robusti poiché risentono in misura più marcata delle variabilità tra provini e delle condizioni sperimentali (andamenti delle curve visibili in

,
.a, Figura 9.b).

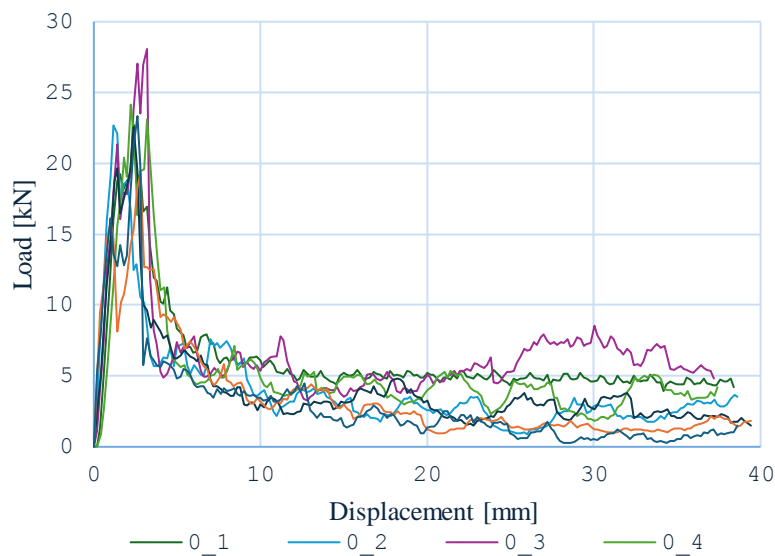


Figura 8: Curva carico-spostamento provini vergini

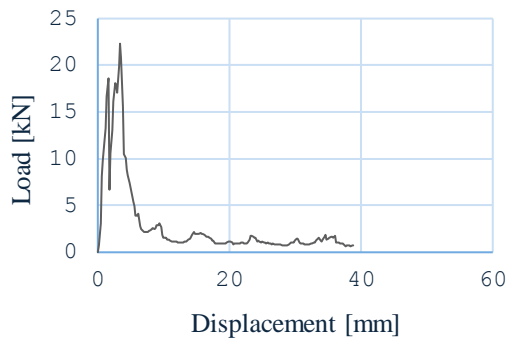


Figura 9.a: Curva carico-spostamento 0_9_90



Figura 9.b: Curva carico-spostamento 0_5

L'energia assorbita (*EA*) presenta valori compresi tra 142,36 J (provino 0_7) e 251 J (provino 0_3), con una media di circa 194 J. In particolare, i provini con fibre orientate a 0° (vedesi i valori di 0_1, 0_3, 0_5) sono caratterizzati da valori di *EA* elevati se confrontati rispetto a quelli di 0_9_90 (111 J), confermando il ruolo determinante dell'orientazione delle fibre nella capacità di assorbimento di energia del laminato.

La *Specific Energy Absorption (SEA)* è caratterizzata da picchi, per i provini 0_5 (28,9 J/g) e 0_3 (28,8 J/g), un minimo associato al 0_7 (22,24 J/g) e un valore medio di 25,8 J/g (**Figura 10**). Anche in questo caso, il campione con fibre a 90° (0_9_90: 19,29 J/g) e il provino difettato (0_8_D: 20,93 J/g) mostrano prestazioni inferiori rispetto ai campioni a 0° .

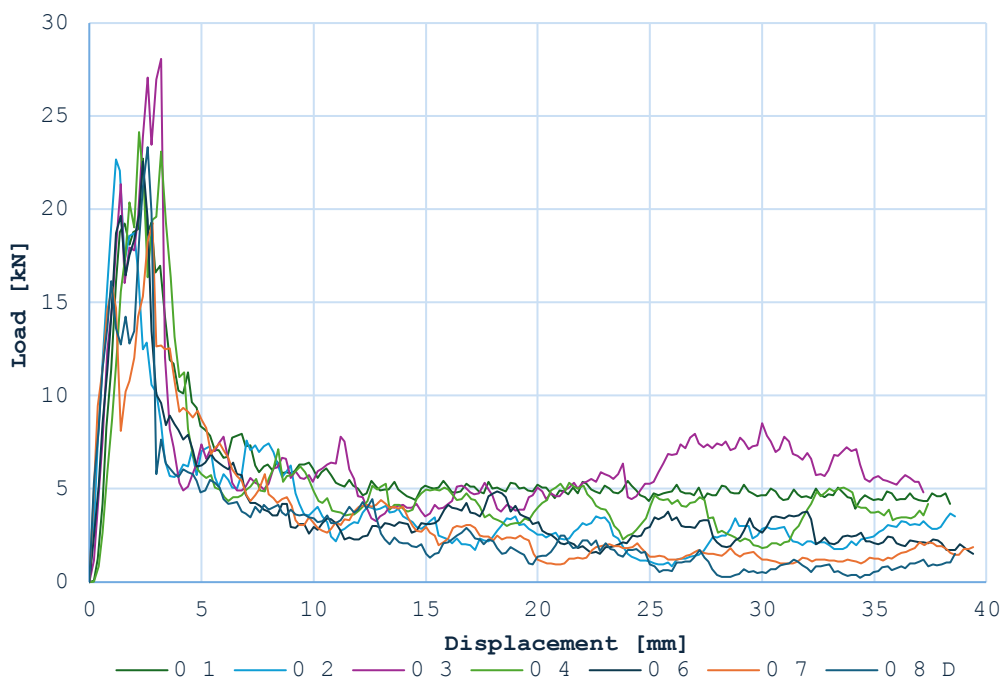


Figura 10: Andamento SEA-displacement

L'efficienza di schiacciamento (*Crash Force Efficiency, CFE*), ha un valore medio pari a circa 17,4% con picchi su 0_1 (23%) e 0_5 (21%) e dei minimi nei provini 0_9_90 (7%) e 0_8_D (9%), indicativi di un collasso più fragile e poco stabile.

In sintesi, i provini con fibre orientate a 0° mostrano mediamente proprietà meccaniche migliori, in accordo con un collasso *fibra-dominant* più efficace. Al contrario, il campione con fibre a 90° e il difettato 0_8_D hanno prestazioni inferiori, confermando la forte influenza dell'orientazione delle fibre di rinforzo e della qualità del laminato sulla risposta a schiacciamento.

4.5 Provini dopo 1 mese in soluzione salina

I risultati relativi ai provini sottoposti ad 1 mese di invecchiamento in soluzione salina mostrano un degrado non trascurabile delle prestazioni rispetto al materiale vergine, visibili immediatamente dai dati riportati in **Tabella 8** e **Tabella 9** (i corpi di prova 1_1, 1_2, 1_3 hanno orientazione delle fibre di rinforzo a 0° , mentre 1_4_90

a 90°). Anche in questo caso, 1_4_90 è stato tolto dalla tabella generale a causa della sua diversa natura morfologica; verrà quindi analizzato separatamente.

Tabella 8: Dati riassuntivi dei test a crash dei provini a 0° dopo 1 mese di immersione

	F_m [kN]	F_{ip} [kN]	EA [J]	SEA [J/g]	SEAss[J/g]	CFE %
<i>I_1</i>	2,544	21,896	134,325	21,937	20,130	11,6
<i>I_2</i>	3,795	19,266	187,468	25,094	24,396	19,7
<i>I_3</i>	2,296	20,902	143,238	21,531	21,108	11,9
<i>Media</i>	2,945	20,688	155,010	22,854	21,878	14
<i>Dev. Str</i>	0,601	1,084	23,238	1,593	1,825	4%
<i>CoV %</i>	20,413	5,242	14,991	6,969	8,341	25,897

Tabella 9: Dati riassuntivi del test a crash del provino 1_4_90 dopo 1 mese di immersione

<i>I_4_90</i>	1,247	26,220	102,575	18,550	17,830	4,8
---------------	-------	--------	---------	--------	--------	-----

La forza media di schiacciamento, nel tratto compreso tra i 5 e i 35 mm, risulta pari a circa 2,95 kN, valore sensibilmente inferiore rispetto a quello ottenuto per i provini non invecchiati (è quindi evidente una riduzione della capacità portante stabile durante la fase di *crushing*).

Al contrario, la forza di picco presenta una media di circa 20,7 kN, non distante dalla misurazione ottenuta per i campioni vergini ($\approx 22,3$ kN, decremento del 7,3%), indicando che la rigidità iniziale e la resistenza al primo collasso non risultano drasticamente compromesse dall'invecchiamento a 1 mese.

Le curve carico-spostamento sono riportate in **Figura 11** e

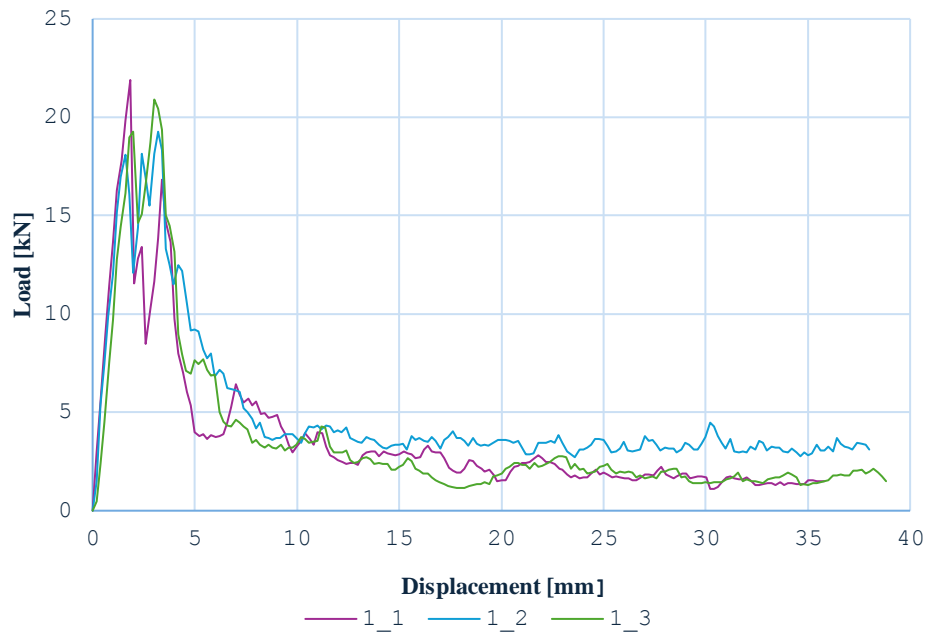


Figura 11: Curve carico-spostamento dei provini a 0° dopo 1 mese di immersione in soluzione

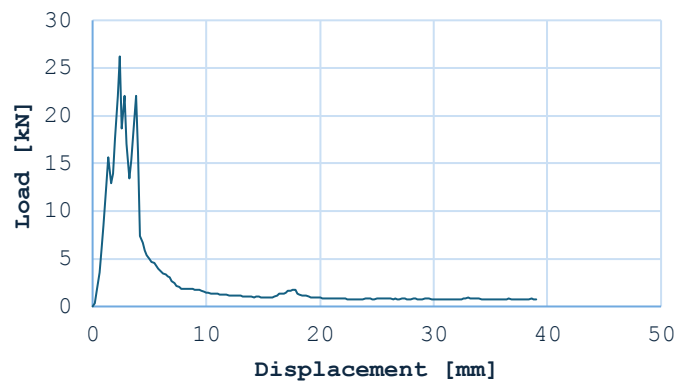


Figura 12: Curva carico-spostamento di 1_4_90 dopo 1 mese di immersione in soluzione

L'energia totale assorbita (EA) mostra un calo più marcato: dopo un mese di immersione, il valore medio passa da 194 J a 155 J (che corrisponde ad una riduzione di circa il 20%). In modo coerente, la SEA diminuisce da 25,8 J/g a 22,9

J/g (riduzione $\approx 12\%$), mentre la *SEA* in *steady state* passa da 24,7 J/g a 21,9 J/g (riduzione $\approx 11\%$). Si rimanda al grafico seguente **Figura 13** per la visualizzazione dell'andamento della *SEA* in funzione dello spostamento.

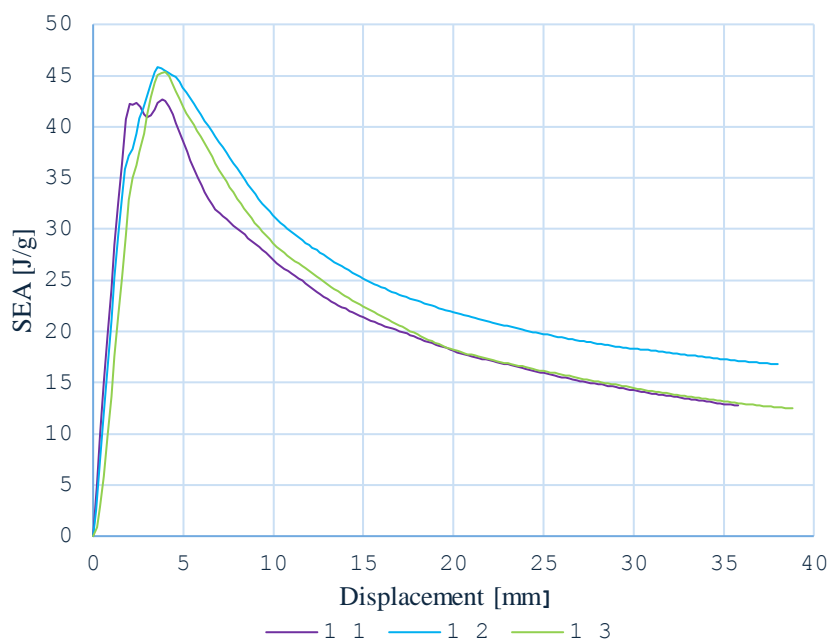


Figura 13: Curva *SEA*-displacement dei provini a 0° dopo 1 mese di immersione in soluzione

In continuità logica, anche la *Crush Force Efficiency* peggiora: si passa da un valore medio di circa 17,4% per provini vergini al 14% dopo un solo mese di immersione in soluzione; è chiaro quindi che, pur mantenendo un picco di carico comparabile con la configurazione a 0 mesi, il materiale invecchiato ha un processo di collasso meno regolare ed efficiente.

Particolarmente penalizzato risulta il provino 1_4_90, caratterizzato da fibre orientate a 90° rispetto alla direzione di carico, il quale riporta i valori più bassi di *EA* (≈ 102 J), *SEA steady state* ($\approx 17,8$ J/g) e *CFE* ($\approx 4,8\%$).

Per i provini immersi per 1 mese in soluzione al 5% di NaCl, i valori medi risultano ridotti rispetto ai provini vergini, a conferma di un degrado delle prestazioni meccaniche. Dal punto di vista statistico, i coefficienti di variazione relativi ai principali parametri di carico e di energia ($CoV \approx 5\text{--}15\%$) indicano una ripetibilità complessivamente buona delle prove. Al contrario, il parametro di efficienza di

schacciamento presenta una dispersione più elevata ($CoV > 20\%$), suggerendo una maggiore sensibilità della fase di *progressive crushing* alle eterogeneità locali introdotte dall'esposizione all'ambiente salino.

4.6 Confronto tra provini a 0 e 1 mese di invecchiamento

A scopo di confronto, in **Figura 14**, sono stati inseriti i dati sulla variazione dei valori di media

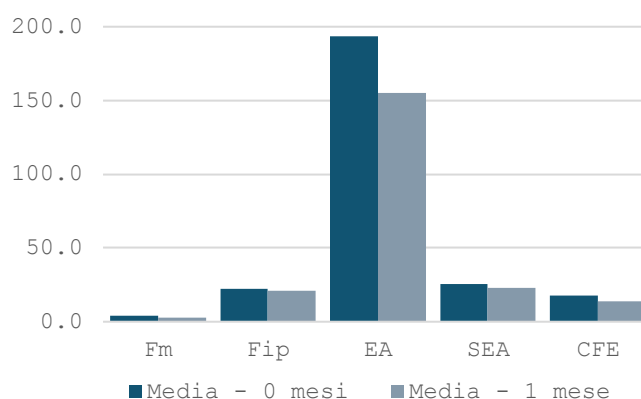


Figura 14: Confronto statistico media

I risultati ottenuti sono coerenti con uno scenario di indebolimento della matrice e dell'interfaccia dovuto all'immersione in soluzione salina, che non compromette in maniera drastica il picco di carico iniziale, ma penalizza in modo significativo la successiva fase di schiacciamento progressivo e, in generale, la capacità del materiale di dissipare energia dopo il picco. L'immersione di 1 mese in soluzione non abbatte il picco di carico, ma riduce drasticamente la capacità portante media e l'energia assorbita, penalizzando la fase di *progressive crushing*.

Per i primi parametri la dispersione assoluta cala sensibilmente; solo per *CFE* la *Dev. Str* aumenta leggermente. Da sola, però, la deviazione standard va letta con cautela: cala conseguentemente al diminuire delle medie.

Dal punto di vista della dispersione statica, è evidente che il CoV diminuisca per i principali parametri meccanici, spesso portandosi sotto il 10% (quindi le prove

risultano ripetibili nonostante il degrado); solo il parametro di efficienza globale (*CFE*) mostra un *CoV* più alto dopo l'invecchiamento, indicando che *crashworthy* e distribuzione del danno diventano più sensibili a eterogeneità locali introdotte dall'ambiente salino.

Complessivamente, l'immersione in soluzione salina per 1 mese riduce in modo sistematico le medie dei parametri legati a carico ed energia, segnalando un indebolimento di matrice e interfaccia:

- i. Il picco di carico varia poco;
- ii. La fase post-picco viene penalizzata in modo più evidente

La variazione dei dati di media, deviazione standard e coefficiente di variazione vengono analizzati dettagliatamente nelle tabella successiva (**Tabella 10**).

Tabella 10: Confronto delle medie tra provini 0 mesi – 1 mese

Parametro	Media – 0 mesi	Media – 1 mese	Variazione %
<i>F_m</i>	4,043	2,945	-27,2
<i>F_{ip}</i>	22,32	20,688	-7,3
<i>EA</i>	193,764	155,010	-20
<i>SEA</i>	25,819	22,854	-11,5
<i>CFE</i>	17,43	14	-19,7

Capitolo 5

Invecchiamento prolungato sui CFRP

In questo capitolo viene approfondito l'effetto dell'invecchiamento ambientale sulle prestazioni a *crash* dei materiali compositi CFRP secondo due condizioni: una prima serie di provini è stata mantenuta per 5 mesi in soluzione di NaCl al 5%, mentre una seconda è stata sottoposta per 3 mesi in camera a nebbia salina (modalità e specifiche descritte nei capitoli precedenti).

Per entrambi i casi saranno presentate e discusse le curve carico-spostamento e i principali parametri che descrivono il comportamento a *crash* del materiale (*carico massimo, forma media di schiacciamento, EA, SEA*), insieme ai relativi indicatori statistici di dispersione (*deviazione standard, coefficiente di variazione*).

Nella parte finale, tali risultati verranno messi a confronto con quelli dei provini vergini, così da valutare come l'esposizione prolungata all'ambiente salino influenzi la capacità del materiale di sostenere carico e dissipare energia durante il *crash*.

5.1 Prestazioni dopo 5 mesi in *soluzione salina*

In continuità con quanto svolto per i provini vergini, è stata condotta l'analisi dei campioni sottoposti a 5 mesi in soluzione 5% di NaCl (2_15, 2_14, 2_13 e 1_19_D, con direzione delle fibre a 0° rispetto alla direzione di applicazione del carico).

I risultati sperimentali sono sintetizzati in **Tabella 11**, in cui vengono riportati i valori di *forza media* (anche in questo caso, determinato sul tratto compreso tra 5 mm e 35 mm di spostamento), *forza di picco, energia assorbita (EA), SEA e CFE* per ciascun provino. In particolare, il provino 1_19_D non è stato considerato nei calcoli statistici di *media, deviazione standard e coefficiente di deviazione* in quanto

difettoso; per eguale motivo, non è stato aggiunto al grafico generale degli andamenti carico-spostamento, ma studiato separatamente.

Tabella 11: Dati riassuntivi a crash test dei provini invecchiati 5 mesi in soluzione

	F_m [kN]	F_{ip} [kN]	EA [J]	SEA [J/g]	SEAss [J/g]	CFE %
2_15	2,40	28,06	107,01	24,09	25,13	13,57%
2_14	2,44	24,80	90,45	21,545	22,528	14,86%
2_13	5,03	27,16	135,45	27,09	28,02	22,93%
<i>Media</i>	3,288	26,675	110,971	24,243	25,224	17%
<i>Dev. Str.</i>	1,233	1,375	18,582	2,268	2,241	4%
<i>CoV%</i>	37,508	5,155	16,745	9,355	8,885	24,195

Tabella 12: Dati riassuntivi a crash test di 1_19_D invecchiato 5 mesi in soluzione

1_19_D	2,61	19,04	96,78	24,54	24,69	22,01%
--------	------	-------	-------	-------	-------	--------

Come evidenziato in tabella, la forza media di schiacciamento F_m dei provini non difettati (2_15, 2_14, 2_13) risulta pari a circa 3,29 kN. Questo valore è inferiore a quello dei provini non invecchiati ($\approx 4,04$ kN, con una riduzione di circa 18,6%), indicando che la capacità portante stabile durante la fase di *crushing* rimane penalizzata rispetto al materiale vergine; risulta tuttavia più elevato rispetto ai provini invecchiati per 1 mese in immersione salina ($\approx 2,95$ kN, incremento di circa 11,5%), segnalando un parziale recupero del plateau rispetto alla condizione di esposizione a breve termine.

La forza di picco mostra invece una media di circa 26,7 kN, superiore sia al valore dei campioni vergini ($\approx 22,3$ kN, con incremento di circa 19,6%) sia a quello dei provini invecchiati 1 mese ($\approx 20,7$ kN, incremento di circa 28,9%). Questo comportamento suggerisce, che dopo 5 mesi in soluzione salina al 5% NaCl, il materiale risulti più rigido con conseguente picco più elevato, mentre la capacità

portante stabile non viene completamente ripristinata: dal punto di vista della *crashworthiness*, ciò si traduce in picchi di carico più bruschi a fronte di un *plateau* ancora inferiore a quello del materiale vergine, configurando una condizione complessivamente sfavorevole in termini di assorbimento di energia in modo controllato.

Gli andamenti *load-displacement* sono riportati nelle **Figura 15** e **Figura 16**.

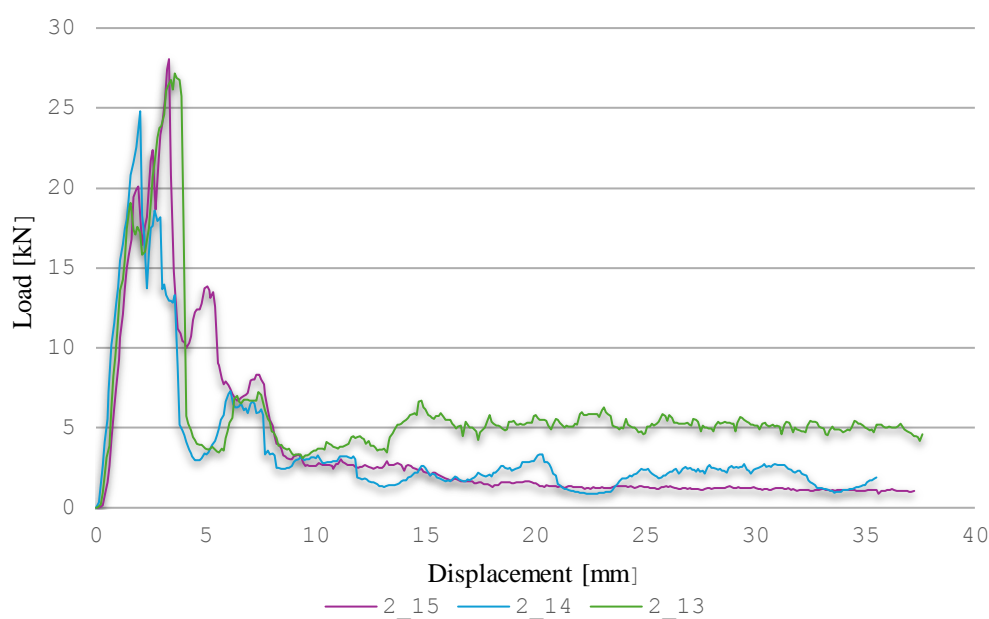


Figura 15: Curve carico-spostamento dei provini dopo 5 mesi in soluzione

Le tre curve mostrano una fase iniziale pressoché lineare, con rigidità iniziale molto simile tra i campioni, seguita dal raggiungimento di *peak load* in corrispondenza di spostamenti dell'ordine di 3-4 mm: i valori massimi, compresi tra circa 25 e 28 kN, risultano distribuiti in un intervallo relativamente ristretto ($CoV \approx 5\%$, indice di una buona ripetibilità della fase di innesco del collasso dopo il ciclo di invecchiamento).

Successivamente al *peak load*, tutte le curve evidenziano una brusca caduta e l'avvio di una fase di *progressive crushing*. In questa regione la dispersione tra i provini è più marcata: il campione 2_13 mantiene un *plateau* di carico

sensibilmente più elevato rispetto ai provini 2_15 e 2_14, che si stabilizzano su livelli inferiori. Tale comportamento è coerente con i valori più alti di forza media ed energia assorbita misurati per il provino 2_13, il quale risulta il più performante del lotto in termini di capacità dissipativa.

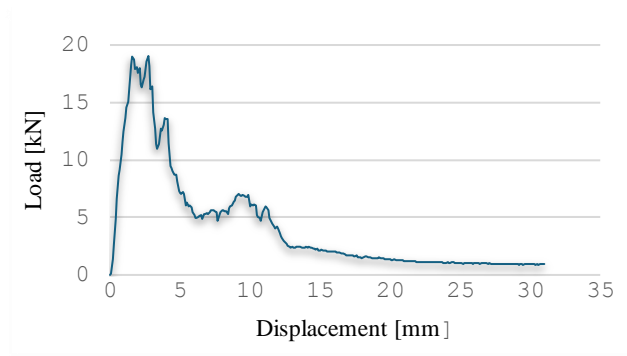


Figura 16: Curva carico-spostamento di 1_19_D dopo 5 in soluzione

Sulla base dei parametri medi, il provino 1_19_D mostra una curva carico-spostamento che mantiene lo stesso andamento qualitativo dei provini non difettati (tratto iniziale crescente, *peak load* ben definito e successiva fase di *progressive crushing*), ma risulta complessivamente traslata verso il basso:

- i. Il carico di picco è più basso di circa il 29% rispetto alla media dei provini sani ($\approx 19,0$ kN contro 26,7 kN);
- ii. La forza media risulta ridotta di circa il 21% ($\approx 2,61$ kN contro 3,29 kN).

In termini di forma della curva, si traduce in un ramo iniziale meno resistente e in un picco più contenuto, con il tracciato che si mantiene su livelli di carico inferiori lungo buona parte della corsa di schiacciamento rispetto ai campioni non difettati. L'energia totale assorbita evidenzia una riduzione progressiva al crescere dell'esposizione ad ambiente salino. Partendo dai provini vergini che mostrano un valore medio di circa 194 J, si osserva un primo calo dopo 1 mese di immersione: in questa condizione l'*EA* scende a circa 155 J, corrispondente ad una riduzione dell'ordine del 20%. Dopo 5 mesi, l'effetto diventa ancora più accentuato, con un'energia assorbita media si attesta attorno a 111 J, ossia circa -43% rispetto ai

provini non invecchiati e -28% in confronto alla condizione a 1 mese. Questo andamento conferma che l'esposizione prolungata in soluzione salina compromette in modo significativo la capacità del materiale CFRP di dissipare energia durante lo schiacciamento, con un degrado della risposta a *crash* che diventa più marcato al crescere del tempo di invecchiamento.

Considerando l'energia specifica assorbita (*SEA*), si ottiene un valore medio pari a circa 24,2 J/g, con una deviazione standard di 2,27 J/g ed un coefficiente di variazione dell'ordine del 9-10%. La dispersione può quindi essere considerata moderata, a indicare una ripetibilità complessivamente soddisfacente del comportamento energetico all'interno del lotto (**Figura 17**).

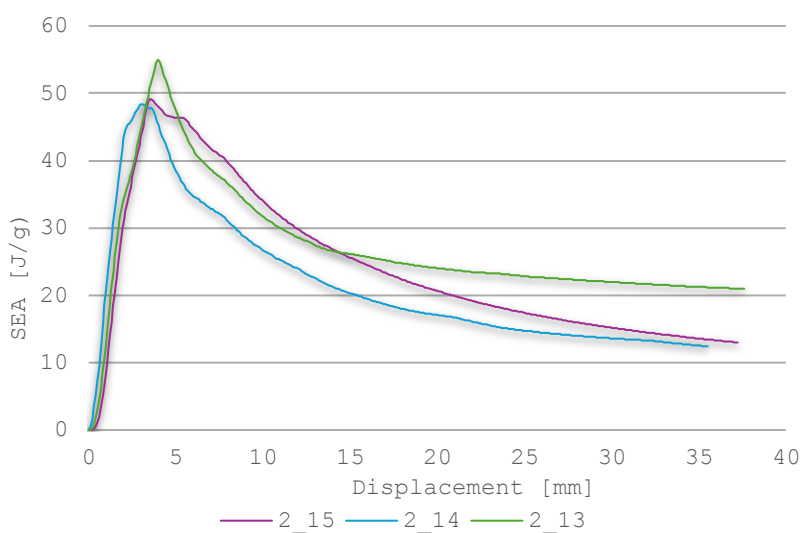


Figura 17: Curva SEA- spostamento dei provini dopo 5 mesi in soluzione

Un andamento analogo si osserva per la *SEA in steady state*, che presenta un valore medio di circa 25,2 J/g, con una dispersione leggermente inferiore ($CoV \approx 8,9\%$), segno che la fase di schiacciamento quasi stazionario mantiene, tra un provino e l'altro, una capacità di assorbimento energetico per unità di massa piuttosto coerente. Tutte le curve evidenziate nella figura precedente, presentano una rapida crescita iniziale della *SEA* nei primi millimetri di corsa, fino al massimo in

corrispondenza del *peak load* (spostamenti dell'ordine di 3-4 mm), con valori compresi tra 45 e 55 J/g, riflettendo la riduzione del carico nella fase di *progressive crushing*.

Le differenze tra i provini riguardano principalmente il livello su cui attestano le curve lungo il resto della corsa: il campione 2_13 si colloca su livelli di *SEA* complessivamente alti, mentre il provino 2_14 risulta più penalizzato, con una *Specifi Energy Absorption* che scende più rapidamente e si colloca stabilmente al di sotto gli altri due; il provino 2_15 presenta un comportamento intermedio.

Questo andamento è coerente ai valori medi riportati in tabella ($SEA \approx 24,2$ J/g con $CoV \approx 9\%$), che indicano una capacità di assorbimento energetico per unità di massa moderatamente degradata rispetto ai provini vergini, ma ancora ragionevolmente ripetibile all'interno del lotto.

Dal confronto con le altre condizioni di invecchiamento emerge un quadro più sfumato rispetto a quanto suggerirebbe la sola *EA*. Rispetto ai provini vergini ($SEA \approx 25,8$ J/g), i campioni immersi 5 mesi mostrano una leggera riduzione dell'energia specifica assorbita ($\approx -6\%$), mentre rispetto ai provini invecchiati 1 mese in soluzione ($SEA \approx 22,9$ J/g) si osserva un moderato incremento ($\approx +6\%$).

L'analisi della *SEA* suggerisce che l'invecchiamento prolungato in soluzione al 5% di NaCl non determina un tracollo della capacità di assorbimento energetico per unità di massa, quanto piuttosto una riorganizzazione del bilancio tra massa, plateau di schiacciamento ed energia totale assorbita.

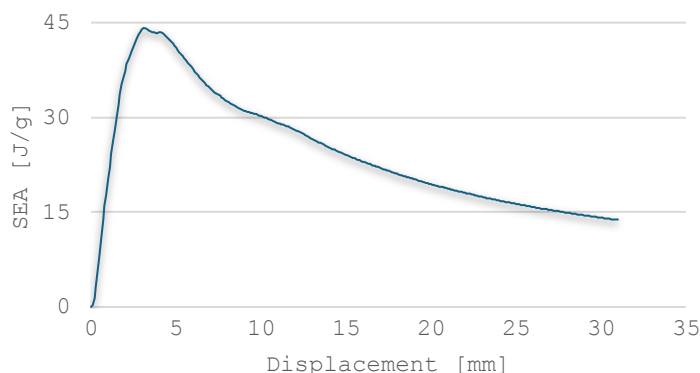


Figura 18: Curve SEA-spostamento di 1_19_D dopo 5 mesi in soluzione

In merito al provino difettato 1_19_D (curva SEA-spostamento in **Figura 18**) i valori di *SEA* e di *SEA steady state* risultano sostanzialmente allineati a quelli dei campioni non difettati ($SEA \approx +1\%$ rispetto alla media, $SEA_{ss} \approx -2\%$). Ciò indica che, una volta innescata la fase di *progressive crushing*, la capacità di assorbire energia per unità di massa è comparabile a quella dei provini sani, e che la peculiarità del campione riguarda principalmente il bilanciamento tra picco e plateau di carico più che l'efficienza energetica normalizzata.

Per quanto riguarda l'efficienza di schiacciamento, i provini invecchiati 5 mesi in soluzione salina presentano una *Crash Force Efficiency* media di circa 17%, valore sostanzialmente in linea con quello dei provini vergini ($\approx 17,4\%$) e superiore a quello rilevato dopo 1 mese di immersione ($\approx 14\%$). Il dato suggerisce che, nonostante la marcata riduzione di *EA*, il rapporto tra carico medio e carico di picco non risulti ulteriormente penalizzato dall'esposizione prolungata; tuttavia, tale “recupero” di efficienza è associato ad un sensibile incremento del *peak load* e non a un reale miglioramento della regolarità del plateau, con implicazioni non necessariamente favorevoli in termini di comfort e sicurezza in *crash*.

Il provino 1_19_D è caratterizzato da una CFE maggiore rispetto ai campioni non difettati ($\approx 22\%$ contro 17%): la curva del provino è meno prestante in termini assoluti (livelli di carico più bassi), ma presenta un rapporto *plateau/picco* apparentemente più favorevole, legato però ad un valore di massimo anomalo e non ad un effettivo miglioramento del comportamento a *crash*.

Dal punto di vista statistico, i provini 2_13, 2_14 e 2_13 mostrano una discreta ripetibilità per i parametri di carico: il *peak load* presenta una deviazione standard di circa 1,4 kN ed un coefficiente di variazione dell'ordine del 5%, mentre la *SEA* è caratterizzata da una dispersione moderata (deviazione standard $\approx 2,3$ J/g, $CoV \approx 9\%$). Al contrario, la forza media e la *Crash Force Efficiency* evidenziano una variabilità decisamente più marcata, confermando che la fase di *progressive crushing* - e in particolare il parametro di efficienza - risulta maggiormente sensibile

alle eterogeneità locali e ai danni introdotti dall'esposizione prolungata in ambiente salino.

5.2 Prestazioni dopo 3 mesi in *Salt Spray Chamber*

Per i provini CFRP invecchiati per 3 mesi in nebbia salina sono stati considerati, ai fini dell'analisi statistica, solo i campioni con fibre orientate a 0° (1_7, 1_8, 1_9, 2_7, 2_8, 2_9). Il provino 1_21_D è stato escluso in quanto difettoso, mentre il provino 1_18_90, caratterizzato da fibre orientate a 90° rispetto alla direzione di carico, è stato analizzato e graficato separatamente. Di seguito, **Tabella 13** e **Tabella 14**, si riportano i dati rilevati dal *test crash* relativi ai vari provini.

Tabella 13: Dati riassuntivi a crash test dei provini invecchiati 3 mesi in *Salt Spray Chamber*

	F_m [kN]	F_{ip} [kN]	EA [J]	SEA [J/g]	SEA_{ss} [J/g]	CFE %
<i>1_7</i>	4,19	23,36	119,88	27,95	28,32	23,19
<i>1_8</i>	1,93	27,38	76,27	18,12	18,28	11,01
<i>1_9</i>	2,81	26,42	104,79	22,27	23,38	16,03
<i>2_7</i>	4,91	28,56	134,97	26,24	27,48	22,01
<i>2_8</i>	4,27	21,627	147,141	29,427	30,661	30,57
<i>2_9</i>	5,16	27,673	135,421	26,520	27,187	26,20
<i>Media</i>	3,88	25,84	119,75	25,09	25,88	21,50
<i>Dev. Str.</i>	1,15	2,50	23,60	3,80	4,02	6,42
<i>CoV%</i>	29,59	9,67	19,71	15,17	15,55	29,87

Tabella 14: Dati riassuntivi a crash test di *1_18_90* e *1_21_D* dopo 3 mesi in *Salt Spray Chamber*

<i>1_18_90</i>	5,51	23,125	133,850	25,933	27,004	25,93%
<i>1_21_D</i>	6,15	19,385	120,017	25,265	25,737	27,99%

La forza media di schiacciamento F_m , calcolata nel tratto 5-35 mm, risulta pari a

circa 3,88 kN, valore leggermente inferiore a quello dei provini vergini ($\approx 4,04$ kN, variazione di circa -4%), ma sensibilmente superiore a quello misurato dopo 1 mese di immersione ($\approx 2,95$ kN, che corrisponde ad incremento di circa $+32\%$).

Questo dato indica che, dopo 3 mesi di esposizione in camera di nebbia salina, la capacità portante stabile rimane complessivamente inferiore rispetto al materiale non invecchiato, ma risulta migliore rispetto alla condizione ad 1 mese in soluzione al 5% di NaCl.

La forza di picco presenta una media di circa 25,8 kN, superiore sia al valore dei campioni vergini (22,3 kN, $+15,8\%$) sia a quello dei provini immersi 1 mese (20,7 kN, $+24,9\%$), evidenziando una fase iniziale di collasso più rigida ed un picco di carico più marcato (andamenti *load-displacement* riportati in **Figura 19**).

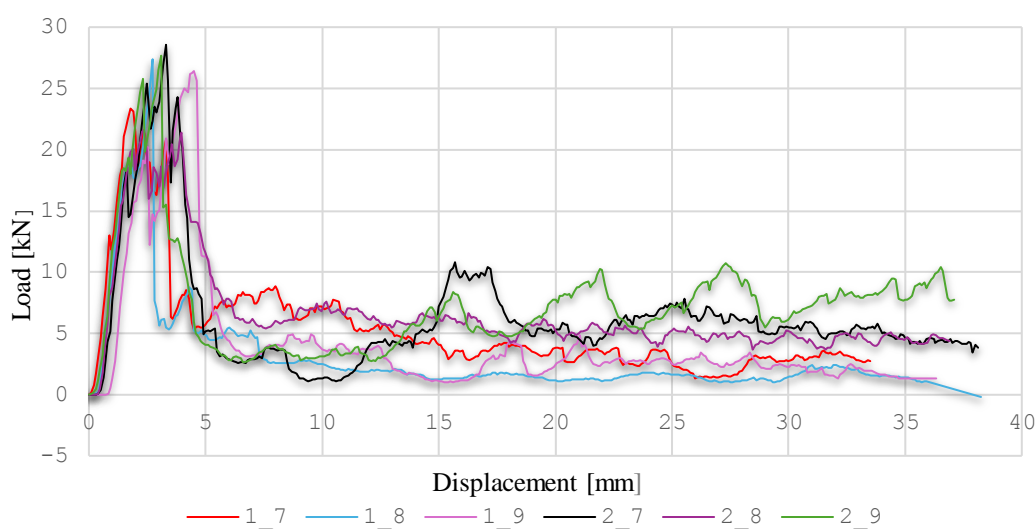


Figura 19: Curve carico-spostamento dei provini dopo 3 mesi in Salt Spray Chamber

Analizzando nel dettaglio i *plateau* di schiacciamento delle curve carico-spostamento in **Figura 19** si osserva che, dopo il *peak load*, il carico non si stabilizza su un valore costante, ma rimane su livelli relativamente elevati, con un andamento marcatamente ondulato.

Le numerose oscillazioni presenti nel plateau possono essere interpretate come picchi locali associati alla formazione sequenziale di *folds* e *damage zone*: ogni

volta che il fronte di collasso deve innescare una nuova piega, rompere un pacchetto di fibre ancora integre o superare una regione localmente più resistente, il carico registra un incremento temporaneo, dando luogo ad un picco locale; una volta completata la formazione della piega, il carico tende nuovamente a ridursi. La forma del plateau rappresenta quindi la firma di un *progressive crushing* fortemente discontinuo, influenzato dalle eterogeneità locali e dai danni introdotti dall'invecchiamento in nebbia salina.

Cambiando prospettiva di analisi, risulta fondamentale considerare l'andamento energetico. L'*EA* media è pari a circa 120 J, a fronte dei ≈ 194 J dei provini vergini (riduzione di circa -38%) e dei ≈ 155 J registrati dopo 1 mese di immersione ($\approx -23\%$). Anche per questa serie si osserva un degrado significativo della capacità dissipativa complessiva, che si accentua al crescere del tempo di esposizione ad ambiente salino.

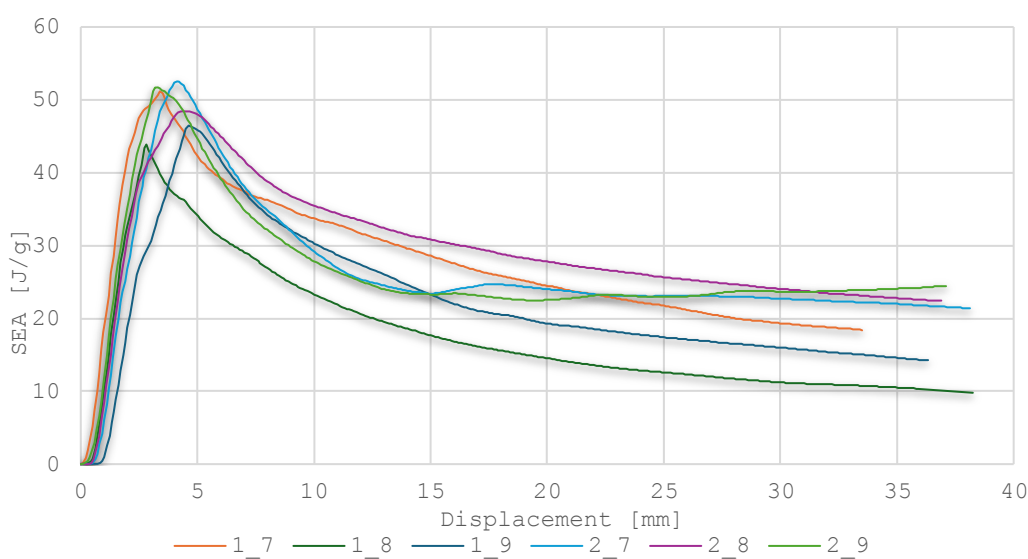


Figura 20: Curva SEA-displacement dei provini dopo 3 mesi in Salt Spray Chamber

In termini di energia specifica assorbita - andamento riportato in **Figura 20** - i provini invecchiati 3 mesi in nebbia salina hanno un valore medio di circa 25,1 J/g, con deviazione standard di 3,8 J/g e un coefficiente di variazione dell'ordine del 15%.

La dispersione risulta quindi moderata, ad indicare una ripetibilità accettabile ma

non trascurabile del comportamento energetico: alcuni provini (in particolare 2_8 e 2_7) mantengono valori di SEA più elevati, mentre altri (come 1_8) risultano decisamente più penalizzati.

Il confronto con le altre condizioni di invecchiamento evidenzia un comportamento più articolato rispetto a quanto suggerito dalla sola EA. Rispetto ai provini vergini, $SEA \approx 25,8 \text{ J/g}$, l'energia specifica assorbita dopo 3 mesi in nebbia salina risulta solo leggermente inferiore ($\approx -3\%$), mentre rispetto ai campioni invecchiati 1 mese in immersione ($SEA \approx 22,9 \text{ J/g}$) si osserva un incremento di circa $+10\%$. Infine, il valore medio a 3 mesi in SSC è leggermente più alto di quello misurato dopo 5 mesi di immersione ($SEA \approx 24,2 \text{ J/g}$, equivalente a circa un $\approx +4\%$).

In altre parole, pur a fronte di una riduzione significativa dell'EA (circa -38% rispetto ai dati vergini), l'energia assorbita per unità di massa dopo 3 mesi in nebbia salina si mantiene su livelli prossimi al materiale non invecchiato e superiore alla condizione a 1 mese. Il risultato emerso va interpretato tenendo conto sia della parziale perdita di massa dei campioni sia della presenza, specialmente in alcuni provini, di un plateau sviluppato.

Dal punto di vista della *crashworthiness* globale il parametro più significativo rimane l'energia totale assorbita, la quale evidenzia un degrado marcato; la SEA deve quindi essere letta con cautela, in quanto risente sia della variazione di massa sia delle specifiche modalità di collasso sviluppate dopo l'invecchiamento in *Salt Spray Chamber*.

Di fondamentale importanza è la *Crush Force Efficiency*; i provini invecchiati 3 mesi in SSC presentano un valore medio pari a circa $21,5\%$ superiore sia a quello dei provini vergini ($\approx 17,4\%$) sia a quello misurato dopo 1 mese in immersione ($\approx 14\%$). Tale risultato è accompagnato da una marcata dispersione dei dati (*dev. str.* di circa 6,4 punti percentuali, e $CoV \approx 30\%$), con valori che spaziano dall'11% del provino 1_8 a oltre il 30% del 2_8. È dunque evidente che il parametro CFE sia il più sensibile alle eterogeneità locali e alle modalità di collasso.

Provino difettato: 1_21_D

Il provino 1_21_D presenta una *force-displacement response* anomala rispetto alla media dei campioni a 0°. Il *peak load* risulta significativamente ridotto ($\approx 19,4$ kN contro una media di 25,8 kN, circa -25%), mentre il plateau è sensibilmente più alto (*mean force* $\approx 6,15$ kN contro 3,88 kN, circa $+60\%$). L'energia totale assorbita è sostanzialmente comparabile a quella dei provini non difettati, ma la *CFE* raggiunge valori nettamente superiori ($\approx 28\%$ contro 21,5%). L'andamento della curva *load-displacement* è riportato in **Figura 21.a**.

Il campione in esame presenta un'*EA* pressoché coincidente con la media del lotto (≈ 120 J) e una *SEA* allineata a quella dei provini non difettati (25,27 J/g contro una media di 25,09 J/g, scostamento inferiore all'1%). In questo caso, la *SEA* non evidenzia un reale incremento della capacità dissipativa, ma riflette piuttosto la particolare morfologia della curva carico-spostamento, caratterizzata da un picco iniziale attenuato e da un *plateau* insolitamente elevato – che rende il comportamento del provino 1_21_D anomalo e non pienamente rappresentativo del lotto (**Figura 21.b**).

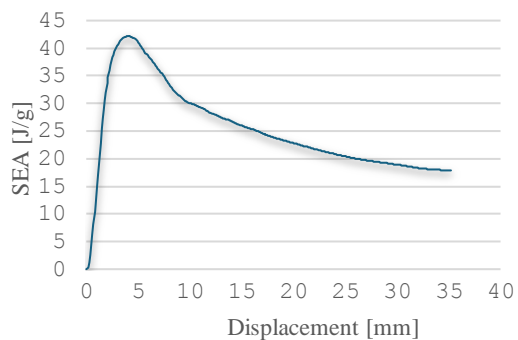
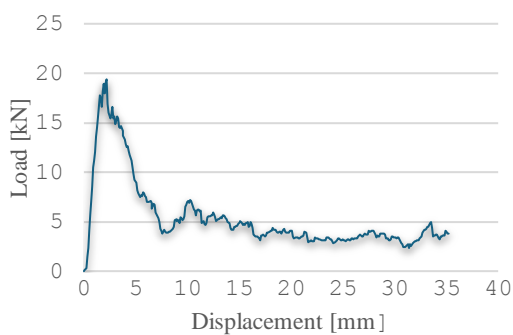


Figura 21.a: Curva carico-spostamento 1_21_D

Figura 21.b: Curva SEA-spostamento 1_21_D

Provino 1_18_90

Il provino 1_18_90, con fibre orientate a 90° rispetto alla direzione di carico,

evidenzia una curva carico-spostamento distinta dai provini a 0° (**Figura 22.a**): il carico di picco è leggermente inferiore alla media ($\approx 23,1$ kN contro 25,8 kN, circa $-10,5\%$), mentre il *mean load* è sensibilmente più elevato ($\approx 5,51$ kN, pari a circa $+42\%$ rispetto ai 3,88 kN medi). La curva presenta un picco meno pronunciato e una successiva fase di *progressive crushing* più stabile, con *plateau* che si mantiene su livelli di carico superiori rispetto ai provini a 0° , in modo coerente con la configurazione *transversely loaded laminate*.

Dal punto di vista energetico, il provino 1_18_90 mostra un'*EA* pari a circa 134 J, superiore di circa 12% rispetto al valore medio dei provini a 0° (≈ 120 J); di conseguenza, anche la *SEA* risulta leggermente più elevata, attestandosi intorno a 25,9 J/g contro i 25,1 J/g medi ($\approx +3\%$), come riportato in **Error! Reference source not found..b**. Nonostante l'orientamento delle fibre perpendicolare all'asse di carico, il provino mantiene una capacità di assorbimento energetico per unità di massa del tutto confrontabile con i provini a 0° .

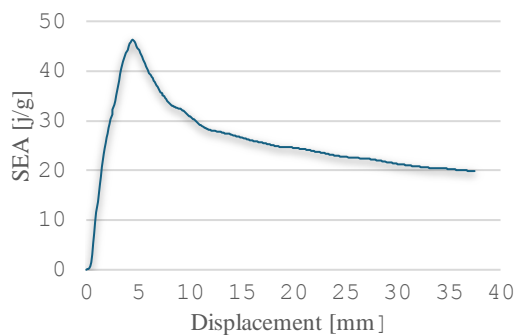
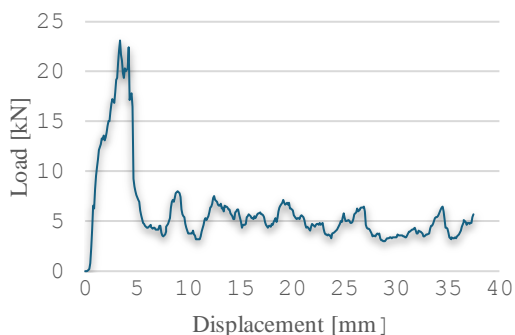


Figura 22.a: Curva carico-spostamento 1_18_90

Figura 22.b: Curva SEA-spostamento 1_18_90

5.3 Confronto tra campagne sperimentali

Dalla **Error! Reference source not found.** emerge innanzitutto che tutte le condizioni di invecchiamento in ambiente salino

comportano una riduzione della forma media di schiacciamento F_m e dell'energia totale assorbita (EA) rispetto ai provini vergini.

Tabella 15: Confronto tra i principali parametri caratteristici dei test

	0 mesi	1 mese (soluzione)	5 mesi (soluzione)	3 mesi (SSC)
F_m [kN]	4,03	2,945 (-27,2%)	3,288 (-18,7%)	3,880 (-4,0%)
F_{ip} [kN]	22,32	20,688 (-7,3%)	26,675 (+19,5%)	25,84 (+15,8%)
EA [J]	193,764	155,010 (-20%)	110,971 (-42,7%)	119,75 (-38,2%)
SEA [J/g]	25,819	22,854 (-11,5%)	24,243 (-6,1%)	25,09 (-2,8%)
CFE %	17,43	14,0 (-19,7%)	17,0 (-2,5%)	21,5 (+23,4%)

La penalizzazione è più marcata dopo 1 mese in soluzione salina ($F_m \approx -27\%$, $EA \approx -20\%$) e diventa ancora più severa per le esposizioni prolungate, con l'energia assorbita totale che si riduce di circa 43% dopo 5 mesi di immersione e -38% a seguito di 3 mesi in *Salt Spray Chamber* (SSC) – andamento che riflette un degrado della capacità dissipativa dei provini in CFRP a fronte dei cicli di invecchiamento. La forza di picco F_{ip} è caratterizzata da un comportamento opposto: dopo una lieve riduzione a 1 mese in soluzione (-7,3%), cresce sensibilmente per le condizioni successive (+19,5% dopo 5 mesi di immersione, +15,8% a seguito di 3 mesi in SSC). L'evoluzione dei dati di *peak load* nelle diverse campagne indica un innesco

del collasso più brusco dovuto ad un materiale più rigido, con carichi iniziali più elevati, aspetto sfavorevole in ottica di *crashworthiness* in quanto aumenta la severità del picco pur in presenza di una minore energia assorbita.

L'energia totale assorbita (*EA*) è il parametro che più direttamente mette in luce la perdita di *crashworthiness* globale, indicando che l'invecchiamento riduce in modo significativo l'energia che il componente è in grado di dissipare durante lo schiacciamento; in particolare, passa da un valore medio di circa 194 J (0 mesi) a 155 J dopo un mese in soluzione, con un calo di circa il 20%. Il degrado diventa ancora più evidente per le esposizioni prolungate ad ambiente aggressivo: l'*EA* scende a circa 111 J dopo 5 mesi in soluzione ($\approx -42,7\%$ rispetto ai vergini) e a circa 120 J dopo 3 mesi in *Salt Spray Chamber* ($\approx -38,2\%$).

Un'evoluzione interessante vede come protagonista la *SEA*, la quale diminuisce dopo 1 mese in soluzione ($-11,5\%$), ma per le condizioni a lungo termine i valori tornano a essere solo lievemente inferiori rispetto ai vergini ($\approx -6\%$ a 5 mesi in soluzione, $\approx -3\%$ a 3 mesi *SSC*).

Non meno importanza ha la *Crush Force Efficiency (CFE)* il cui andamento evidenzia un decremento dopo la prima campagna di invecchiamento (circa $\approx -20\%$ rispetto ai dati vergini), mentre risulta quasi invariata dopo 5 mesi ($\approx -2,5\%$) e addirittura migliorata dopo 3 mesi in *SSC* (con un incremento di $\approx +23\%$).

Nel complesso, la tabella mette in evidenza un quadro in cui, come già detto, l'invecchiamento salino riduce la capacità dissipativa assoluta e aumenta i carichi di picco – tenendo presente che i parametri *SEA* e *CFE* vanno interpretati in modo scrupoloso perché influenzati da variazioni di massa e da specifiche modalità di collasso.

Capitolo 6

Conclusioni

6.1 Riepilogo risultati

Nel presente elaborato sono stati analizzati in modo sistematico gli effetti dell'invecchiamento in ambiente salino sulla risposta a crash di provini in CFRP T700-150/DT120-36 con trigger a 45°, attraverso campagne di prova relative a diverse condizioni di esposizione: provini vergini, immersi per 1 e 5 mesi in soluzione al 5% di NaCl e provini invecchiati 3 mesi in *Salt Spray Chamber*.

L'obiettivo del lavoro era quello di quantificare in che misura l'esposizione prolungata ad ambiente salino influisca sulla capacità del laminato di assorbire energia in modo controllato, distinguendo gli effetti sulle diverse fasi del collasso (picco, *plateau*, *crushing* progressivo) e valutando la significatività statistica dei risultati. Da questo punto di vista, lo scopo può considerarsi raggiunto: le prove mostrano in modo chiaro che tutte le condizioni di invecchiamento determinano una riduzione di *EA* rispetto ai provini vergini (fino a $\approx -40\div 45\%$ per le esposizioni più lunghe) accompagnata dalla riduzione della forza media di schiacciamento e, al contrario, un incremento della forza di picco nelle condizioni più prolungate.

Dal punto di vista statistico, l'elaborato mostra che il *peak load* rimane il parametro più ripetibile, mentre la forza media e la *CFE* sono fortemente sensibili alle eterogeneità locali e ai meccanismi di danno, con coefficienti di variazione che possono superare il 25-30%.

I provini con orientamento delle fibre perpendicolari all'asse di carico e quelli classificati come difettosi sono caratterizzati da comportamenti peculiari, in

generale non rappresentative del lotto; la loro analisi ha tuttavia confermato che, anche in configurazioni meno favorevoli (90°), il materiale può mantenere una capacità di assorbimento energetico comparabile per unità di massa a quella dei provini con fibre a 0° , sebbene con diverso bilanciamento tra picco e plateau – l’andamento rimane comunque molto più non standardizzabile rispetto ai provini con fibre orientate lungo l’asse del carico.

6.2 Possibili sviluppi futuri

Il lavoro presentato può essere ampliato sia sul piano sperimentale, sia su quello microstrutturale e numerico.

Un naturale sviluppo delle campagne di prove prevede tempi di invecchiamento più lunghi, diverse concentrazioni di soluzione salina e differenti temperature di esposizione – magari affiancando alle provi quasi statiche test di schiacciamento dinamico, per poi valutarne l’effetto. Come è noto dalla letteratura, il ruolo dell’architettura del composito è determinante per comprendere l’andamento del collasso: un’indagine sull’effetto di degradazione di geometrie o sequenze di laminazione differenti permetterebbe di mettere in luce informazioni utili per la progettazione di componenti CFRP destinati ad applicazioni critiche.

In parallelo, il quadro sperimentale potrebbe essere completato da immagini microstrutturali (*SEM*, μ CT, prove interlaminari, caratterizzazioni termomeccanica della matrice) volte a collegare in modo diretto i meccanismi di degrado a scala locale – *microcracking*, delaminazione – con la perdita di prestazioni in schiacciamento. Su queste basi, lo sviluppo di modelli numerici espliciti (*FEM* con leggi di danno dipendenti dall’invecchiamento) permetterebbe di riprodurre il progressivo *crushing* e di effettuare analisi parametriche su scenari difficilmente esplorabili in laboratorio.

In prospettiva aerospaziale, questi approfondimenti non avrebbero solo valore teorico-accademico: una caratterizzazione più completa degli effetti dell’invecchiamento salino sulla *crashworthiness* dei CFRP consentirebbe di definire margini di sicurezza più realistici e orientare la scelta di architetture

lamine meno sensibili al degrado, contribuendo concretamente alla progettazione e alla qualifica di componenti destinati a operare in ambiente salino.

Bibliografia

- [1] S. Borelli, *Definizione di una campagna sperimentale per caratterizzazione a crush di materiali compositi*, Relazione finale di progetto di tirocinio, Università di Bologna, Sede di Forlì.
- [2] M. Moretti, *Analisi degli effetti di invecchiamento in immersione sui materiali compositi*, Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale, Università di Bologna, Sede di Forlì.
- [3] W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch, *Callister's Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2020.
- [4] V. Agostinelli, *Caratterizzazione sperimentale di materiali compositi soggetti ad impatto sul bordo*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale, Università di Bologna, Sede di Forlì.
- [5] M. Liu, Y. Guo, J. Wang, M. Yergin, “Corrosion avoidance in lightweight materials for automotive applications,” *NPJ Materials Degradation*, vol. 2, 2018, art. 24.
- [6] K. Abdurrohman, M. Adhitya, “Effect of water and seawater on mechanical properties of fiber reinforced polymer composites: a review for amphibious aircraft float development,” in *Atti di conferenza IOP*, 2019.
- [7] F. M. Monticeli, F. R. Fuga, M. A. Arbelo, M. V. Donadon, “The effect of fibre orientation on fatigue crack propagation in CFRP: Finite fracture mechanics modelling for open-hole configuration,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 161, 2024, art. 108278.

[8] A. Somwanshi, K. Kaware, V. Sulakhe, M. Kotambkar, A. Vasava, “Advances in composite crashworthiness: material properties, failure mechanisms, and design strategies,” *Engineering Research Express*, vol. 7, no. 3, 2025, art. 032505.

Ringraziamenti

Con l’occasione desidero esprimere la mia profonda gratitudine alla Prof.ssa Maria Pia Falaschetti e al Dott. Francesco Semprucci per avermi accompagnata in questo percorso. Vi ringrazio sinceramente per il tempo, l’attenzione e la disponibilità che mi avete dedicato: la Vostra professionalità e preparazione sono state un prezioso supporto e una grande fonte di ispirazione.

Ai miei genitori, che mi hanno dato la possibilità di arrivare dove sono oggi, al netto delle loro possibilità.

Grazie per avermi permesso di seguire i miei sogni, anche quando sembravano inarrivabili. Questo traguardo è anche vostro.

A mia sorella, tanto distante quanto vicina.

Grazie per essere un punto fisso. Il tuo sostegno e la tua saggezza sono, e continueranno ad essere, tra i bastoni più robusti su cui appoggiarmi.

Ai miei amici più stretti, compagni di vita e Università.

Se sono qui, è anche perché ci siete stati voi a darmi conforto e incoraggiamento quando mi mancava la terra sotto i piedi. Grazie per avermi fatto ritrovare la lucidità e la forza di perseverare.

Al mio complice e braccio destro.

Se penso agli infiniti modi in cui avrei potuto concludere al meglio questo capitolo, capisco che solo in uno ne esco davvero vincitrice. E in questo, ho vinto.

Grazie per la forza e il supporto che mi hai dato, anche nei momenti in cui non ne

avevi nemmeno per te, e per aver creduto in me prima di tutti gli altri.

A te che, nonostante la distanza, sei il mio entanglement.

A Voi Tutti va la mia più sincera gratitudine.

Grazie per il tempo che mi avete dedicato.

A me dedico questo elaborato, dimostrazione concreta della fine di un percorso, con l'augurio che sia solo il primo di una lunga serie di traguardi e soddisfazioni.

