



Politecnico di Torino

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Studio della risposta ad impatto di materiali compositi naturali con
rinforzi 3D

Relatore:

Davide Salvatore Paolino

Correlatori:

Raffaele Ciardiello

Alberto Ciampaglia

Candidato:

Nicola Ranocchia

Matricola: 331997

Anno Accademico 2024/2025

Abstract

Le proprietà di assorbimento e dissipazione di energia proveniente da impatti esterni sono di interesse in molte applicazioni ingegneristiche. Tra gli esempi più comuni si trovano le crash-box nel settore automobilistico e le barriere deformabili per veicoli militari. Tradizionalmente, questo tipo di applicazioni ha fatto ampio uso di metalli duttili. Solo in tempi relativamente recenti si è assistito a una crescente diffusione dei materiali compositi, in particolare in contesti ad alte prestazioni, grazie al favorevole rapporto tra resistenza meccanica e massa. Tuttavia, i compositi presentano meccanismi di rottura più complessi e i costi di produzione risultano attualmente superiori rispetto a quelli dei materiali metallici. Le migliori prestazioni meccaniche sono offerte da materiali altamente energivori, come la fibra di carbonio. La ricerca si è quindi orientata verso soluzioni alternative, sia in termini di sostenibilità durante la produzione, sia di nuovi materiali sostitutivi. Tra questi, la fibra di lino rappresenta una valida opzione grazie al minore impatto ambientale associato alla sua produzione. Tuttavia, le sue inferiori proprietà meccaniche ne limitano l'impiego. Una possibile strategia per migliorare le prestazioni meccaniche consiste nell'ottimizzazione della struttura del rinforzo con tessuti tridimensionali.

Obiettivo di questa tesi è analizzare le proprietà dei materiali compositi naturali rinforzati con tessuti 3D sottoposti a condizioni dinamiche, con particolare riferimento alla fibra di lino. Per fare ciò, sono stati realizzati dei campioni con differenti strutture di rinforzo e diverse combinazioni di fibre di lino e di carbonio. Tali campioni sono stati testati con delle prove di impatto dalle quali è stato ricavato l'assorbimento di energia del materiale. I dati ottenuti sono stati analizzati attraverso alcuni parametri già definiti in letteratura e altri sviluppati nell'ambito di questa tesi per evidenziare le proprietà di interesse. I risultati ottenuti costituiscono una base per la descrizione dell'effetto dell'architettura delle fibre nel comportamento dinamico dei materiali compositi; inoltre, rappresentano un riferimento per la progettazione di compositi con proprietà specifiche o per la realizzazione di modelli numerici.

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia sincera gratitudine al Politecnico di Torino per avermi fornito un ambiente di studio stimolante e di alto livello, che ha reso possibile la mia formazione accademica e professionale.

Un ringraziamento va anche ai laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS) e al gruppo di ricerca presso il quale ho svolto il mio progetto di tesi, per il supporto tecnico e l'accoglienza che hanno reso questa esperienza altamente formativa.

Un sentito ringraziamento va al Prof. Paolino per la sua competenza e il prezioso supporto scientifico e ai Prof. Ciardiello e Prof. Ciampaglia per la loro costante guida, la disponibilità e i consigli offerti durante tutto il percorso di ricerca.

Indice

Abstract	I
Ringraziamenti	II
Elenco delle figure	VII
Elenco delle tabelle	VIII
Elenco dei simboli	IX
Introduzione	1
1 Stato dell'arte	3
1.1 Materiali compositi	3
1.1.1 Fibre e Matrice	4
1.1.2 Proprietà meccaniche	5
1.1.3 Criteri di rottura	7
1.2 Comportamento dinamico dei materiali compositi	9
1.2.1 Parametri per valutare il comportamento dinamico	10
1.2.2 Modi di rottura	12
1.3 Fibre naturali	14
1.3.1 Proprietà Meccaniche	15
1.3.2 Confronto con le fibre sintetiche	15
1.4 Tessuti con architettura tridimensionale	18
1.4.1 Limitazioni tessuti bidimensionali	18
1.4.2 Tessuti tridimensionali	21
2 Prove sperimentali	24
2.1 Preparazione dei campioni	26
2.1.1 Manifattura	27
2.1.2 Architettura	29
2.2 Struttura del banco di prova	35

3	Analisi delle prove sperimentali: Metodologia	39
3.1	Calcolo dei parametri	39
3.1.1	Calcolo del SEA	41
3.1.2	Calcolo CFE ed SCS	43
3.2	Analisi delle curve Forza-Tempo	43
3.2.1	Ripetibilità delle prove	46
3.3	Analisi delle curve Forza-Spostamento	48
3.3.1	Confronto fra le varie architetture	50
4	Analisi delle prove sperimentali: Risultati	57
4.1	Confronto fra energia assorbita e SEA	57
4.2	Effetto dell'architettura tridimensionale	58
4.3	Indice per il confronto tra SEA e CFE	67
4.4	Effetto del quantitativo di fibre	69
4.5	Effetto della velocità	79
5	Conclusioni	84
5.1	Risultati e criticità	84
5.1.1	Risultati	84
5.1.2	Criticità	86
5.2	Possibili sviluppi futuri	87
	Bibliografia	89

Elenco delle figure

1.1	ASHBY diagram dei moduli elastici in relazione alla densità [42]. . .	6
1.2	ASHBY diagram delle tensioni di snervamento in relazione alla densità [42].	6
1.3	Danneggiamenti: a) separazione matrice-fibre [6]; b) danno progressivo della matrice [7]; c) Delaminazione [8].	8
1.4	Specific Energy Absorption di materiali compositi e metalli [14]. . .	10
1.5	Esempio di curva Forza-Spostamento durante un test di compressione [14].	11
1.6	a) Modalità di cedimento per taglio trasversale come descritto da Farley e Jones [15]; b) Modalità di cedimento per sfilacciamento come descritto da Hull [16]; c) Modalità di cedimento per frammentazione come descritto da Hull [16]; d) Modalità di cedimento per instabilità locale come descritto da Farley e Jones [15].	14
1.7	Pubblicazioni di articoli scientifici riguardanti le fibre naturali [28]. . .	17
1.8	Layout 2D.	19
1.9	Effetto dell'energia di impatto su (a) resistenza a trazione residua e (b) resistenza a compressione residua di un laminato 2D carbonio/-resina epossidica [3].	20
1.10	Architettura a tessitura ortogonale (a) e architettura a interlock di strati (b) [31].	22
2.1	Rappresentazione schematica del <i>building block approach</i> applicato al caso della progettazione di un veicolo [17].	25
2.2	Dimensioni provino [17].	29
2.3	Geometria rinforzo semplice.	30
2.4	Geometria rinforzo a frequenza doppia (a) e simmetrico (b).	31
2.5	Andamento delle fibre di binder nei casi rinforzo semplice (a) e a frequenza doppia (b).	32
2.6	<i>Representative Volume Element</i> dei casi rinforzo semplice (a), rinforzo a frequenza doppia (b) e rinforzo simmetrico (c).	33

2.7	Instron Dartower Plus Series (a) e dettagli interni (b) e (c).	35
2.8	Sistema di serraggio del provino.	36
2.9	Sistema di serraggio del provino, struttura interna [37].	37
3.1	Curva Forza - Tempo.	40
3.2	Punti critici usati dal <i>Variable Displacement Algorithm</i> [17].	42
3.3	Dettagli curva $F - t$ provini S_C_12 e S_C_13.	44
3.4	Istanti della rottura del Provino S_C_12.	45
3.5	Istanti di rottura del Provino S_C_13, in particolare rottura intorno ai 2 ms .	46
3.6	Grafici Forza-Spostamento ed Energia-Spostamento di un provino con architettura bidimensionale NR_17.	48
3.7	Rottura tipica di un provino senza rinforzo a splaying NR_17.	51
3.8	Rottura tipica di un provino con rinforzo semplice S_L_46 (a) e con rinforzo a frequenza doppia FD_L_49 (b).	53
3.9	Curve Forza-Spostamento ed Energia-Spostamento di un provino con rinforzo semplice S_L_46 (a) e rinforzo a frequenza doppia FD_L_49 (b).	55
3.10	Curve $F-s$ sovrapposte.	56
4.1	Risultati SEA per diverse architetture.	58
4.2	Curve $F-s$ dei provini NR_17, S_L_46 e S_C_5.	59
4.3	Risultati CFE per diverse architetture.	61
4.4	Risultati SCS per diverse architetture.	62
4.5	Geometria rinforzo a frequenza doppia (a) e simmetrico (b).	63
4.6	Risultati SEA per diverse architetture.	64
4.7	Curve $F-s$ dei provini NR_17, S_L_46, FD_L_49 e Simm_L_55.	64
4.8	Risultati CFE per diverse architetture.	65
4.9	Risultati SCS per diverse architetture.	67
4.10	Andamento del rinforzo tra i layer nel caso di rinforzo semplice (a), rinforzo a frequenza doppia (b) e rinforzo simmetrico (c).	72
4.11	Confronto fra SEA e SEA _f .	74
4.12	Confronto fra ΔSEA e ΔSEA_f .	76
4.13	Confronto fra ΔSEA , ΔSEA_f e ΔSEA_W .	78
4.14	Andamento CFE in funzione della velocità nel caso senza rinforzo.	80
4.15	Andamento SEA in funzione della velocità nel caso senza rinforzo e nel caso con rinforzo a frequenza doppia in lino.	81

4.16	Andamento CFE in funzione della velocità nel caso senza rinforzo e nel caso con rinforzo a frequenza doppia in lino.	82
4.17	Andamento SCS in funzione della velocità nel caso senza rinforzo e nel caso con rinforzo a frequenza doppia in lino.	83
5.1	Provino rotto nella zona superiore.	87

Elenco delle tabelle

1.1	Parametri per la descrizione di un composito.	5
1.2	Proprietà meccaniche delle principali fibre naturali [25].	15
2.1	Proprietà dell'IN2 Epoxy Infusion Resin [41].	26
2.2	Proprietà del tessuto di lino intrecciato (2×2) FLAXDRY BL200 [38].	27
2.3	Proprietà della fibra di lino Bcomp ampliTex [®] 5009 [40].	31
2.4	Proprietà della fibra di carbonio 450 g 12k [39].	32
2.5	Peso dei provini nelle varie tipologie di rinforzo.	34
3.1	Numero di repliche effettuate e valide per ciascuna architettura e velocità di prova.	47
3.2	Risultati R^2 per diverse architetture.	54
4.1	Risultati energia assorbita per diverse architetture.	57
4.2	Risultati SEA per diverse architetture.	59
4.3	Risultati CFE per diverse architetture.	61
4.4	Risultati SCS per diverse architetture.	61
4.5	Risultati SEA per diverse architetture.	63
4.6	Risultati CFE per diverse architetture.	65
4.7	Risultati SCS per diverse architetture.	66
4.8	Valori di $\mathbf{I}$ per le architetture in esame.	69
4.9	Valori di densità delle varie tipologie di fibre.	71
4.10	Valori di $v_f\%$ delle varie tipologie di rinforzo.	73
4.11	Confronto fra SEA e SEA _f	74
4.12	Confronto fra ΔSEA e ΔSEA_f	75
4.13	Valori di $w_f\%$ delle varie tipologie di rinforzo.	77
4.14	Confronto fra ΔSEA , ΔSEA_f e ΔSEA_w	78
4.15	Tabella andamenti SEA, CFE e SCS in funzione della velocità.	79
4.16	Valori pendenze di SEA, CFE e SCS in funzione della velocità per i diversi tessuti.	83

Elenco dei simboli

ΔSEA	Incremento percentuale di SEA [%]		rinforzo [kg/m]
ΔSEA_f	Incremento percentuale di SEA_f [%]	σ_{ij}	Componenti del tensore delle tensioni [MPa]
ΔSEA_W	Incremento percentuale di SEA_W [%]	σ_{Lcu}	Resistenza a compressione longitudinale [MPa]
δ	Quantità di materiale impattato nella direzione di impatto [m]	σ_{Ltu}	Resistenza a trazione longitudinale [MPa]
I	Indice vettoriale per il confronto tra SEA e CFE [-]	σ_{Tcu}	Resistenza a compressione trasversale [MPa]
ν_{12}	Coefficiente di Poisson principale [-]	σ_{Ttu}	Resistenza a trazione trasversale [MPa]
ν_{23}	Coefficiente di Poisson trasversale [-]	τ_u	Resistenza a taglio nel piano [MPa]
ρ	Densità del materiale [kg/m ³]	ε_{ij}	Componenti del tensore delle deformazioni [-]
ρ_f	Densità delle fibre [kg/m ³]	A	Sezione del provino perpendicolare alla direzione di impatto [m ²]
ρ_m	Densità della matrice [kg/m ³]	a	Accelerazione del dardo in funzione del tempo [m/s ²]
ρ_{al}	Densità areale delle fibre [kg/m ²]	A_l	Area del singolo layer [m ²]
ρ_{lr}	Densità lineare della fibra di		

ELENCO DEI SIMBOLI

C_{ij}	Costanti elastiche del materiale composito [GPa]	m	Massa del dardo [kg]
c_s	Fattore di attraversamento dello spessore [-]	n_l	Numero di layer [-]
CFE	Crash Force Efficiency [-]	n_f	Numero di fibre di rinforzo del provino [-]
E	Energia assorbita durante il test [J]	R^2	Coefficiente di determinazione [-]
E_1	Modulo longitudinale [GPa]	S_m	Spessore medio del provino [m]
E_2	Modulo trasversale [GPa]	SCS	Sustained Crash Stress [MPa]
F	Forza durante la prova [N]	SEA	Specific Energy Absorption [J/kg]
F_{mean}	Forza media durante la prova [N]	SEA_f	Specific Energy Absorption normalizzato rispetto alla frazione volumetrica di fibre [J/kg]
F_{peak}	Forza massima durante la prova [N]	SEA_w	Specific Energy Absorption normalizzato rispetto alla frazione in massa delle fibre [J/kg]
f_r	Frequenza di attraversamento dello spessore [-]	SS_{res}	Somma dei quadrati dei residui [-]
g	Accelerazione di gravità [m/s ²]	SS_{tot}	Somma totale dei quadrati [-]
G_{12}	Modulo di taglio [GPa]	t	Tempo [s]
h	Altezza di caduta [m]	v	Velocità di caduta libera [m/s]
$I_{\log}$	Indice logaritmico per il confronto tra SEA e CFE [-]	v_0	Velocità iniziale all'impatto [m/s]
k_t	Rigidezza tangente [N/mm]	V_c	Volume totale del composito [m ³]
l_{fr}	Lunghezza delle fibre di rinforzo dentro un provino [m]	V_f	Volume delle fibre [m ³]
L_m	Lunghezza media del provino [m]		

ELENCO DEI SIMBOLI

v_f	Frazione volumetrica di fibre [-]	w_f	Frazione in massa delle fibre [-]
V_m	Volume della matrice [m ³]	z	Spostamento nella direzione di impatto [m]
W_c	Massa totale del composito [kg]	z_0	Posizione iniziale all'impatto [m]
W_f	Massa delle fibre [kg]		
W_m	Massa della matrice [kg]		

Introduzione

I materiali compositi sono definiti come «due o più materiali distinti fisicamente e meccanicamente [...] uniti in modo tale che la dispersione di un materiale nell'altro possa essere fatta in modo controllato al fine di ottenere delle proprietà specifiche» [1]. Generalmente, i componenti sono due: matrice e fibre, le quali possono essere intrecciate in diverse configurazioni al fine di avere proprietà meccaniche che si adatti al particolare caso progettuale. Questi materiali trovano impiego in contesti in cui sono richieste buone proprietà meccaniche ed allo stesso tempo pesi contenuti.

L'ottimo rapporto tra prestazioni e peso è tuttavia accompagnato da costi di produzione elevati e da un impatto ambientale non trascurabile. Questo fa sì che l'uso di materiali compositi sia giustificato solo per applicazioni in cui il beneficio dato dalla riduzione di peso compensi i limiti sopra citati. È, ad esempio, il caso del settore automotive, dove la tendenza a ridurre le emissioni ha portato ad esigenze riguardo la riduzione di peso, senza però compromettere la sicurezza. Un'altra limitazione dei compositi è che la loro descrizione analitica è molto più complessa di quella dei metalli, per via della loro anisotropia e della presenza di un numero elevato di modi di rottura.

Anche nell'assorbimento di energia, i materiali compositi presentano proprietà eccellenti in relazione alla loro massa. Ciò li rende largamente usati in un vasto numero di applicazioni finalizzate alla dissipazione di energia per la protezione di cose o persone. Con riferimento al settore automobilistico, sono presenti elementi adibiti all'assorbimento dell'energia, detti «crash-box», i quali hanno il compito di dissipare parte dell'energia cinetica del veicolo deformandosi. Questi elementi possono essere realizzati anche in composito, con notevole riduzione di peso rispetto al caso dei metalli duttili.

Per le applicazioni meno critiche, si stanno affermando con successo le fibre naturali

che, pur presentando proprietà meccaniche inferiori, offrono vantaggi in termini di costi di produzione. Inoltre, l'impatto ambientale di questi materiali è ben ridotto rispetto al caso delle più energivore fibre sintetiche. Risulta quindi di interesse applicativo andare ad analizzare le proprietà delle fibre naturali, al fine di identificare eventuali settori di utilizzo in cui il rapporto tra impatto ambientale e prestazioni sia a favore di esse.

Una soluzione per migliorare le proprietà meccaniche è quella di cambiare la struttura del tessuto, questo perché esse influenzano notevolmente la risposta del composito alle sollecitazioni esterne. Di particolare interesse può essere lo studio di rinforzi tridimensionali, i quali consistono nell'inserire fibre con sviluppo perpendicolare al piano del laminato. In questo modo, si ottiene un materiale in cui la delaminazione è contrastata non solo dalla resistenza della matrice, ma anche dalla presenza di queste fibre fuori dal piano.

Lo scopo di questa tesi è analizzare la risposta all'impatto dei materiali compositi realizzati con fibre naturali, in particolare con fibra di lino. Si intende inoltre indagare l'efficacia di rinforzi tridimensionali nel miglioramento delle proprietà di resistenza agli impatti. L'analisi è stata condotta sulla base di prove sperimentali.

Capitolo 1

Stato dell'arte

In questo capitolo ci si propone di analizzare lo stato dell'arte riguardo la descrizione del comportamento dei materiali compositi sottoposti a carichi dinamici. Si analizzeranno poi i principali risultati raggiunti dalla ricerca riguardo alle fibre naturali e ai tessuti con architetture tridimensionali.

1.1 Materiali compositi

Un materiale composito è definito come due o più costituenti diversi dal punto di vista chimico, combinati macroscopicamente al fine di ottenere un nuovo materiale. Quest'ultimo avrà delle proprietà che sono diverse da entrambi i materiali di partenza.

I materiali compositi fanno la loro comparsa dopo la Seconda Guerra mondiale, ma solo per applicazioni di nicchia. Al giorno d'oggi le tecniche di manifattura e la crescente conoscenza di questi materiali ha fatto sì che essi si stiano diffondendo in molte applicazioni, sostituendo i metalli soprattutto in quei casi in cui il risparmio di peso sia un vincolo indispensabile dal punto di vista progettuale. Oltre alle ottime prestazioni in relazione alla loro massa, i materiali compositi hanno il pregio di poter essere progettati per una specifica condizione di carico, non solo in termini di geometria, ma anche in termini di proprietà elastiche lungo le varie direzioni. Questa caratteristica di anisotropia implica però anche la necessità di avere modelli analitici e numerici molto più complessi, che aumentano inevitabilmente i costi di progettazione.

Un composito è generalmente costituito da fibre di rinforzo immerse in una matrice polimerica rigida [3] e le sue proprietà dipendono dalla combinazione di quelle dei due elementi di partenza. Generalmente il composito avrà delle proprietà migliori rispetto alla matrice, ma inferiori rispetto a quelle delle fibre, con ulteriori proprietà aggiuntive caratteristiche del solo composito [4].

1.1.1 Fibre e Matrice

Le fibre forniscono il principale contributo alle proprietà meccaniche e sono divise in prima battuta in fibre corte e fibre lunghe. Per applicazioni strutturali, dove sono richiesti alti moduli elastici ed alte resistenze, si usano le fibre lunghe, disposte generalmente in strutture unidirezionali o 2D. Successivamente, si possono unire più strati al fine di ottenere un laminato.

L'idea alla base dell'uso delle fibre è che lo stesso materiale presenta proprietà migliori se usato in componenti piccoli invece che grandi. Questo è dovuto al fatto che in componenti più piccoli la probabilità di incontrare difetti è ridotta, cosa che implicherà una minore probabilità di formazione e propagazione di cricche. Le fibre sono l'estremizzazione di questo concetto in quanto hanno diametri prossimi a quelli del cristallo del materiale di cui sono realizzate.

La matrice non è il componente principale dal punto di vista strutturale, ma ha il compito di trasferire il carico da una fibra all'altra, di arrestare l'avanzamento delle cricche delle fibre e proteggerle dagli agenti esterni. A seconda della temperatura di utilizzo si usano diverse tipologie di matrice; le principali in ordine crescente di temperatura di utilizzo sono: polimeri, metalli, vetro e materiali ceramici. I polimeri sono quelli più largamente usati e si dividono in termoplastici e termoindurenti. Quest'ultimi vengono usati per le applicazioni strutturali e sono composti da una resina ed un indurente. Essi vengono uniti con varie tecniche alle fibre e, dopo un tempo sufficientemente lungo, induriscono formando legami covalenti molto forti. Questi legami fanno sì che il materiale non sia più riciclabile, dato che la resina degrada se portata ad alte temperature.

1.1.2 Proprietà meccaniche

Per descrivere il comportamento elastico di un materiale si usa la legge di Hooke, che lega tensioni e deformazioni. Nel caso più generale un materiale ha una matrice che lega tensioni e deformazioni di 81 elementi, di cui 21 indipendenti tra loro. Considerando che un composito può essere descritto come un materiale trasversalmente isotropo, il numero di costanti indipendenti si riduce a 5.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

I parametri per la descrizione di un composito sono quindi cinque costanti elastiche e cinque tensioni di rottura:

Proprietà elastiche	Tensioni di rottura
Modulo longitudinale, E_1	Resistenza a trazione longitudinale, σ_{Ltu}
Modulo trasversale, E_2	Resistenza a trazione trasversale, σ_{Ttu}
Coefficiente di Poisson principale, ν_{12}	Resistenza a compressione longitudinale, σ_{Lcu}
Modulo di taglio, G_{12}	Resistenza a compressione trasversale, σ_{Tcu}
Coefficiente di Poisson trasversale, ν_{23}	Resistenza a taglio nel piano, τ_u

Tabella 1.1: Parametri per la descrizione di un composito.

Per quanto riguarda le proprietà elastiche, in Figura 1.1 si osserva come i materiali compositi presentino generalmente moduli elastici confrontabili con i metalli. Essi sono generalmente minori, ma nel caso di compositi ben progettati i valori di rigidità possono avvicinarsi a quelli di alcuni metalli. Dal punto di vista della densità, però, risulta evidente come i compositi risultino più leggeri.

In Figura 1.2, in modo analogo, è possibile osservare come i materiali compositi presentino una tensione di rottura simile ai materiali metallici, ma maggiore se normalizzata rispetto alla densità.

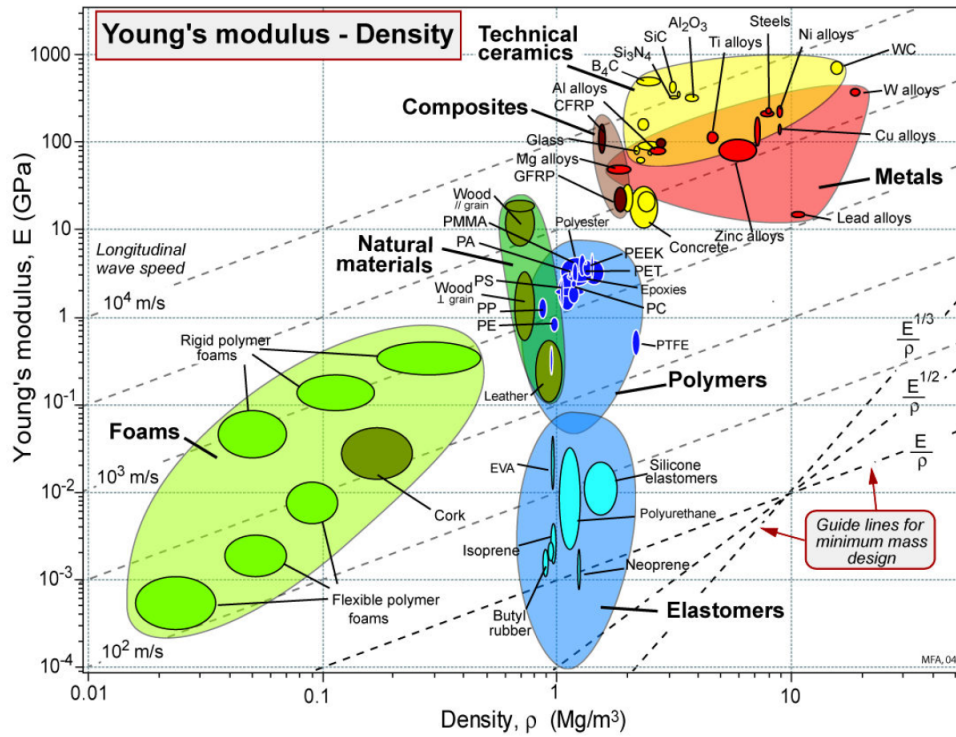


Figura 1.1: ASHBY diagram dei moduli elastici in relazione alla densità [42].

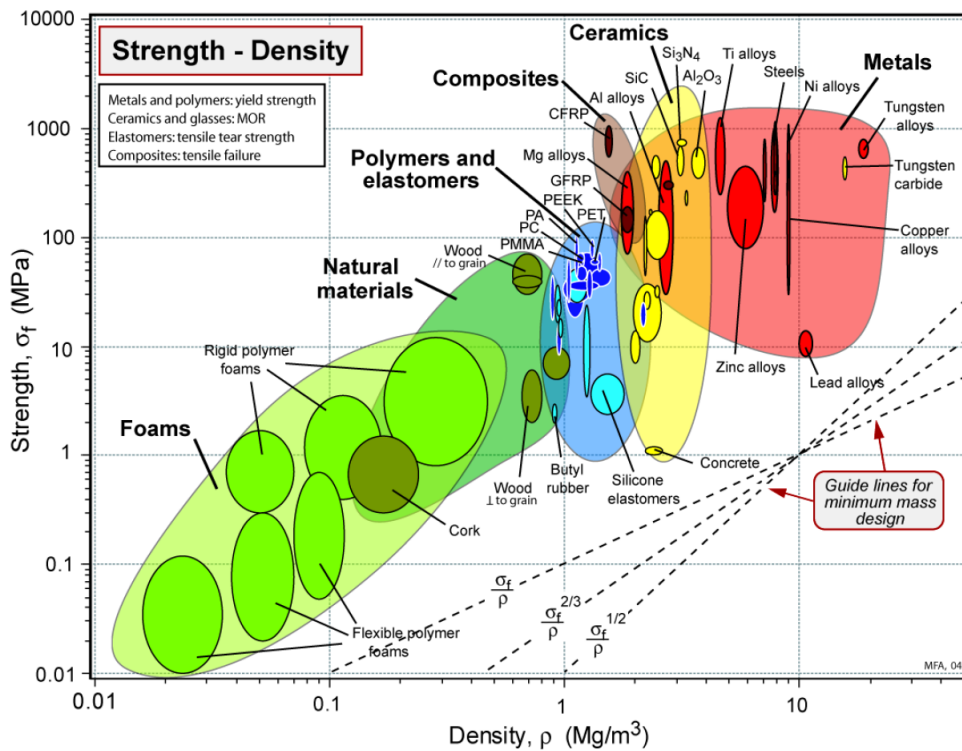


Figura 1.2: ASHBY diagram delle tensioni di snervamento in relazione alla densità [42].

Altre proprietà notevoli di questi materiali includono le seguenti [4]:

- Alcuni materiali compositi non si deformano in campo plastico: il loro limite elastico corrisponde al limite di rottura.
- Alcuni materiali compositi hanno un'elevata resistenza ai carichi di fatica, anche se il comportamento dipende fortemente dall'orientamento delle fibre e dal tipo di resina utilizzata.
- Spesso non sono soggetti a fenomeni di corrosione, mentre lo sono nei casi di accoppiamento galvanico tra fibre di carbonio e metalli come l'alluminio.
- In generale, i materiali compositi sono poco sensibili alla maggior parte dei comuni agenti chimici utilizzati nei motori: grassi, oli, fluidi idraulici, vernici, petrolio. Tuttavia, i prodotti per la rimozione della vernice attaccano le resine epossidiche.
- Molti compositi rinforzati con fibre di vetro o di carbonio offrono una buona resistenza al fuoco rispetto alle leghe leggere di pari spessore, mentre materiali con fibre naturali o resine termoplastiche possono non superare i test di infiammabilità.

1.1.3 Criteri di rottura

Nei materiali metallici, data la loro isotropia, è possibile confrontare un qualsiasi stato di tensione con uno equivalente che porta alla rottura del componente. Ciò non è possibile nel caso dei materiali compositi in quanto i parametri di rottura sono cinque e le tensioni principali non possono essere usate per via dell'anisotropia.

I cedimenti che coinvolgono strutture in materiale composito sono caratterizzati da tre fasi: la prima (fase elastica), in cui non compare alcun danno nella struttura; la seconda, in cui a determinati livelli di sollecitazione si originano i danni; e l'ultima, in cui il danno si propaga all'interno della struttura (fase post-cedimento)[5]. Per quanto riguarda i laminati compositi multistrato, i danni possono essere classificati in tre categorie: i "cedimenti intralaminari", come la rottura delle fibre, il distacco tra fibra e matrice (Figura 1.3.a), il danneggiamento progressivo della matrice (Figura 1.3.b) e i "cedimenti interlaminari", come i danni da delaminazione (Figura 1.3.c), che si verificano all'interfaccia tra strati adiacenti. Tali danni possono manifestarsi sia singolarmente che simultaneamente [5].

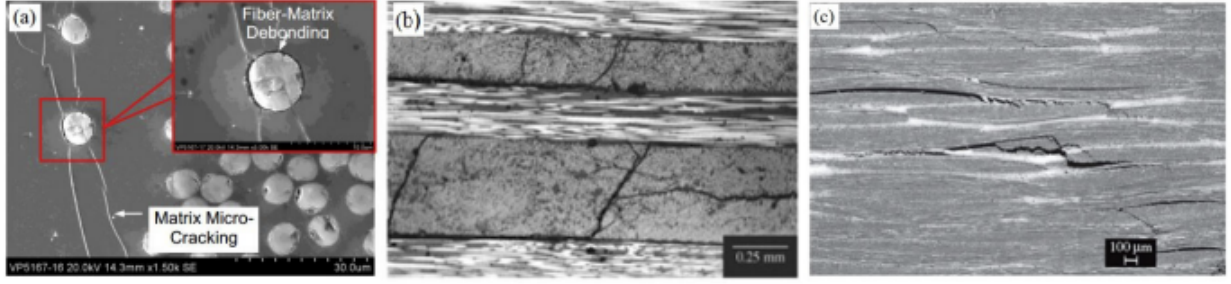


Figura 1.3: Danneggiamenti: a) separazione matrice-fibre [6]; b) danno progressivo della matrice [7]; c) Delaminazione [8].

A causa della loro anisotropia, non è possibile trovare in letteratura equazioni che mettano in relazione i modi di rottura, le proprietà del materiale, le condizioni di carico e i livelli di tensione/deformazione. Tuttavia, supportati da evidenze sperimentali, è possibile formulare alcune affermazioni sui meccanismi di rottura [5]. I più semplici criteri di rottura sono il criterio delle tensioni massime e delle deformazioni massime, che non tengono in considerazione l'influenza reciproca delle varie tensioni e, per tale motivo, non verranno analizzati.

Un primo criterio di interesse è il criterio di Tsai-Hill. Esso è basato sulla densità di energia deviatorica, è quindi un'estensione del criterio di Von-Mises ai materiali anisotropi. In questo caso si considera l'interazione tra tutte le componenti di tensione tramite la disequazione:

$$(G_2 + G_3)\sigma_1^2 + (G_1 + G_3)\sigma_2^2 + (G_1 + G_2)\sigma_3^2 - 2G_3\sigma_1\sigma_2 - 2G_2\sigma_1\sigma_3 - 2G_1\sigma_2\sigma_3 + 2G_4\tau_{23}^2 + 2G_5\tau_{13}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 \geq 1 \quad (1.2)$$

Dove le costanti G_i si ricavano sperimentalmente dai valori di resistenza del materiale composito, e vengono inserite nella formula del criterio di Tsai-Hill per prevedere il cedimento del laminato in funzione delle tensioni applicate σ_i e τ_{jk} . Questo modello matematico non considera però le diverse proprietà che i compositi presentano in trazione ed in compressione. Una correzione sulla base di modelli sperimentali è stata fatta da Tsai e Wu, che hanno proposto la seguente disequazione:

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (1.3)$$

Dove le prime sei costanti sono ricavabili sperimentalmente e H_{12} può essere ricavata sempre sperimentalmente o da modelli empirici come Tsai-Hill [9] o Hoffman [10].

Attualmente, un tema aperto di grande rilevanza riguarda i criteri di rottura dipendenti dalla velocità di deformazione (strain-rate dependent failure criteria). Ad esempio, la legge di Cowper–Symonds [11] è stata utilizzata per modellare la variazione della resistenza a trazione e compressione nei laminati compositi sottoposti ad alte velocità di deformazione [5]. La relazione tra tensione e velocità di deformazione è data da:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (1.4)$$

Dove σ_d è la tensione nel caso di carico dinamico, σ_s è la tensione nel caso di carico quasi-statico, $\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione e D e q sono due parametri tarati sulla base dei dati sperimentali.

1.2 Comportamento dinamico dei materiali compositi

I materiali compositi polimerici possono essere molto efficaci nelle applicazioni in cui sono previsti degli impatti per via della combinazione tra alta energia assorbita e bassa densità. Questa proprietà viene ben quantificata dal SEA (Specific Energy Absorption), che verrà definito nel Capitolo 1.2.1.

Come si può notare in Fig. 1.4, i materiali compositi presentano proprietà di assorbimento dell'energia in relazione alla densità molto maggiori rispetto ai metalli. Tuttavia, si nota anche una grande differenza tra i vari compositi. Infatti queste proprietà sono fortemente influenzate da molti fattori, come le tecniche di manifattura, la relazione tra fibre e matrice e i tipi di materiali usati per realizzare il composito.

Un'altra importante differenza con i materiali metallici è che, mentre quest'ultimi cedono in maniera prevalentemente plastica, i materiali compositi hanno comportamento quasi completamente fragile. Questo determina un minore assorbimento di energia in caso di trazione, ma un buon comportamento nel caso della compressione.

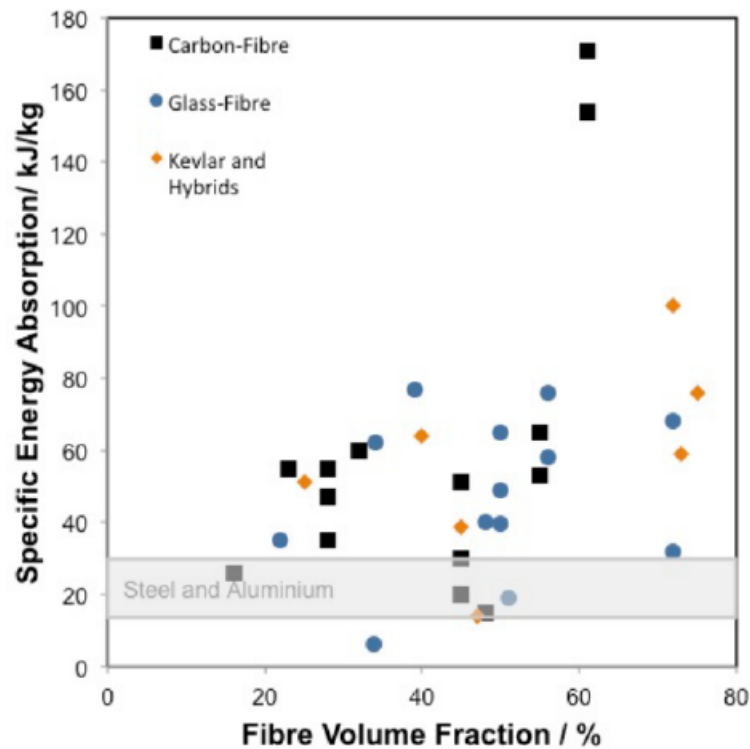


Figura 1.4: Specific Energy Absorption di materiali compositi e metalli [14].

1.2.1 Parametri per valutare il comportamento dinamico

Il test più usato per valutare l'assorbimento di energia di un composito è un test di compressione, che può essere condotto in condizioni quasi-statiche o dinamiche. Generalmente questo viene fatto con una macchina che fa impattare con velocità nota una massa sul campione.

L'output principale della macchina è una curva forza-spostamento, che può essere divisa nel seguente modo (Fig. 1.5):

- Una prima fase con incremento lineare che porta al picco di forza, oltre il quale inizia la fase di rottura del provino.
- Una seconda fase di propagazione della rottura del provino con forza circa costante.
- Una parte finale con diminuzione della forza verso la fine del test.

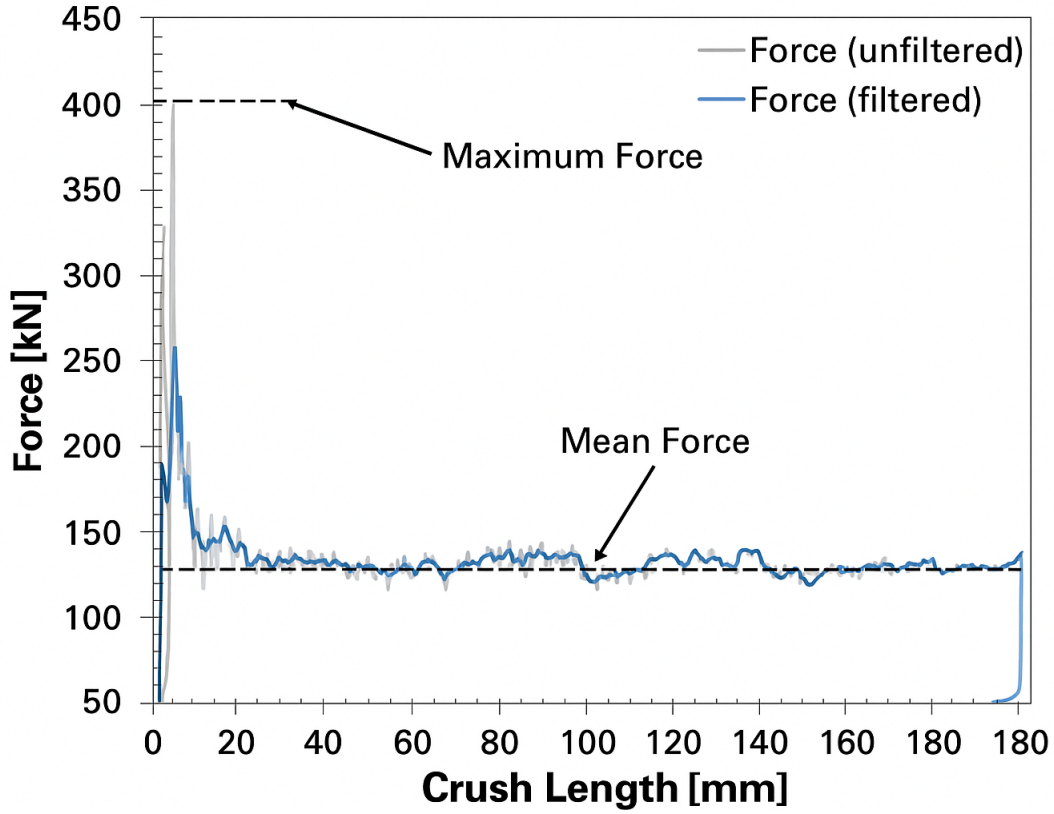


Figura 1.5: Esempio di curva Forza-Spostamento durante un test di compressione [14].

Il principale parametro usato in letteratura per quantificare le prestazioni dinamiche di un materiale è il SEA: Specific Energy Absorption. Esso è definito come l'energia per unità di massa assorbita dal materiale stesso:

$$SEA = \frac{E}{\rho A \delta} = \frac{\int_0^\delta F d\delta}{\rho A \delta} = \frac{F_{\text{mean}}}{\rho A} \quad (1.5)$$

Dove:

- SEA : Specific Energy Absorption [kJ/kg]
- E : Energia assorbita durante il test [J]
- ρ : Densità del materiale [g/m^3]
- A : Sezione del provino perpendicolare alla direzione di impatto [m^2]
- δ : Quantità di materiale impattato nella direzione di impatto [mm]

- F : Forza durante la prova $[N]$
- F_{mean} : Forza media $[N]$

Dal punto di vista delle prestazioni si vuole un materiale con un SEA più alto possibile, che comporta un maggiore assorbimento di energia in relazione alla massa del componente.

Un altro indicatore delle performance del materiale è la Crash Force Efficiency (CFE), definita come il rapporto tra la forza media e il picco di forza F_{peak} .

$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{peak}} \quad (1.6)$$

Valori prossimi ad 1 di questo parametro indicano che l'andamento della forza ha un picco molto simile al suo valore medio.

Infine, si definisce il Sustained Crash Stress (SCS) come lo stress medio a cui è sottoposto il componente durante il test:

$$SCS = \frac{F_{mean}}{A} \quad (1.7)$$

Questo parametro può essere usato per confrontare gli stress che interessano diversi tipi di strutture durante degli impatti.

1.2.2 Modi di rottura

Per via della complessa struttura interna composta da fibre e matrice, possono presentarsi diversi modi di rottura. Il cedimento è il risultato di diversi fenomeni [17]:

- Distacco dell'interfaccia tra matrice e fibre.
- Cedimento delle fibre sotto carico di trazione o compressione, che può presentare un aspetto fragile (cedimento improvviso tipico delle fibre di carbonio e di vetro) o un aspetto duttile (fibre in Kevlar o termoplastiche).
- Cedimento della matrice sotto carico di trazione, compressione o taglio, che può presentare un aspetto fragile (con forte frammentazione, tipico dei ter-

moindurenti) o duttile (deformazione plastica, tipica dei termoplastici).

Dagli studi di Farley e Jones [15] e Hull [16] è possibile identificare i seguenti modi di rottura [17]:

- Tearing o taglio trasversale quando la cricca si propaga all'interno degli strati del tessuto causando la rottura sia della matrice che delle fibre (Figura 1.6a); la rottura delle fibre comporta un'elevata assorbimento di energia.
- Splaying o flessione della lamina quando il laminato si piega, causando delaminazione tra gli strati, che consiste nel distacco dell'interfaccia e nella rottura della matrice con la rottura di poche o nessuna fibra (Figura 1.6b).
- Fragmentation o frattura quando si formano diversi piccoli frammenti e si verifica la rottura sia della matrice che delle fibre (Figura 1.6c).
- Local buckling o piegamento quando si ha una flessione locale della struttura, un comportamento simile alla piegatura plastica dei metalli duttili (Figura 1.6d).

È stata identificata una forte dipendenza del SEA dal modo di rottura. Infatti, lo stesso materiale può manifestare assorbimenti di energia molto differenti a seconda del modo di rottura che si presenta. In fase sperimentale, bisogna quindi tenere in considerazione il modo di rottura che si sta studiando.

Si è osservato sperimentalmente che i modi di rottura che comportano il maggior assorbimento di energia sono lo splaying e il tearing. Lo splaying è la modalità di cedimento tipica delle geometrie piane o a bassa curvatura realizzate con materiali a fibra lunga, mentre il tearing e la frammentazione sono più tipici degli elementi d'angolo.

Questa caratterizzazione è una semplificazione di quello che avviene nella realtà. Infatti, in una rottura reale coesisteranno diversi modi di rottura, che si presentano in maniera aleatoria.

I diversi modi di rottura sono influenzati da differenti geometrie della struttura e da diverse condizioni al contorno ed hanno influenza sull'energia assorbita. Ne risulta l'evidenza sperimentale che strutture con diversi livelli di curvatura possono generare differenti livelli di SEA anche se realizzate con lo stesso materiale [18].

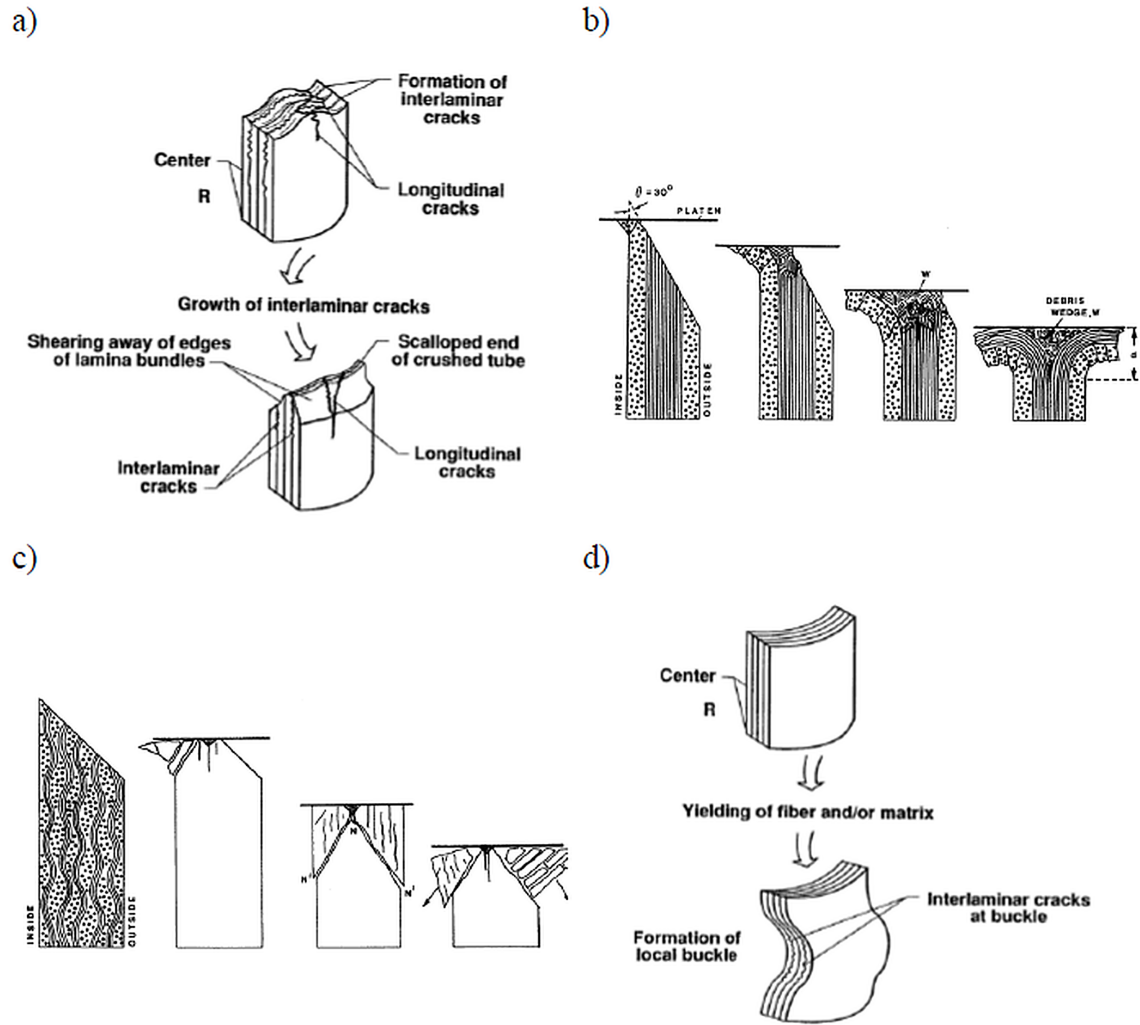


Figura 1.6: a) Modalità di cedimento per taglio trasversale come descritto da Farley e Jones [15]; b) Modalità di cedimento per sfilacciamento come descritto da Hull [16]; c) Modalità di cedimento per frammentazione come descritto da Hull [16]; d) Modalità di cedimento per instabilità locale come descritto da Farley e Jones [15].

1.3 Fibre naturali

All'inizio del Novecento, l'uso delle fibre naturali cominciò a diminuire in molti settori, sostituito da prodotti a base di polimeri, considerati superiori e adottati in numerose applicazioni. La diffusione dei materiali polimerici crebbe rapidamente nei settori automobilistico, manifatturiero, aerospaziale e dei trasporti. Nonostante le eccellenti proprietà meccaniche, termiche e tribologiche, i polimeri sintetici non sono biodegradabili, contribuendo così a un impatto ambientale crescente [20]. Per questo motivo, la ricerca di alternative più sostenibili è diventata urgente e le fibre naturali sono emerse come valide sostitute delle fibre sintetiche [21]. Negli ultimi vent'anni si è assistito a un rinnovato interesse verso le fibre naturali, grazie alle

loro qualità come biodegradabilità, sostenibilità, leggerezza e basso costo [19]. Ad esempio, la cellulosa presenta una struttura quasi cristallina. Il suo modulo elastico longitudinale è pari a 135,000 MPa, rispetto agli 86,000 MPa del vetro di tipo “R”. Sembra quindi possibile ottenere prestazioni meccaniche paragonabili a quelle del vetro [4].

1.3.1 Proprietà Meccaniche

I compositi completamente sintetici sono costituiti sia da una matrice che da un materiale di rinforzo di origine artificiale. Al contrario, i compositi sostenibili impiegano almeno uno dei due componenti proveniente da fonti naturali o rinnovabili e, in genere, presentano prestazioni meccaniche inferiori. Tuttavia, considerando il loro minore impatto ambientale, queste prestazioni ridotte possono essere considerate accettabili. Attualmente, i compositi sostenibili offrono una gamma di proprietà che li rende competitivi in diversi settori, come l'imballaggio, le applicazioni non strutturali e il campo biomedicale.

Si riportano di seguito le proprietà meccaniche delle principali fibre naturali usate in ambito industriale e di ricerca accademica:

Fibre	Density [-]	Young's Modulus [GPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]
Sugar palm	1.5	10.4	421.4	9.8
Bamboo	0.6–1.1	11–17	140–230	—
Cotton	1.5–1.6	5.5–12.6	287–597	7–8
Flax	1.54	27–85	345–2000	1–4
Hemp	1.47	17–70	368–800	1.6
Jute	1.44	10–30	393–773	1.5–1.8
Kenaf	1.2	14–53	240–930	1.6
Ramie	1.5–1.56	27–128	400–1000	1–4

Tabella 1.2: Proprietà meccaniche delle principali fibre naturali [25].

1.3.2 Confronto con le fibre sintetiche

I vantaggi delle fibre naturali sono i seguenti [4]:

- Sono biodegradabili.
- Sono neutre rispetto alle emissioni di anidride carbonica.

- Hanno un basso costo energetico (tuttavia, la lavorazione delle fibre richiede molta acqua ed è comunque un'industria inquinante).
- Sono leggere e molte di esse presentano valori interessanti di modulo specifico, combinati con eccellenti proprietà di smorzamento e resistenza agli urti.
- Alcune, come il lino e la canapa, sono piante autoctone. Ciò ne garantisce l'approvvigionamento e offre una prospettiva significativa e preziosa per l'industria agricola.

Di contro, hanno alcune limitazioni [4]:

- Le fibre naturali mostrano una notevole variabilità nelle proprietà a causa di fattori ambientali come clima, suolo e posizione nella pianta, causando irregolarità in diametro, lunghezza e struttura.
- Sono idrofile e possono assorbire fino al 10% di umidità, con conseguente degrado delle fibre e riduzione delle prestazioni meccaniche nel tempo.
- Non resistono alle alte temperature: perdono rigidità sopra i 160°C e si degradano attorno ai 200°C, rendendole inadatte ad operare in condizioni di elevate temperature.
- La resistenza a trazione è limitata, quindi risultano più adatte per componenti rigidi non strutturali.
- È necessario considerare il rischio di contaminazione microbica durante l'uso o lo stoccaggio.

L'interesse della ricerca nei confronti di queste fibre è crescente, poiché numerosi studi [22, 23] evidenziano come esse presentino buone proprietà meccaniche in relazione al loro peso. Difatti, negli ultimi due decenni si osserva un chiaro trend in crescita nel numero di pubblicazioni (Figura 1.7) [28].

Un ulteriore aspetto che ne accresce il valore scientifico è la loro origine vegetale: trattandosi di materiali rinnovabili e generalmente a bilancio neutro di carbonio, le emissioni generate durante la lavorazione o la combustione sono compensate dalla CO₂ assorbita dalle piante nella fase di crescita. In particolare, la cellulosa e i suoi derivati, inclusi molti tipi di fibre naturali, sono ampiamente riconosciuti in letteratura come materiali eco-compatibili [25], rendendo possibile lo sviluppo di

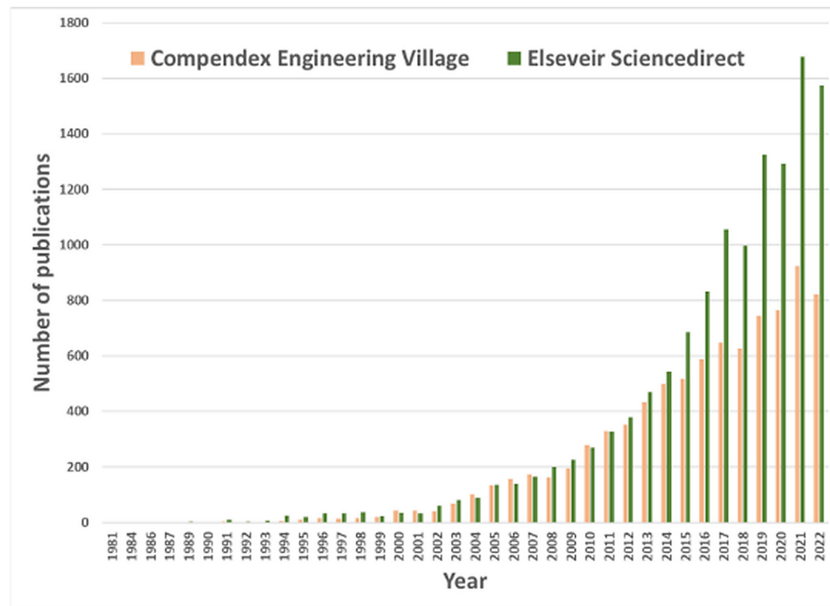


Figura 1.7: Pubblicazioni di articoli scientifici riguardanti le fibre naturali [28].

compositi sostenibili dal punto di vista ambientale [29].

Ad esempio, Holbery e Houston [26] hanno confrontato i costi energetici per ottenere un tappeto in fibra di lino ($9,6 MJ/kg$) rispetto a uno in fibra di vetro ($54,7 MJ/kg$). Uno studio simile è stato condotto da Joshi, il quale ha rilevato che l'energia necessaria per produrre fibra di canapa è solo il 10% di quella richiesta per la fibra di vetro [27].

Ovviamente, in settori come l'automotive o l'aviazione, si ha un ulteriore vantaggio in termini di impatto ambientale dovuto all'uso dei materiali compositi, che è il risparmio di carburante dettato dalla diminuzione di peso. Esso però non viene in questa sede considerato in quanto è dato dall'uso di qualsiasi composito e non dei compositi naturali in particolare. In ogni caso, è bene citare che le industrie aeronautiche hanno contribuito alla riduzione delle emissioni di CO_2 del 15–20% grazie all'inclusione di materiali compositi [30].

Per quanto riguarda l'industria, la quota di mercato degli Stati Uniti indicava che il mercato dei compositi era pari a 2,7 miliardi di sterline nel 2006, salendo a 3,3 miliardi di sterline nel 2012, con un incremento annuo previsto del 3,3%. Tra il 1994 e il 2004 si è registrato un aumento significativo della quota di mercato, con un tasso di crescita del 13%, equivalente a 275 milioni di chilogrammi. La crescita annuale media del mercato globale degli NFRCs (compositi rinforzati con fibre naturali) è stata del 38% tra il 2003 e il 2007, con l'Europa a detenere il tasso di

crescita annuale più elevato, pari al 48%. Le industrie basate sui materiali compositi hanno consolidato il loro successo a livello mondiale e, attualmente, gli NFRCs stanno dando un contributo efficace a questi settori. Gli studi sul ciclo di vita (Life Cycle Assessment) supportano i benefici ecologici dei materiali compositi rispetto ai componenti strutturali a base di alluminio [29].

1.4 Tessuti con architettura tridimensionale

1.4.1 Limitazioni tessuti bidimensionali

Nelle applicazioni ingegneristiche che richiedono elevate proprietà meccaniche, quali rigidezza, resistenza e durata a fatica, i compositi vengono generalmente realizzati impiegando fibre continue come elemento di rinforzo. Questi materiali presentano una tipica configurazione laminata bidimensionale (Figura 1.8), in cui le fibre risultano orientate lungo il piano del materiale, cioè nelle direzioni x e y . Una caratteristica distintiva dei laminati 2D è l'assenza di rinforzo nella direzione dello spessore (asse z), condizione che, pur semplificando in parte la progettazione, comporta anche alcune limitazioni. In particolare, la mancanza di fibre nello spessore può incidere negativamente sulla resistenza ai danni da impatto, sulle prestazioni meccaniche complessive e, più in generale, sui costi e sulla complessità dei processi di lavorazione.

Un aspetto critico è rappresentato dai processi produttivi, che risultano ancora oggi onerosi. Le tecniche convenzionali più diffuse, come la laminazione manuale (Hand lay-up) a umido o a secco, l'autoclave e lo stampaggio a trasferimento di resina, richiedono infatti un'elevata quantità di manodopera specializzata per il taglio, l'impilamento e il consolidamento dei singoli strati del laminato. Tale procedura comporta tempi di fabbricazione lunghi e costi elevati, riducendo così la competitività dei compositi rispetto ad altre soluzioni, soprattutto nei casi in cui sia richiesta una produzione su larga scala [3].

Oltre al problema dei costi, i laminati bidimensionali presentano un'ulteriore criticità legata alle ridotte proprietà meccaniche lungo la direzione dello spessore, conseguenza diretta dell'assenza di fibre orientate lungo l'asse z . L'organizzazione delle fibre esclusivamente nel piano del materiale conferisce infatti prestazioni molto limitate nello spessore, poiché la rigidità e la resistenza in tale direzione dipendono quasi unicamente dalle modeste caratteristiche della matrice polimerica e dall'interfaccia

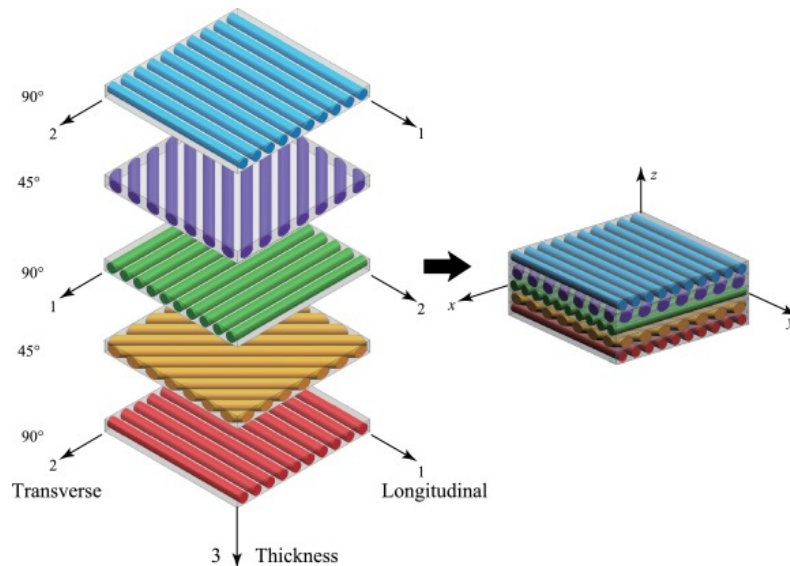


Figura 1.8: Layout 2D.

fibra-matrice. Come evidenziato in [3], il confronto tra le proprietà nel piano e quelle fuori piano mostra che queste ultime risultano spesso inferiori al 10 % delle prime. Tale limitazione rende i laminati 2D inadatti per applicazioni in cui siano richiesti elevati carichi nello spessore o significative sollecitazioni di taglio interlaminare.

Un ulteriore limite dei laminati bidimensionali riguarda la loro bassa resistenza ai danni da impatto e le ridotte proprietà meccaniche che si manifestano dopo tali eventi. A causa della scarsa robustezza nella direzione dello spessore, questi materiali tendono infatti a subire fenomeni di delaminazione quando vengono colpiti da oggetti a bassa velocità. Tale problematica è particolarmente rilevante nei settori aeronautico e navale, dove urti accidentali possono generare danni significativi alle strutture in composito. In molti casi il danno risulta di difficile individuazione, ma può compromettere in modo rilevante l'integrità strutturale della struttura.

Il danno da impatto può ridurre sensibilmente le proprietà meccaniche nel piano, con effetti negativi sulla resistenza a trazione, compressione, flessione e fatica. Come mostrato in Figura 1.9, nel caso di un laminato aeronautico in carbonio-epossidico, l'aumento dell'energia d'impatto provoca un rapido calo delle prestazioni meccaniche: anche urti di modesta entità, pari a pochi joule, possono determinare significative perdite di resistenza. Questa fragilità post-impatto costituisce uno dei principali svantaggi dei laminati 2D. Per ridurre il rischio di delaminazione si ricorre spesso a un sovradimensionamento dei componenti, aumentando lo spessore del laminato. Tuttavia, questa soluzione comporta inevitabili incrementi di peso, volume e costo, con benefici solo parziali in termini di resistenza agli urti.

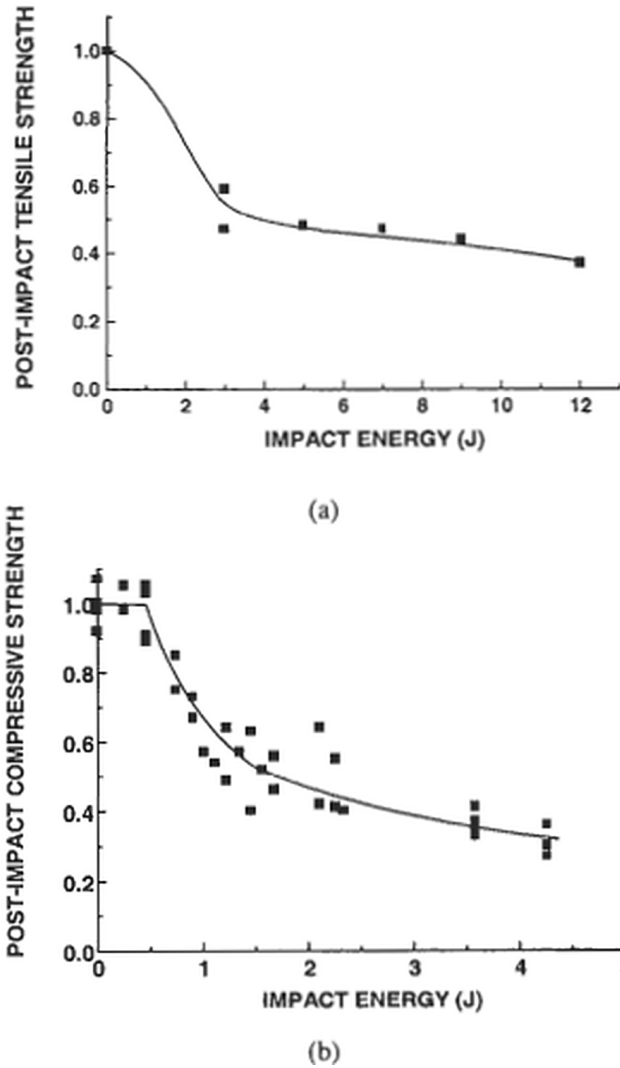


Figura 1.9: Effetto dell'energia di impatto su (a) resistenza a trazione residua e (b) resistenza a compressione residua di un laminato 2D carbonio/resina epossidica [3].

Per superare tali criticità, sono state sviluppate diverse strategie di rinforzo finalizzate a migliorare la resistenza alla delaminazione e le proprietà residue dei laminati dopo l'impatto. Tra le più diffuse si annoverano la modifica chimica o con gomma delle resine, il trattamento chimico o al plasma delle fibre e l'inserimento di film termoplastici tenacizzati tra gli strati del laminato (interleaving). Tali metodi hanno dimostrato una buona efficacia nel contrastare i danni da impatti a bassa energia, ma presentano diversi limiti che ne ostacolano l'applicazione su larga scala.

1.4.2 Tessuti tridimensionali

Negli ultimi trent'anni, per superare i problemi legati alla fabbricazione e alle proprietà meccaniche dei laminati, è stata posta grande attenzione allo sviluppo di compositi polimerici avanzati, rinforzati con fibre ad architettura tridimensionale (3D). I compositi 3D possono essere realizzati in diversi modi, impiegando tecniche differenti, che spaziano dalla ricamatura fino ai sistemi z-rods, in cui brevi barre composite vengono inserite attraverso lo spessore dei tradizionali laminati bidimensionali [31]. La soluzione più comune prevede l'uso di fibre aggiuntive che si sviluppano nella direzione perpendicolare al piano del laminato bidimensionale, chiamata fibre di rinforzo o *binder*.

La ricerca nel campo dei compositi con architettura tridimensionale ha messo alla luce alcuni vantaggi [31]:

- I compositi tessuti 3D con forme complesse possono essere meno costosi e più semplici da fabbricare.
- La tessitura 3D permette di adattare le proprietà attraverso lo spessore per una specifica applicazione.
- I compositi tessuti 3D presentano una maggiore resistenza alla delaminazione, ai danni balistici e agli urti.
- I compositi tessuti 3D possono avere valori più elevati di deformazione a rottura (tensile strain-to-failure).
- I compositi tessuti 3D possiedono una maggiore tenacità alla frattura interlaminare.

Quindi, uno dei principali vantaggi della tessitura 3D consiste nella possibilità di produrre preforme per componenti compositi con geometrie complesse già molto vicine alla forma finale desiderata (near-net-shape). Al contrario, i laminati 2D a base di materiali prepreg possono essere modellati facilmente solo in forme semplici, come pannelli piani o leggermente curvi. Questa caratteristica della tessitura 3D consente di abbattere notevolmente i costi di produzione di un componente, riducendo gli scarti di materiale, la necessità di lavorazioni meccaniche e il volume di materiale da manipolare durante il lay-up. Inoltre, si possono facilmente modificare macchinari adibiti alla produzione di compositi 2D al fine di produrre compositi 3D,

ovviamente con risultati più scarsi rispetto ad usare telai appositamente pensati per la realizzazione di strutture tridimensionali.

La tessitura tridimensionale offre il vantaggio di poter realizzare tessuti caratterizzati da una vasta gamma di architetture fibrose, regolando in maniera precisa la quantità di filati leganti che attraversano lo spessore per fornire rinforzo. Tra le configurazioni più diffuse vi sono quelle ortogonali e a interlock di strati, rappresentate in Figura 1.10. La distinzione fondamentale tra queste due tipologie risiede nel diverso percorso seguito dal filato legante attraverso lo spessore. Inoltre, la scelta e il dosaggio dei filati di ordito, trama e legante possono essere modulati al fine di adattare le proprietà del composito alle esigenze specifiche dell'applicazione. Nella maggior parte dei casi, la percentuale di filato legante rimane comunque inferiore al 5%. È infine possibile ottenere preformati ibridi combinando differenti materiali, sebbene le proprietà meccaniche di tali compositi e il loro impiego in ambito strutturale non siano ancora stati studiati in modo approfondito.

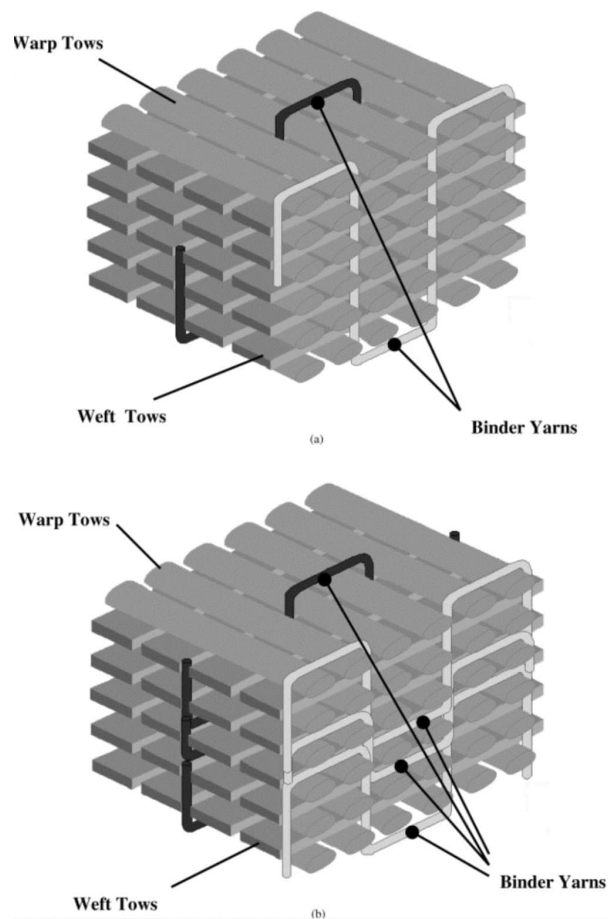


Figura 1.10: Architettura a tessitura ortogonale (a) e architettura a interlock di strati (b) [31].

Un ulteriore punto di forza dei compositi tridimensionali è rappresentato dalla loro notevole capacità di resistere ai danni causati da impatti balistici e dalla loro buona tolleranza agli urti a bassa velocità [32], [33]. Si tratta di aspetti critici che hanno invece limitato l'impiego dei laminati bidimensionali nelle strutture aeronautiche militari. Come evidenziato in [34], l'energia necessaria per avviare un danneggiamento in un composito 3D risulta fino al 60% superiore rispetto a un laminato 2D dello stesso materiale. Grazie a questa maggiore resistenza agli impatti, i compositi 3D subiscono solitamente riduzioni più contenute delle proprietà meccaniche nel piano, a differenza dei corrispondenti laminati 2D [35]. Tale comportamento è legato al ruolo dei filati leganti disposti nello spessore, i quali ostacolano o rallentano la propagazione delle delaminazioni generate dall'urto. Gli stessi filati contribuiscono inoltre ad aumentare sensibilmente la deformazione a rottura a trazione in alcuni compositi 3D [36], [31].

Nonostante queste qualità e il potenziale che ne deriva, i compositi tridimensionali non hanno ancora trovato larga diffusione commerciale. Finora il loro utilizzo è stato limitato o sperimentato solo in applicazioni specialistiche nei settori dell'edilizia, dell'aeronautica e della nautica, contesti in cui i laminati convenzionali o i metalli non garantivano prestazioni o costi adeguati [31].

Capitolo 2

Prove sperimentali

In questo capitolo vengono presentati i materiali oggetto di indagine, a cui segue una trattazione delle tecniche di fabbricazione adottate per la realizzazione dei campioni. Successivamente, si fornisce una descrizione dei macchinari impiegati per l'esecuzione delle prove sperimentali. Il tutto al fine di evidenziare in che modo tali fattori abbiano inciso in maniera determinante sui risultati sperimentali raccolti.

Lo studio sperimentale del comportamento meccanico di materiali e strutture viene comunemente affrontato attraverso il cosiddetto *building block approach*, generalmente rappresentato sotto forma di piramide, come in Figura 2.1. Tale metodologia prevede lo svolgimento di prove sperimentali a diversi livelli di complessità. Questo permette di ridurre progressivamente le incertezze e validare con crescente sicurezza i risultati ottenuti.

Il primo step di analisi è rappresentato dai provini elementari (coupons), ovvero campioni semplici e standardizzati, usati per la caratterizzazione delle proprietà del solo materiale. Queste tipologie di test sono caratterizzate da un costo contenuto e sono utili per costruire i database necessari alla modellazione numerica. Difatti, prove con geometrie più complesse porterebbero a delle proprietà che non sono intrinseche del materiale, ma influenzate dalla geometria stessa.

Il livello successivo è costituito dai componenti e sotto-componenti, ossia le parti più semplici che compongono effettivamente il prodotto finale. La loro realizzazione e prova risultano più onerose rispetto a quelle dei coupons, in quanto coinvolgono processi produttivi complessi e costi di prototipazione più elevati.

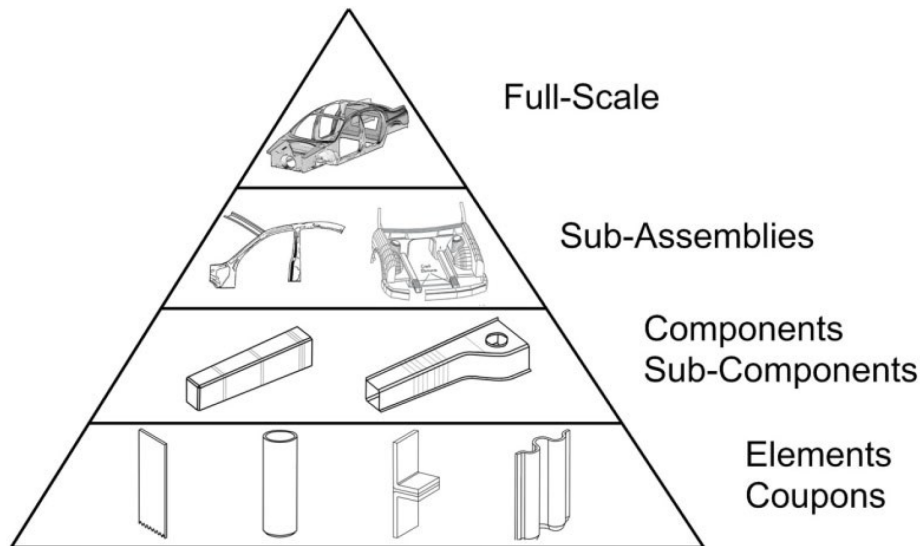


Figura 2.1: Rappresentazione schematica del *building block approach* applicato al caso della progettazione di un veicolo [17].

Salendo ulteriormente nella piramide si collocano le sotto-strutture (sub-assemblies), composte dall'unione di più componenti. I test a questo livello sono generalmente eseguiti nelle fasi finali di un progetto, e quindi molto costosi.

Infine, all'apice della piramide si trova la scala reale (full-scale), che corrisponde alla validazione finale del progetto. Le prove su prototipo completo hanno costi estremamente elevati, soprattutto quando comportano prove distruttive come i crash test.

Da questa considerazione risulta evidente l'importanza di concentrare tempo e risorse sui test di scala inferiore, dove i costi sono contenuti e dove il supporto della simulazione numerica consente di estendere le informazioni acquisite alla predizione del comportamento delle strutture complete, senza necessariamente fare dei test intermedi [17].

2.1 Preparazione dei campioni

Per la realizzazione dei provini destinati alle prove sperimentali sono stati impiegati materiali compositi a matrice polimerica con fibre continue. Il rinforzo è costituito da fibre di lino, selezionate in linea con il crescente interesse della ricerca verso materiali a ridotto impatto ambientale, sia in termini di riciclabilità a fine vita, sia in relazione alle emissioni e al consumo energetico nelle fasi di produzione. In particolare, sono state utilizzate fibre di lino di tipo FLAXDRY BL200, mentre la matrice è una resina epossidica termoindurente IN2 Epoxy Infusion Resin.

Si riportano di seguito nelle Tabelle 2.1 e 2.2 le principali proprietà meccaniche della resina e delle fibre selezionate:

Proprietà	Unità	Valore tipico
Stato non polimerizzato (resina + indurente miscelati)		
Viscosità a 20 °C	mPa·s	200–450
Densità a 20 °C	g/cm ³	1,12–1,18
Rapporto di miscelazione	peso	100:30
Pot-life	min	80–100
Demould	ore	18–24
Stato polimerizzato (cured)		
Temperatura massima	°C	73
Resistenza a compressione	MPa	80–100
Resistenza a trazione	MPa	68,5–76
Resistenza a flessione	MPa	110–120
Modulo a flessione	GPa	3,1–3,5
Allungamento a rottura	%	6,0–8,0

Tabella 2.1: Proprietà dell'IN2 Epoxy Infusion Resin [41].

Proprietà	Valore
Tipologia di tessuto	Tessuto bilanciato intrecciato (2×2)
Densità fibra	1.27 g/cm ³
Densità areale	220 g/m ²
Struttura filati	10.2 filati/cm (ordito), 10.1 filati/cm (trama)
Diametro sezione filato	270 – 400 μm
Diametro fibra singola	9 – 15 μm
Trattamenti preliminari	Nessuno

Tabella 2.2: Proprietà del tessuto di lino intrecciato (2×2) FLAXDRY BL200 [38].

2.1.1 Manifattura

La realizzazione dei provini parte dal processo di infusione sottovuoto, in particolare il *bag-moulding*, dal quale si ricavano delle lamine nel materiale composito di interesse. Si parte da 6 layer in fibra di lino in tessuto bilanciato intrecciato (2×2), che costituiranno la base di ogni laminato. La realizzazione prevede la stesura di vari strati come riportato di seguito, andando dal basso verso l'alto:

- Lastra di vetro: funge da base per la stesura dei layer.
- Cera: facilita il distacco della lastra.
- Peel ply: permette il controllo della finitura superficiale della lastra di composito e fa sì che sia presente il corretto quantitativo di resina in esso.
- 6 layer di lino.
- Peel ply.
- Mesh flow: permette alla resina di scorrere più velocemente ed uniformemente durante il processo di infusione.
- Bag: chiude l'intero sistema di layer e permette di mantenere la zona di infusione sotto pressione.

Successivamente, è stata inserita la resina tra i vari layer con l'ausilio di una pompa a vuoto. La resina è stata prima sottoposta ad un processo di *degassing* di 5 minuti, volto a rimuovere il più possibile la presenza di bolle d'aria introdotte durante la fase

di miscelazione tra resina ed indurente. Passato il tempo di demoulding la lastra in composito è stata privata del peel ply, per poi essere curata in forno per 3 ore a 100 °C.

I provini sono realizzati per caratterizzare dinamicamente il comportamento del materiale usando il banco di prova descritto nel Paragrafo successivo. Si riportano le dimensioni dei provini in Figura 2.2, esso è costituito da una prima zona di impatto caratterizzata da un trigger (Figura 2.2, dettaglio A), che è una variazione di geometria volta a far iniziare la rottura proprio nella zona inferiore. La geometria del trigger è stata scelta analizzando le precedenti prove svolte in [17], in modo tale da avere una rottura che riducesse il più possibili eventuali oscillazioni durante l'impatto ed allo stesso tempo consentisse di avere una sufficiente quantità di materiale utile impattato. Questo perché la parte effettivamente utile per la caratterizzazione del materiale è quella successiva al trigger. Di questa parte, solo una percentuale relativamente piccola viene effettivamente impattata, la complessiva lunghezza serve per garantire la corretta interfaccia tra provino e macchina di prova.

Partendo dai laminati, i provini sono stati ricavati con taglio ad acqua. Questo metodo è il più efficace per tagliare i materiali compositi in quanto non induce stress residui né termici.

Per ottenere i dati relativi al calcolo dei parametri di interesse, sono state prese le seguenti misure da ogni provino [17]:

- Due misure di lunghezza
- Due misure di larghezza
- Quattro misure di spessore
- Peso del provino

Le misure sono state prese con un calibro digitale con risoluzione 0.01 mm e una bilancia con risoluzione 0.01 g. Da questi dati è stato possibile ricavare per ogni provino l'area della sezione impattante A e la densità ρ . Il volume V è stato calcolato considerando la geometria nominale del trigger, che portava ad una riduzione di volume di 5 triangoli di base 10 mm ed altezza 5 mm. La necessità di misurare ogni provino nasce dagli studi svolti in [17], che evidenziano come le criticità dei processi di manifattura portino a tolleranze piuttosto grossolane.

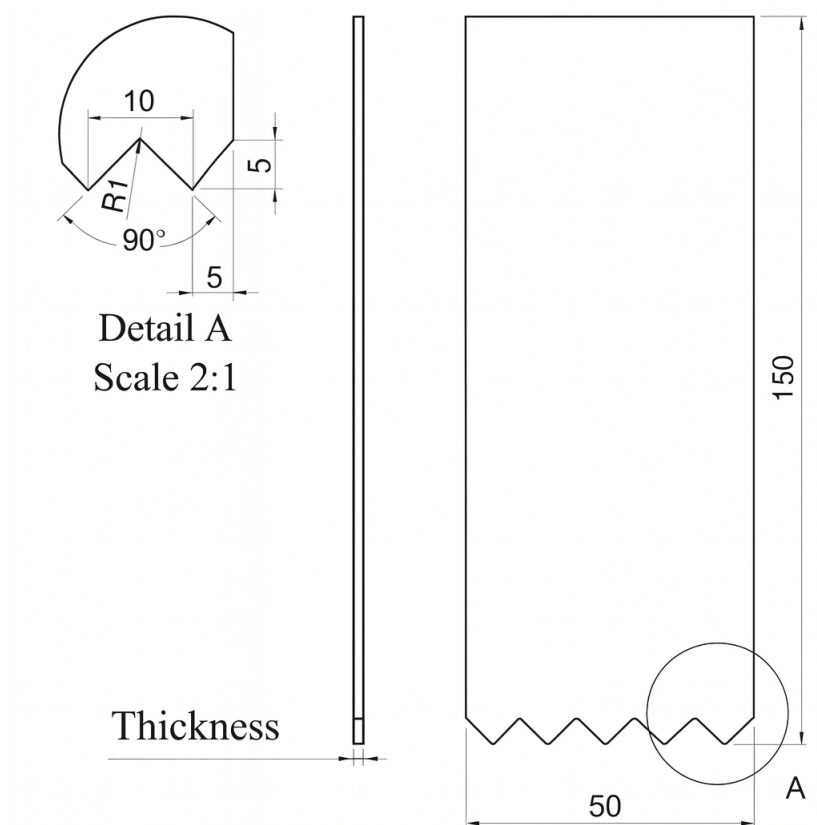


Figura 2.2: Dimensioni provino [17].

Nonostante le numerose accortezze prese al fine di ridurre il più possibile l'effetto di eventuali errori di manifattura, si riscontrano comunque difetti e piccole imperfezioni di realizzazione tra i vari provini. Questo comporta anche degli scostamenti nei risultati delle prove sperimentali, perché queste lievi differenze vengono messe in risalto in condizioni di prova dinamiche come quelle oggetto di questo studio.

2.1.2 Architettura

Per studiare l'effetto dell'architettura 3D sono stati realizzati dei campioni di varie tipologie. Il rinforzo è di tipo ortogonale ed è stato realizzato a mano con il supporto di una struttura che permettesse il corretto posizionamento delle fibre. Questa scelta di realizzazione è dovuta al fatto che macchinari in grado di realizzare strutture di questo tipo in modo automatico sono difficilmente reperibili.

Il rinforzo è stato pensato in modo tale da svilupparsi nella direzione di impatto e con una frequenza di attraversamento dei layer iniziale abbastanza larga, come rappresentato in Figura 2.3. Come si vede, il rinforzo è costituito da 5 fibre per provino, intervallate ad una distanza di 10 mm l'una dall'altra e con una frequenza

di attraversamento dei layer di 35 mm . Di seguito ci si riferirà a questo rinforzo come *rinforzo semplice* o solamente *rinforzo*.

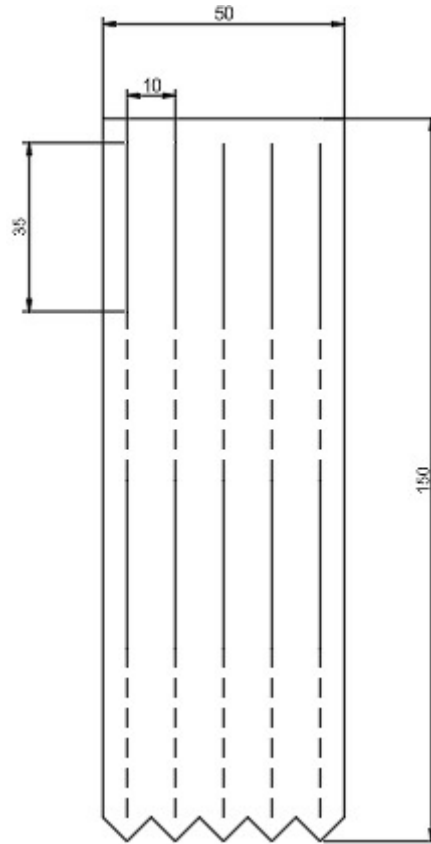


Figura 2.3: Geometria rinforzo semplice.

Successivamente ai primi test sperimentali, come si vedrà nel Capitolo 4, sono state pensate altre tipologie di rinforzo. La prima prevede che il binder passi con una frequenza doppia tra i layer rispetto al caso iniziale, quindi la fibra di rinforzo attraversa i layer una volta ogni 17.5 mm . La distanza tra le fibre di rinforzo nella direzione perpendicolare a quella di impatto è sempre di 10 mm . La seconda opzione prevede invece di usare un doppio binder, simmetrico rispetto a quello del caso iniziale, quindi con una frequenza di attraversamento dei layer di 35 mm . Queste due soluzioni sono riportate in Figura 2.4, dove nel caso (b) le due fibre di binder sono state rappresentate di colori diversi per mettere in evidenza la simmetria del rinforzo.

I materiali usati per il rinforzo sono fibre di lino AmpliTex[®] di Bcomp e fibre di carbonio TR50S 12k di Easycomposites[®], le loro proprietà sono riportate rispettivamente nelle Tabelle 2.3 e 2.4.

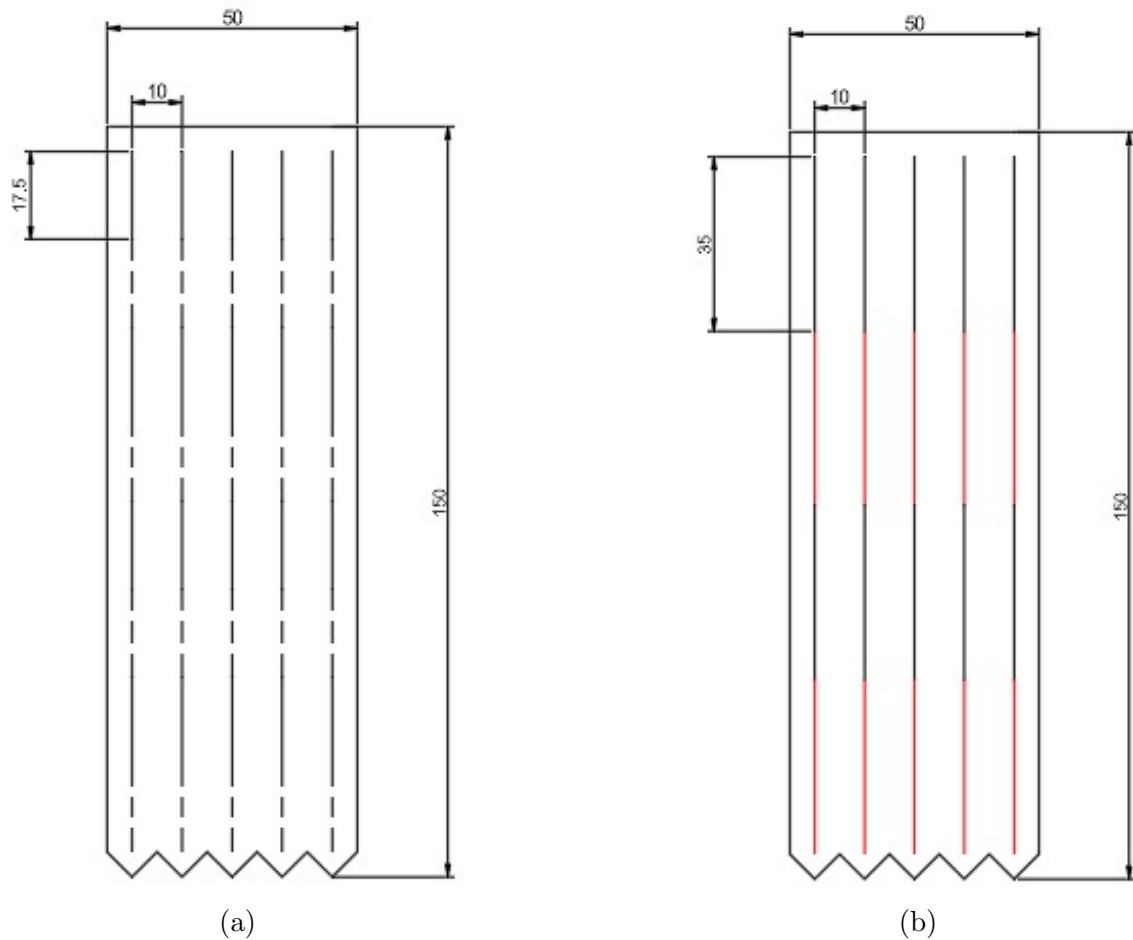


Figura 2.4: Geometria rinforzo a frequenza doppia (a) e simmetrico (b).

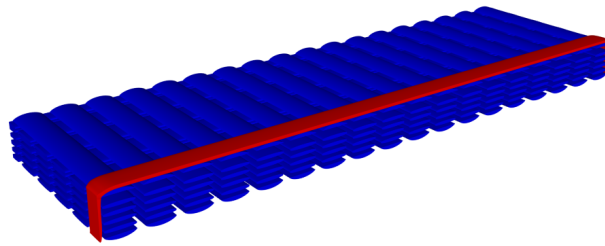
Proprietà	Valore
Tipo di fibra	Lino (EU)
Costruzione tessuto	Unidirezionale (0°)
Peso areale	$300 \text{ g/m}^2 \pm 5\%$
Tex fibra	105 TEX
Larghezza standard	350 mm
Matrice di riferimento	Epoxy Araldite LY 8615 / XB 5173
Densità fibra	1350 kg/m^3
Proprietà a secco (fibra)	
Modulo a trazione fibre	61 GPa
Modulo a trazione fibre	6.4 GPa
Resistenza a trazione fibre	580 MPa
Deformazione a rottura fibre	1 %

Tabella 2.3: Proprietà della fibra di lino Bcomp ampliTex[®] 5009 [40].

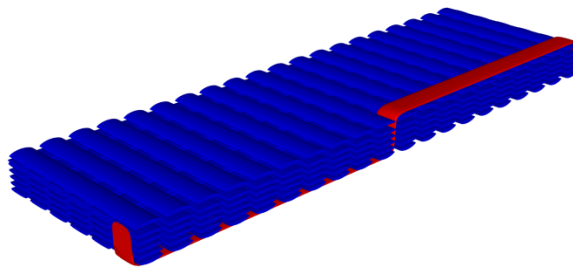
Proprietà	Valore
Tipo di fibra	Carbonio, Pyrofil TR50S
Filament count	12k
Diametro del filamento	7 μm
Modulo di trazione (Tensile Modulus)	234 GPa
Densità	1.80 g/cm ³
Resistenza a trazione (Tensile Strength)	4830 MPa
Allungamento a rottura (Elongation at Break)	2.0 %
Compatibilità resine	Epoxy, Poliestere, Vinylester

Tabella 2.4: Proprietà della fibra di carbonio 450 g 12k [39].

Per facilitare la comprensione della struttura delle fibre sono state realizzate delle rappresentazioni grafiche tramite il software *TexGen*. In Figura 2.5 si riportano il caso di rinforzo semplice e di rinforzo a frequenza doppia, il rinforzo simmetrico è come il primo, ma con una fibra di rinforzo simmetrica rispetto al piano del laminato.



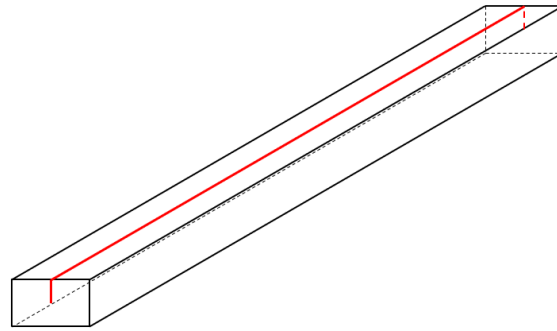
(a)



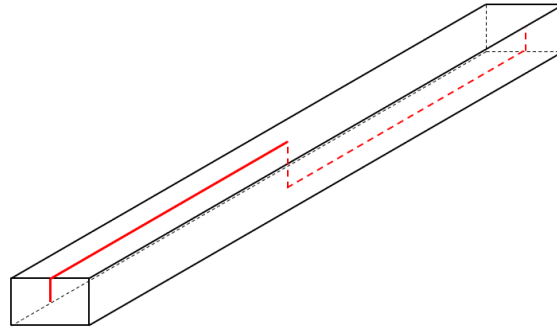
(b)

Figura 2.5: Andamento delle fibre di binder nei casi rinforzo semplice (a) e a frequenza doppia (b).

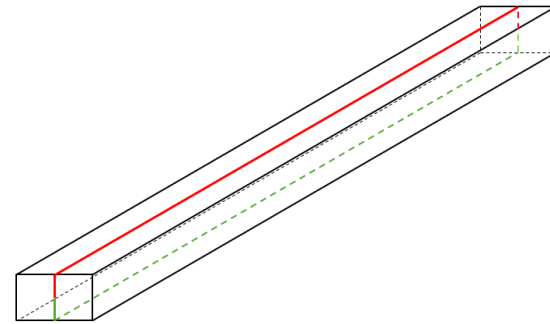
Per facilitare ulteriormente la comprensione e porre le basi per un'eventuale caratterizzazione numerica del materiale, si riporta di seguito anche una rappresentazione schematica del *Representative Volume Element* (*RVE*), cioè il volume che caratterizza in maniera completa le proprietà del composito. Un qualsiasi componente sarà dato dalla ripetizione di questo elemento, quindi il punto base per una descrizione digitale del materiale è proprio la definizione dell'*RVE*. In questo caso, ogni *RVE* è un parallelepipedo di altezza pari allo spessore del laminato (circa 3 mm), larghezza di 10 mm e profondità 35 mm .



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6: *Representative Volume Element* dei casi rinforzo semplice (a), rinforzo a frequenza doppia (b) e rinforzo simmetrico (c).

Per garantire chiarezza e uniformità nella presentazione dei risultati sperimentali, è stata definita una nomenclatura sistematica e compatta per l'identificazione dei provini. La denominazione di ciascun provino segue una struttura composta da elementi che descrivono i principali parametri distintivi del campione, quali il tipo di materiale di rinforzo, la configurazione del laminato e il numero progressivo del provino: *Rinforzo_MaterialeRinforzo_Numero*.

La simbologia usata per il tipo di rinforzo è la seguente:

- *NR*: caso senza rinforzo.
- *S*: rinforzo semplice.
- *FD*: rinforzo con frequenza doppia.
- *Simm*: rinforzo simmetrico.

La simbologia usata per il materiale di rinforzo è la seguente:

- *L*: rinforzo in lino.
- *C*: rinforzo in carbonio.
- Il caso senza rinforzo non presenterà questa voce.

Si riportano inoltre di seguito i pesi delle varie tipologie di provini:

Architettura	Peso W_c [g]
No rinforzo	25.5
Rinforzo semplice in lino	25.9
Rinforzo frequenza doppia in lino	26.1
Rinforzo simmetrico in lino	26.6
Rinforzo semplice in carbonio	25.3

Tabella 2.5: Peso dei provini nelle varie tipologie di rinforzo.

2.2 Struttura del banco di prova

Le prove di impatto sono state condotte grazie ad una macchina di prova "Instron Dartower Plus Series", di cui si riportano delle immagini in Figura 2.7.

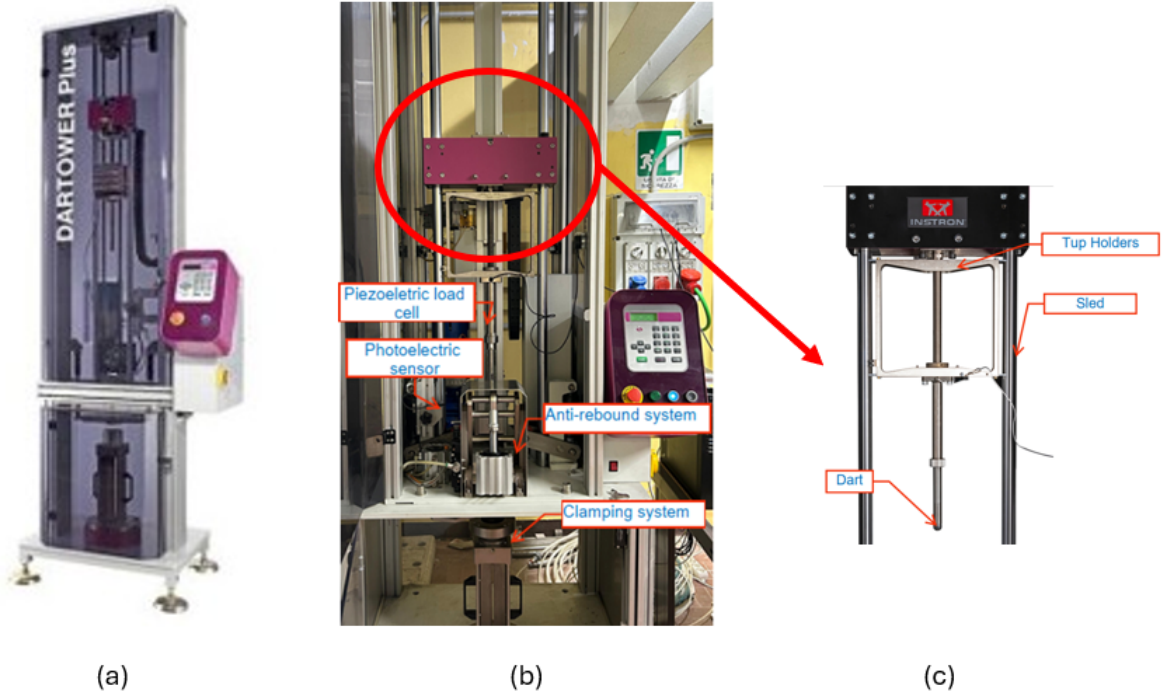


Figura 2.7: Instron Dartower Plus Series (a) e dettagli interni (b) e (c).

Con riferimento alla Figura 2.7.c, la macchina è costituita da due guide (Sled) che permettono di alloggiare il dardo (Dart, detto anche *impattatore*), sopra il quale è posizionato un supporto (Tup Holders) per poter aggiungere eventuale massa. Tra il dart e i tup holders è presente una cella di carico piezoelettrica (Piezoelectric load cell, Figura 2.7.b) che permette la rilevazione della forza di impatto con una frequenza di 1 MHz . L'unico altro strumento di misura presente nella macchina è un sensore di velocità fotoelettrico (Photoelectric Sensor), che permette di misurare la velocità di impatto. La velocità di impatto potrebbe anche essere derivata dalla Formula 2.1, che si riporta di seguito.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2.1)$$

Si sceglie però di non usarla perché essa non tiene in considerazione la presenza di attrito tra le guide e la struttura del dardo e l'attrito di quest'ultimo con l'aria.

Considerare ciò richiederebbe un modello matematico troppo complesso e soggetto a forte variabilità, quindi la cosa più semplice è posizionare un sensore di velocità nella zona che corrisponde all'inizio dell'impatto.

Il parametro principale che si fornisce alla macchina è l'energia di impatto, che può essere variata in due modi. Il primo è variando l'altezza di caduta del dardo, il secondo è variando la massa aggiuntiva che viene posizionata. Dalla Formula 2.1 si osserva come variando la massa e mantenendo l'altezza costante si aumenta l'energia fornita a pari velocità di impatto, mentre variando l'altezza di partenza del dardo si varia anche la velocità iniziale. Qualora fosse necessaria un'altezza superiore a quella delle slitte, la macchina è dotata di un sistema di molle nella parte superiore in cui la restante parte di salto verticale è fornita sotto forma di energia elastica.

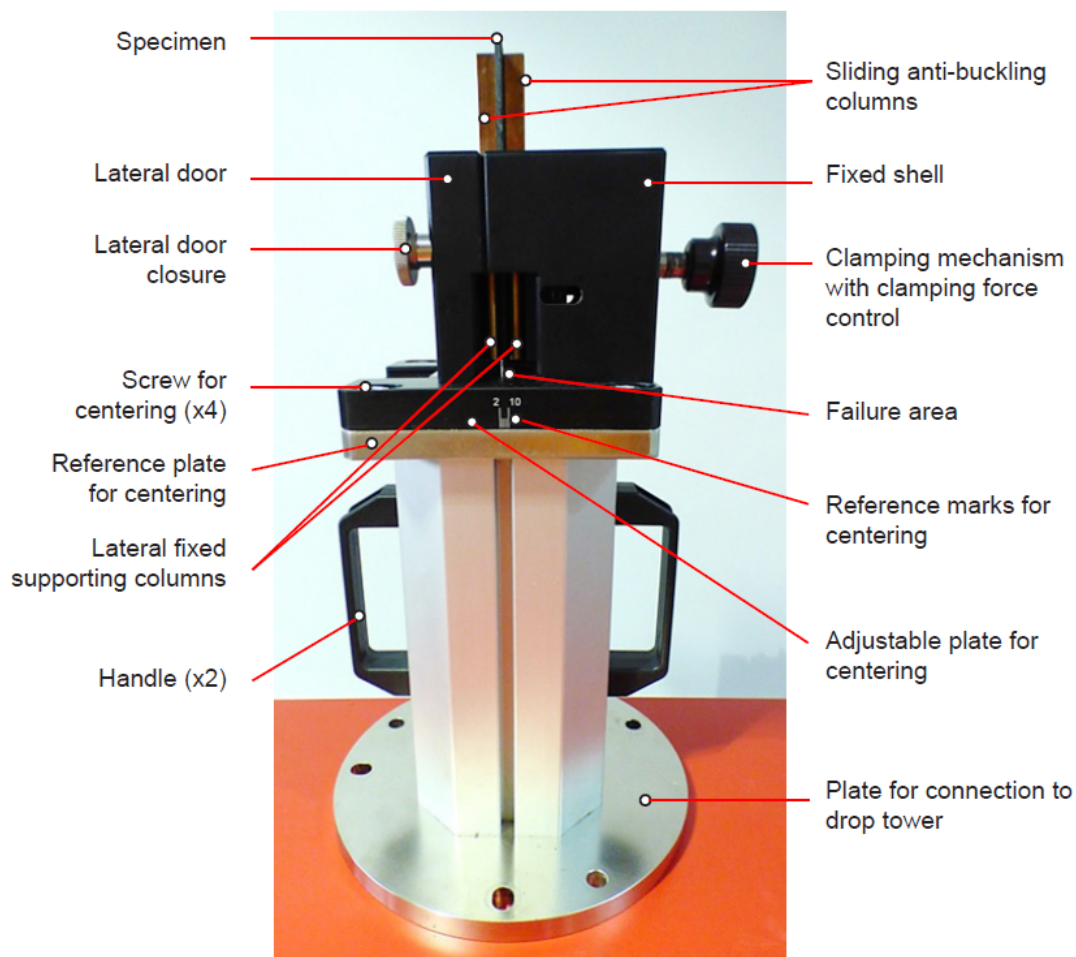


Figura 2.8: Sistema di serraggio del provino.

Alla base della macchina è presente il sistema per alloggiare il provino (Clamping system), di cui se ne riporta un'immagine in Figura 2.8. Esso è costituito da una struttura a guscio con una porta sul lato sinistro, che permette di inserire e rimuovere

con facilità i provini. Tale porta funge anche come una delle due piastre di serraggio. La piastra destra è dotata di un sistema che permette il serraggio del provino con una forza limitata ad 1 kN , al fine di evitare eccessive forze di attrito.

Il provino è disposto tra sei colonne in bronzo, tre per ogni lato. Quelle laterali sono più corte per evitare interferenze con l'impattatore, mentre quelle centrali sono costituite da una parte fissa inferiore ed una scorrevole superiore. L'impattatore è piano con un diametro minimo di 60 mm per garantire la copertura completa della parte superiore del provino. La configurazione usata permette di caratterizzare il comportamento a splaying del materiale. Se ne riporta una rappresentazione in Figura 2.9, dove è possibile osservare come tutte le colonne in bronzo siano ad una distanza di 7.5 mm dal piano di impatto e quindi permettano la fuoriuscita del materiale da entrambi i lati per l'intera larghezza del provino.

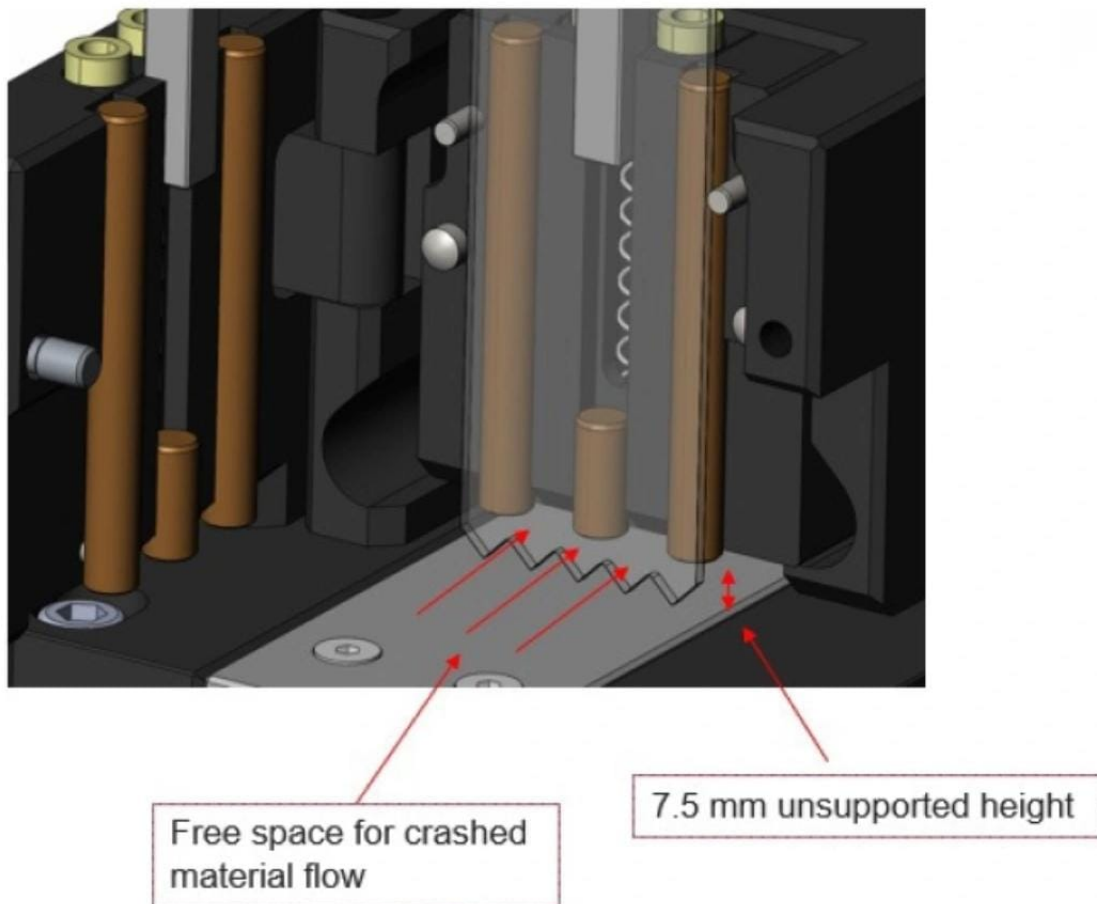


Figura 2.9: Sistema di serraggio del provino, struttura interna [37].

Una volta posizionato il provino si chiude lo sportello sinistro, si applica il carico di serraggio e, scelti i parametri di energia e velocità di impatto, si procede con la prova. L'impattatore colpisce il provino nella parte superiore, le colonne svolgono un ruolo fondamentale per evitare che la rottura del provino avvenga nella parte superiore. Qualsiasi rottura in una zona diversa da quella inferiore, infatti, comporta l'invalidità della prova, in quanto significherebbe che il provino si è rotto con dei modi di rottura differenti da quello che si vuole studiare.

Per la raccolta delle immagini degli impatti è stata usata una videocamera ad alta frequenza *FASTCAM Nova S12* con una frequenza di acquisizione di 12800 *fps* ed una risoluzione di 1024×1024 pixel.

Capitolo 3

Analisi delle prove sperimentali: Metodologia

In questo capitolo ci si propone di descrivere le metodologie e gli strumenti usati per elaborare i dati sperimentali ottenuti in precedenza, che faranno da base per ricavare informazioni utili sul comportamento dinamico dei materiali compositi in esame.

3.1 Calcolo dei parametri

Per quantificare le proprietà del materiale con i parametri selezionati nel Capitolo 1, il primo step è quello di calcolare l'energia assorbita durante l'impatto, che è definita come:

$$E = \int F(z)dz \quad (3.1)$$

Come accennato in precedenza, i dati misurati sperimentalmente dalla macchina di prova sono solo la curva forza-tempo (Figura 3.1) e la Velocità iniziale di impatto.

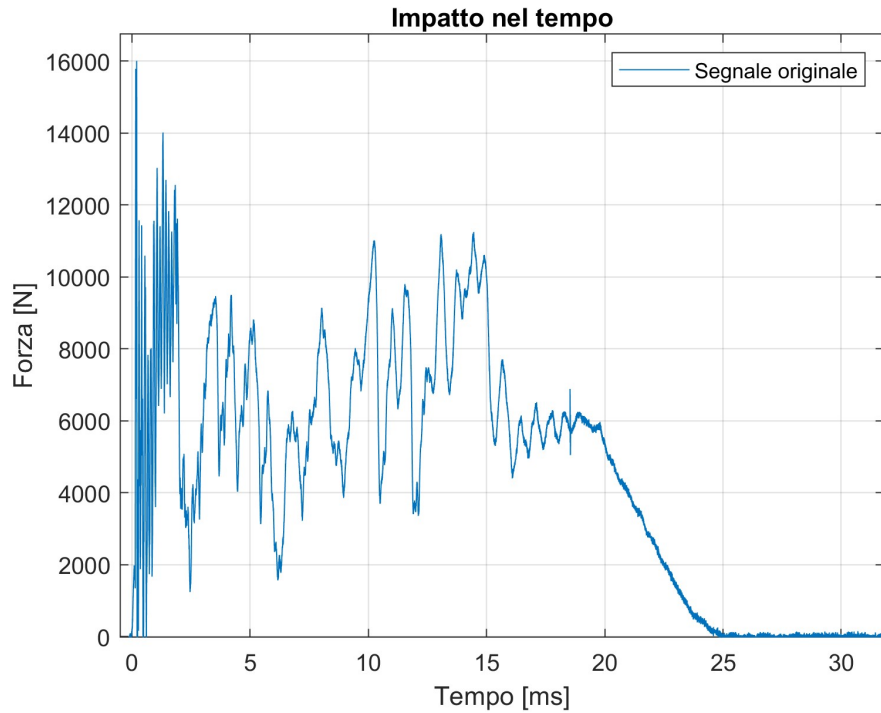


Figura 3.1: Curva Forza - Tempo.

Da questo segnale di partenza si scrive il bilancio dinamico dell'impattatore, considerando come verso positivo il basso, e si risolve ricavando l'accelerazione:

$$a(t) = g - \frac{F(t)}{m} \quad (3.2)$$

Si procede poi integrando l'accelerazione ed imponendo come condizione iniziale la velocità misurata dal sensore v_0 :

$$v(t) = \int a(t)dt + v_0 \quad (3.3)$$

Si integra nuovamente per ottenere lo spostamento, considerando come condizione iniziale $z_0 = 0$:

$$z(t) = \int v(t)dt + z_0 \quad (3.4)$$

Ottenuto lo spostamento si può quindi usare la 3.1 per ricavare l'energia E .

3.1.1 Calcolo del SEA

Si riporta di seguito la definizione di *Specific Energy Absorption*:

$$SEA = \frac{E}{\rho A \delta} = \frac{\int_0^\delta F d\delta}{\rho A \delta} = \frac{F_{\text{mean}}}{\rho A} \quad (3.5)$$

Come si osserva dalla 3.5, in questo caso l'energia non è definita come l'integrale rispetto a tutto lo spostamento z , ma rispetto ad un valore δ , che è un intervallo scelto al fine di cogliere le proprietà del solo materiale e non di altri fattori esterni. Entrando nello specifico, per come è stato realizzato il provino, esso presenta un trigger di profondità pari a 5 mm . Questo significa che le informazioni utili sul materiale sono presenti dopo questi primi 5 mm , perchè prima l'energia assorbita è data da un insieme di proprietà del materiale e della geometria. Allo stesso modo, si ha un limite sullo spostamento finale; questo perché dopo 40 mm il supporto del provino è progettato per portare all'arresto la corsa dell'impattatore. Quindi, al fine di essere sicuri di acquisire correttamente le informazioni sulle sole proprietà del materiale, il range di interesse è stato cautelativamente preso come: $[6.5 - 35]\text{ mm}$.

Problemi di rumore del segnale non permettono di identificare in maniera automatica i punti esatti in cui l'impatto inizia e finisce. Per rendere automatico questo calcolo si è implementato un *Variable Displacement Algorithm* (VDA), sulla base di quello descritto in [17].

Si riportano di seguito i passaggi principali eseguiti dal codice, con riferimento alla Figura 3.2:

1. Si filtra la curva con un filtro *bandstop* da 1 kHz a 40 kHz , al fine di nascondere le frequenze della cella di carico dell'impattatore. Si effettua poi uno *smoothing* di 700 punti per avere un segnale più regolare, cosa adatta ad una frequenza di campionamento di 1 MHz .
2. Si identifica il picco della forza e la sua posizione sulla curva.
3. Si identifica il punto iniziale della curva come il primo punto in cui la forza arriva a 0 N partendo dal picco e spostandosi verso spostamenti negativi.
4. Si identifica il punto finale della curva come il primo punto in cui la forza arriva a 0 N partendo dal picco e spostandosi verso spostamenti positivi.

5. Si definisce la *force limit* come il 50 % del valore di forza nel punto medio della curva.
6. Si identifica il punto di calcolo del SEA come il punto in cui la *force limit* viene raggiunta più un margine di 1.5 mm.
7. Si identifica il punto finale della curva come il punto in cui la forza scende sotto la *force limit*.
8. Se il punto 7 dà un punto finale oltre i 35 mm, esso viene settato in automatico a questo valore.

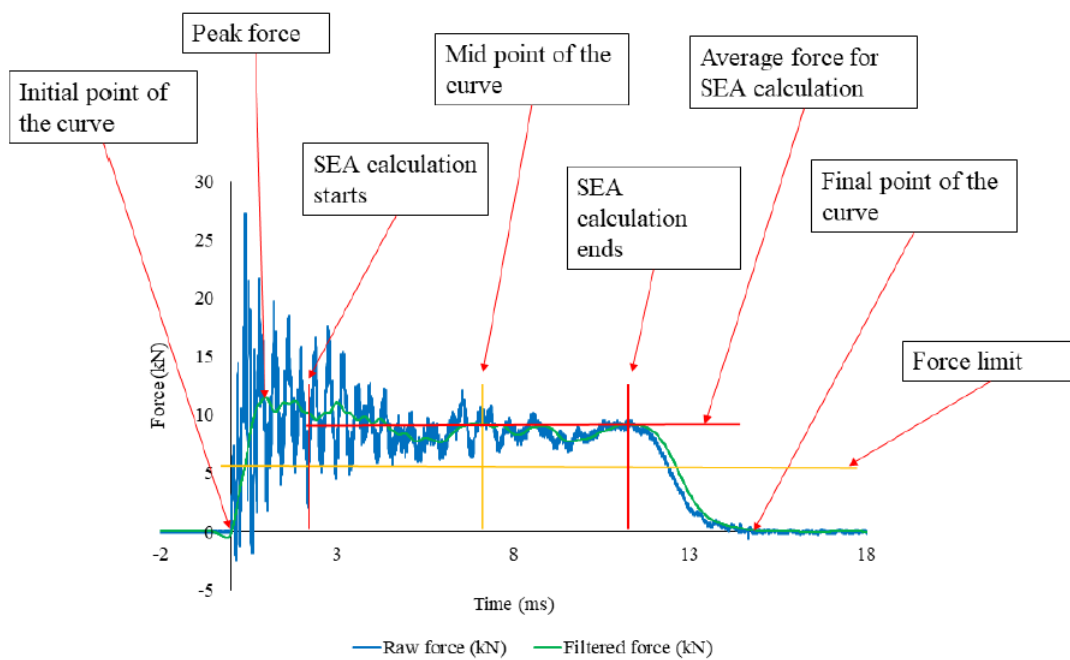


Figura 3.2: Punti critici usati dal *Variable Displacement Algorithm* [17].

Calcolando il SEA con la curva filtrata si ottiene una variazione tra lo 0.2 % e lo 0.5 % rispetto al caso non filtrato. Tuttavia, per evitare eventuali influenze del filtro, esso è stato usato solo per identificare in modo automatico il range di interesse, l'integrazione è stata poi fatta sul segnale originale.

3.1.2 Calcolo CFE ed SCS

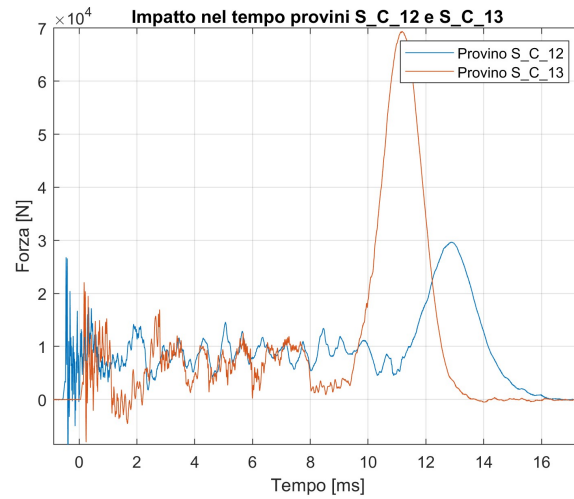
Per il calcolo del CFE e del SCS è necessario ricavare la forza massima durante l'impatto F_{max} e la forza media F_{mean} . Entrambi questi valori sono stati calcolati sul segnale originale in quanto la presenza del filtro comportava distorsioni eccessive.

La forza massima è stata ricavata con il comando MATLAB *max*. Per quanto riguarda la forza media, essa è stata calcolata a seguito di osservazioni analoghe a quelle fatte per la scelta dell'intervallo di interesse del SEA. Infatti, il valore medio è inteso come valore medio della parte utile di materiale impattato, escludendo la parte iniziale influenzata dal trigger e la parte finale influenzata dal fondo corsa della macchina.

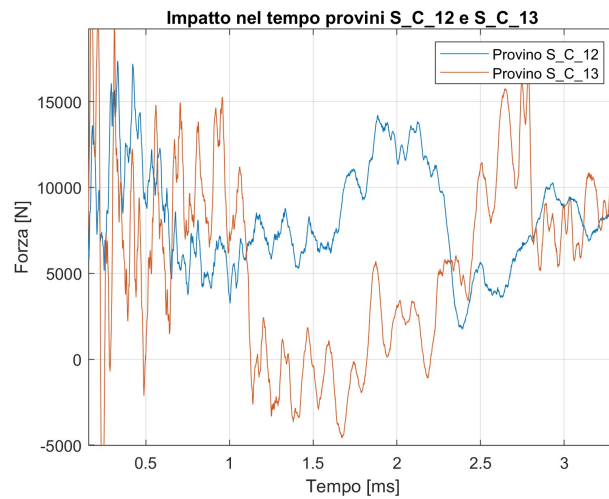
3.2 Analisi delle curve Forza-Tempo

Procedendo con una prima analisi dei dati raccolti è stata osservata un'elevata deviazione standard. La causa è stata identificata nel fatto che anche in un ambiente ben definito come quello di prova potevano presentarsi dei modi di rottura differenti da quelli imposti, che portavano a zone in cui l'assorbimento di energia variava notevolmente rispetto al resto della curva. Si riporta di seguito un esempio, analizzato nella curva forza-tempo, dato che tempo e spostamento sono proporzionali e che dunque un crollo in questa curva implica un crollo nella curva forza-spostamento, quindi un crollo di energia. L'esempio è riferito a due provini testati nelle stesse condizioni di prova, cioè splaying a 6 m/s , denominati come S_C_12 e S_C_13.

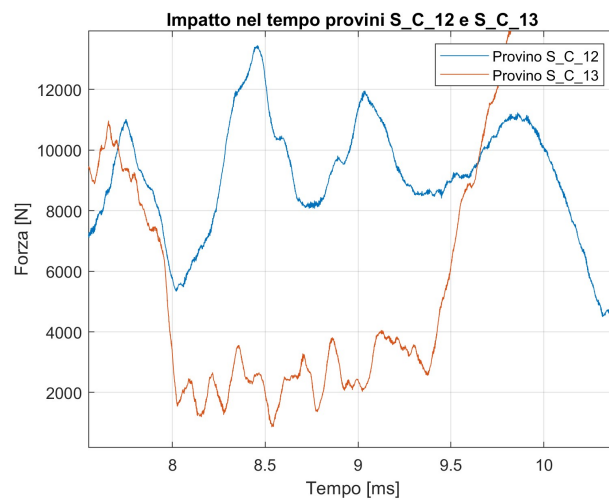
Come si osserva in Figura 3.3, sono presenti nella curva del Provino S_C_13 due crolli di forza posizionati a 2 ms e 8 ms . Essi comportano una diminuzione sostanziale dell'energia assorbita dal materiale e quindi del SEA (Figura 3.3 b) e c)).



(a) Andamento completo curva $F - t$.



(b) Dettaglio a 2 ms



(c) Dettaglio ad 8 ms

Figura 3.3: Dettagli curva $F - t$ provini S_C_12 e S_C_13.

Per cercare di capire le cause di questi crolli sono state analizzate le immagini acquisite con una telecamera ad alta frequenza di campionamento (1 MHz). Da queste analisi è venuto alla luce come alcuni provini presentassero modi di rottura differenti durante la prova. Con riferimento al Provino S_C_13, si vede come esso presenti proprio nei due momenti del crollo di forza un evidente passaggio dal modo di rottura a splaying ad una instabilità locale, che porta alla flessione di parte del materiale. Essendo quindi il modo di rottura diverso, la quantità di materiale danneggiato sarà diversa e quindi anche l'energia assorbita.

Come si vede in Figura 3.4, il Provino S_C_12 si rompe in modo continuativo a splaying, frammentando in maniera molto fine il materiale e quindi assorbendo un notevole quantitativo di energia. Di contro, il provino S_C_13 si rompe con un comportamento iniziale di splaying, per poi passare in alcuni istanti ad una rottura per buckling. Si vede infatti come ci sia tra i detriti un pezzo di materiale non frammentato, che quindi ha assorbito poca energia (Figura 3.5).

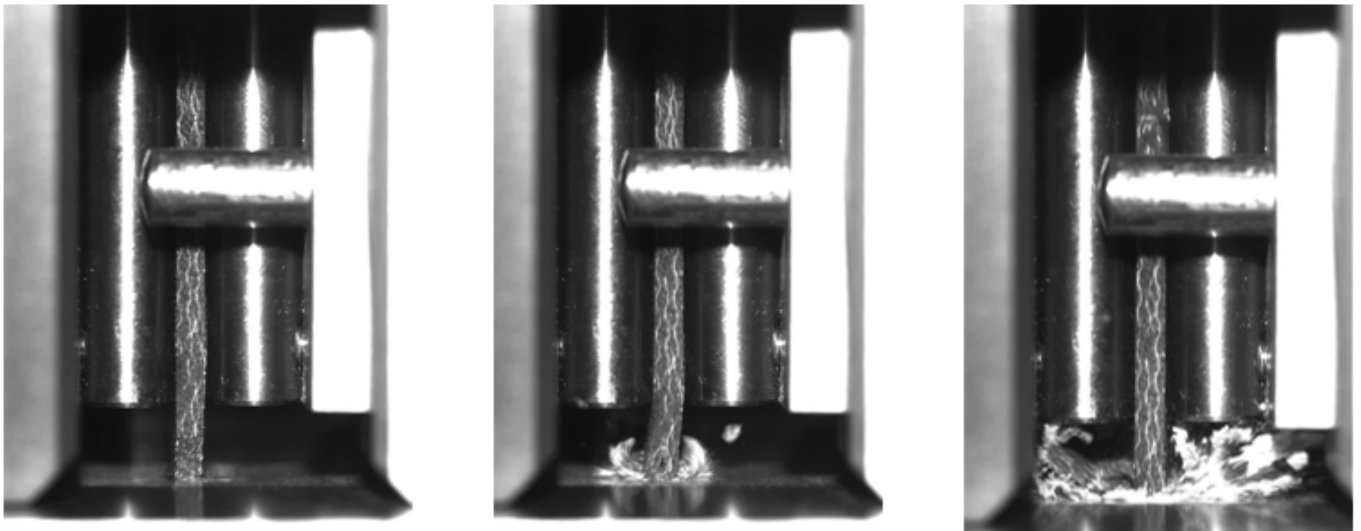


Figura 3.4: Istanti della rottura del Provino S_C_12.

Per risolvere tale problematica si è pensato di agire nel seguente modo:

- Trascurare le prove che presentano modi di rottura troppo differenti in modo continuativo.
- Trascurare le parti di prova che presentano modi di rottura differenti in quei casi in cui ci sia comunque un significativo tratto in cui la rottura avviene per splaying.

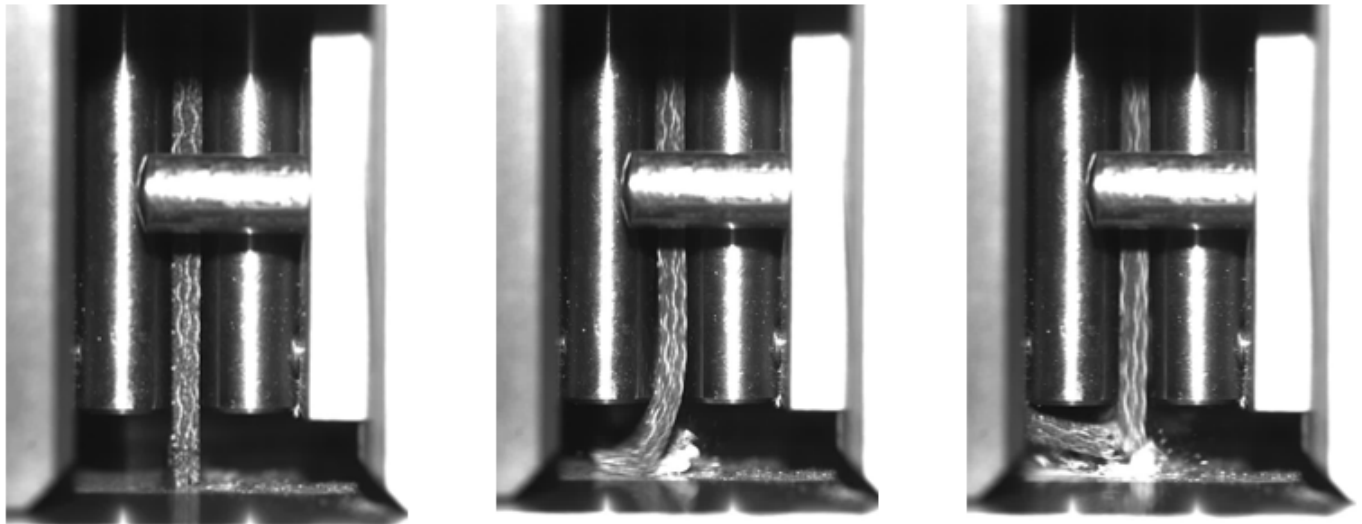


Figura 3.5: Istanti di rottura del Provino S-C-13, in particolare rottura intorno ai 2 ms .

Usando questi accorgimenti si osservava una riduzione della deviazione standard intorno al 20%. Vista l'efficacia di questa osservazione, tutte le prove successive sono state analizzate con il metodo precedentemente descritto.

In ogni caso è bene osservare che in prove dinamiche come quelle analizzate in questa sede i risultati sono fortemente influenzati da fattori aleatori, come ad esempio piccole imprecisioni nella manifattura o leggere differenze nelle condizioni di prova. Nonostante le accortezze considerate, i valori di deviazione standard sono ampi se confrontati con quelli di prove statiche, ma rientrano nei limiti di accettabilità confrontando questi risultati con altre prove dinamiche presenti in letteratura.

3.2.1 Ripetibilità delle prove

Sfruttando il metodo di analisi definito nel Paragrafo 3.2, si ottengono buoni valori di deviazione standard, considerando che quelle in esame sono prove dinamiche. Tali valori, infatti, sono in linea con altri risultati presenti in letteratura [17], [43], [44]. Questo fa sì che il numero di prove per avere un campione valido possa essere ridotto. Tale aspetto è fondamentale anche in ottica del fatto che il banco di prova presenta delle criticità relative alla riuscita dei test, che saranno discusse nel Paragrafo 5.1.2. In particolare, il numero di prove non valide è stato elevato, si riporta il numero di prove effettuate e valide in Tabella 3.1.

Architettura	Velocità [m/s]	Replicazioni effettuate	Replicazioni valide
No rinforzo	3.5	2	2
	4	5	3
	6	3	3
Rinforzo in lino semplice	4	4	2
	6	2	0
Rinforzo in lino frequenza doppia	4	2	2
	6	2	2
	8	2	1
Rinforzo in lino simmetrico	4	3	1
	6	2	0
Rinforzo in carbonio semplice	4	7	4
Rinforzo in carbonio frequenza doppia	4	5	0
Rinforzo in carbonio simmetrico	4	3	0

Tabella 3.1: Numero di replicazioni effettuate e valide per ciascuna architettura e velocità di prova.

Come si osserva, la percentuale di riuscita dei test è molto bassa, intorno al 45 %. Di contro, la ripetibilità delle prove è buona, con deviazioni standard accettabili. Per tale motivo, si è pensato di considerare validi anche i risultati di architetture che avevano poche prove riuscite.

3.3 Analisi delle curve Forza-Spostamento

Ottenuto lo spostamento con i passaggi elencati nel Paragrafo 3.1, è possibile osservare l'andamento della forza e dell'energia proprio rispetto a questa variabile. Lo scopo di questa analisi è quindi osservare come l'andamento della forza influenzi l'assorbimento di energia del materiale. Per fare ciò, si è scelto di usare un grafico che sovrapponga l'andamento della forza e dell'energia nello spostamento. Si riporta in Figura 3.6 l'andamento di tali curve nel caso di un provino senza rinforzo, per studiarne le caratteristiche.

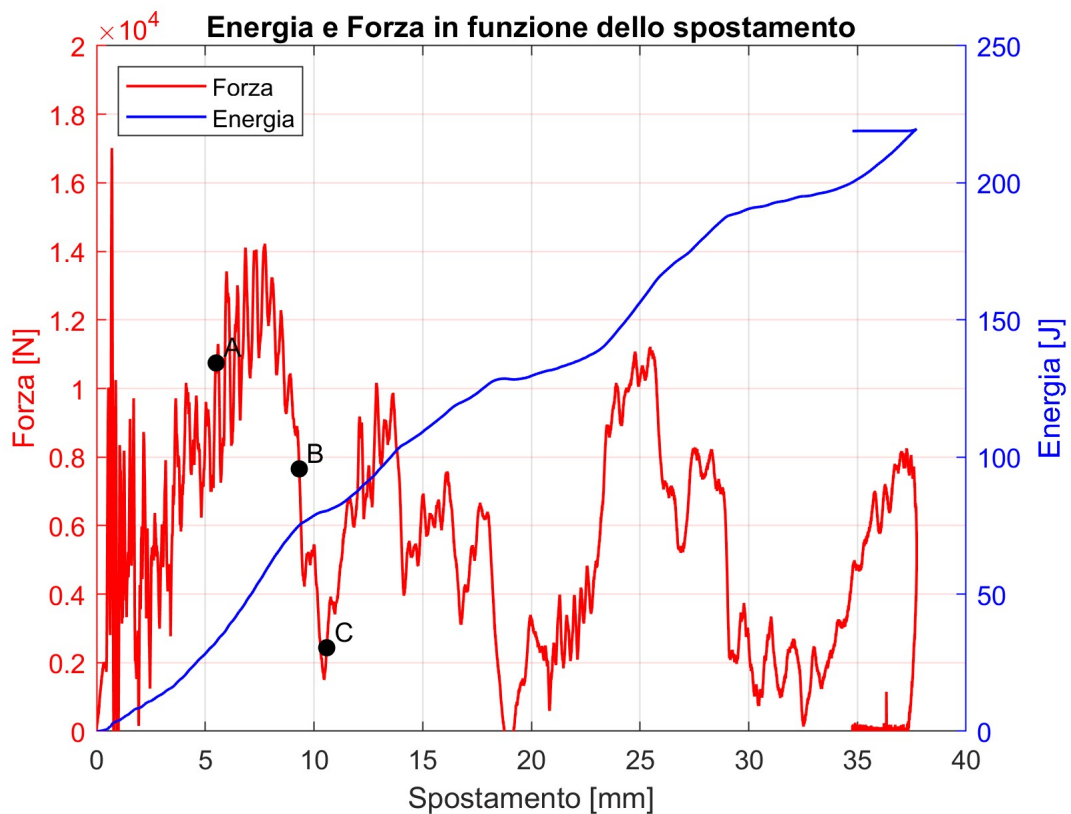


Figura 3.6: Grafici Forza-Spostamento ed Energia-Spostamento di un provino con architettura bidimensionale NR₁₇.

Come si osserva, la curva forza-spostamento è caratterizzata da un primo tratto in cui la crescita è circa lineare se si trascura il rumore. A seguito di questo tratto, si hanno delle oscillazioni con frequenze differenti, in parte dovute al rumore, in parte dovute a piccole differenze locali nel provino, che portano ad oscillazioni con frequenza più bassa ed ampiezza più alta. Queste oscillazioni sono dovute anche al fatto che a livello microscopico non è possibile identificare un unico modo di rottura, ma essi si presentano contemporaneamente. Quindi, i punti in cui la forza crolla

possono essere dovuti al fatto che in quel tratto è preponderante un modo di rottura a minor assorbimento di energia, come visto anche nel Paragrafo 3.2.

Per quanto riguarda l'energia, data la relazione 3.1, si ha che nel tratto di crescita circa lineare della forza, essa avrà un andamento parabolico. Essa è legata in generale alla forza, a meno di una costante, secondo la relazione:

$$E^{i+1}(z) = F^i(z) \quad (3.6)$$

Dove i è l'ordine della derivata rispetto allo spostamento. Si osserva quindi come nel momento in cui la derivata prima della forza cambia di segno, lo stesso farà la derivata seconda dell'energia. Questo cambio di segno comporta una diminuzione della derivata prima dell'energia, che graficamente risulta in una diminuzione della pendenza della retta tangente. In altre parole, quando $F'(s) < 0$, l'energia continua a crescere, ma con pendenza decrescente. Come ci si aspetta anche dal punto di vista fisico, siccome la forza è sempre positiva, l'energia assorbita durante la prova non smette mai di crescere, ma aumenta o diminuisce la sua velocità di crescita.

Ad esempio, con riferimento alla Figura 3.6, si osserva bene come intorno ai 9 mm la curva della forza presenti un flesso. Per quanto spiegato in precedenza, il flesso nella curva forza-spostamento si traduce nella curva dell'energia in una diminuzione della pendenza della retta tangente.

Il legame tra la forma della curva energia-spostamento e la risposta meccanica del materiale può essere meglio compreso introducendo il concetto di rigidità tangente k_t per un sistema elastico non lineare:

$$k_t(z) = \frac{dF}{dz} = \frac{d^2E}{dz^2} \quad (3.7)$$

Alla luce di questa espressione, un aumento della pendenza della curva dell'energia (ovvero $E''(s) > 0$) corrisponde a un incremento della rigidità tangente, che fisicamente si traduce in una fase di irrigidimento. Viceversa, quando $E''(s) < 0$, la rigidità tangente assume valori negativi e il materiale manifesta un comportamento di indebolimento (softening), in cui l'accumulo di energia procede con un ritmo decrescente. È opportuno sottolineare che, nel caso di prove d'impatto con danneg-

giamento e rottura del provino, la rigidità tangente k_t non deve essere interpretata come una proprietà intrinseca del materiale, bensì come un parametro sperimentale che descrive la pendenza locale della curva forza–spostamento. In altre parole, $k_t(s)$ rappresenta la risposta globale del provino nel punto considerato, influenzata non solo dalle proprietà costitutive del materiale, ma anche dai meccanismi di danno, dalla formazione di cricche e dalle oscillazioni dinamiche dovute all’impatto. Pertanto, la curvatura della curva energia–spostamento fornisce indicazioni utili sulle fasi di irrigidimento e di indebolimento del sistema provino–prova, senza tuttavia poter essere assunta come misura diretta della rigidità del materiale intatto. Inoltre, dato che questo parametro è ricavato da una derivazione della forza, che è il dato raccolto sperimentalmente, è molto sensibile al rumore dovuto alle vibrazioni indotte dalla prova. Quindi, esso può essere usato solo se opportunamente filtrato. Tuttavia, usando un filtro simile a quello usato per il SEA si ottengono valori troppo influenzati dalla presenza del filtro stesso, che non permettono di fare osservazioni di tipo quantitativo sul materiale. Per tale motivo, questo parametro può essere considerato solo per un’analisi di tipo qualitativo.

3.3.1 Confronto fra le varie architetture

Si vuole ora studiare l’effetto del rinforzo sulle curve energia-spostamento e forza-spostamento. Siccome forza ed energia sono legate secondo le relazioni descritte in precedenza, si effettua un’analisi delle curve forza-spostamento, le cui osservazioni portano a delle conseguenze nel grafico energia-spostamento già descritte. Per fare ciò si è partiti da un’analisi qualitativa delle curve, svolta in parallelo con l’analisi dei video ad alta risoluzione raccolti durante le prove.

Dal confronto fra le varie curve, la prima cosa che si osserva è che tutte presentano un primo crollo della forza tra i 5 mm e i 7 mm . Si ipotizza che tale crollo sia dovuto al passaggio da trigger a sezione completa, che può portare ad instabilità locali e quindi ad una minore frammentazione del materiale in quella zona. Nei punti successivi, si ha un andamento oscillante che non può essere ricondotto alla posizione in cui il binder attraversa i layer di fibre, ma più che altro a come la cricca avanza durante la rottura.

Partendo dal caso senza rinforzo, si osserva come la cricca propaghi al centro del provino, delaminandolo per alcuni mm . Si forma quindi una struttura a «V rovesciata», che eventualmente cederà frammentando il materiale all’apice della «V». Per meglio comprendere tale fenomeno sono stati riportati dei frame acquisiti du-

rante la prova in Figura 3.7. Questo comportamento si traduce in oscillazioni nel grafico forza-spostamento, con conseguente diminuzione dell'assorbimento di energia in quel tratto rispetto al precedente (Figura 3.6).

Per ogni curva si riportano tre punti A, B e C. Il punto A è un punto in cui la rottura avviene con una buona frammentazione del materiale. Il punto B è un punto in cui la cricca genera la sezione a "V", con conseguente crollo della forza. Infine, il punto C è un punto in cui è ricominciata la frammentazione del materiale.

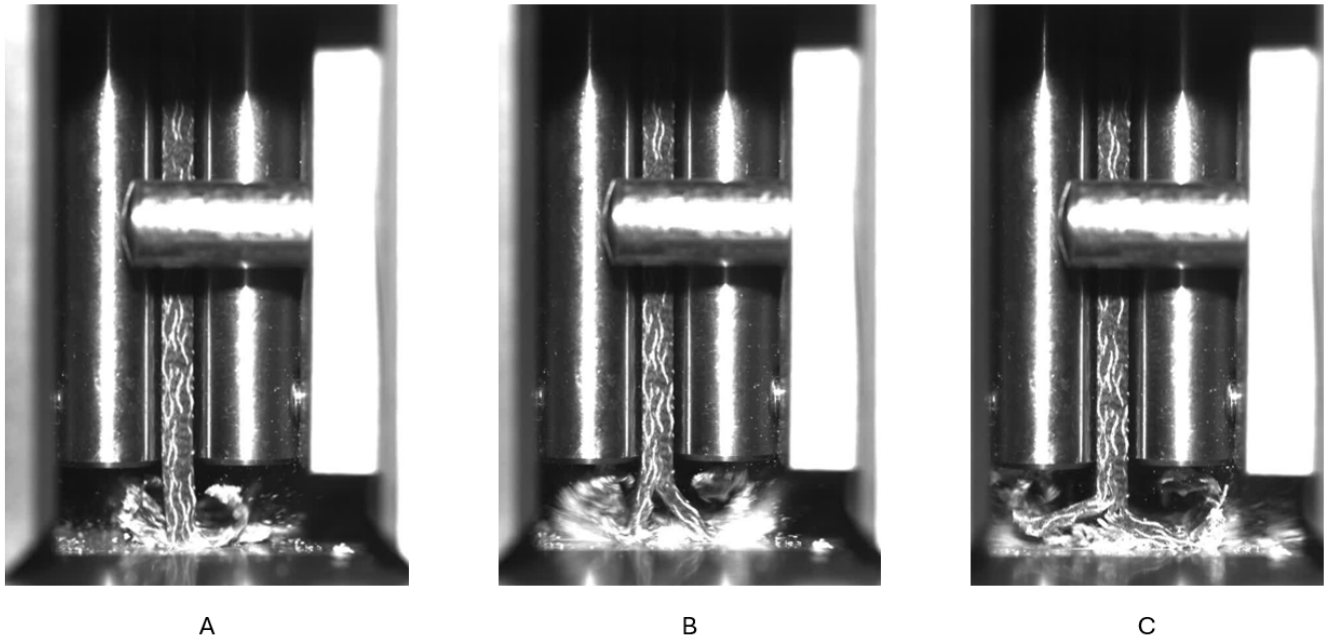


Figura 3.7: Rottura tipica di un provino senza rinforzo a splaying NR_17.

Dal punto di vista dell'assorbimento di energia, la formazione di una cricca lunga alcuni *mm* è fenomeno negativo, in quanto comporta la non frammentazione di una parte del materiale. É quindi preferibile avere un materiale con delle cricche che si sviluppino meno possibile lungo il provino. Questo si traduce in un grafico forza-spostamento con delle diminuzioni di forza meno marcate e quindi un assorbimento di energia più costante.

Si riportano in Figura 3.8 la rottura di un provino con rinforzo semplice (a) e rinforzo a frequenza doppia (b). In entrambi i casi si osserva come la frammentazione del materiale sia più accentuata rispetto al caso senza rinforzo, cosa che comporta una minore oscillazione della forza, quindi una crescita più lineare e rapida dell'energia assorbita da parte del materiale.

Ciò può essere osservato anche in Figura 3.9, che evidenzia anche come la crescita

dell'energia sia più simile ad un tratto lineare rispetto al caso senza rinforzo, proprio per via delle minori oscillazioni della forza. Questo pone quindi il materiale con rinforzo 3D in una migliore condizione di assorbimento di energia rispetto al caso senza rinforzo. A queste osservazioni fenomenologiche e quantitative segue un'analisi di tipo quantitativo sulla base di alcuni parametri matematici.

Per effettuare un primo confronto di tipo quantitativo è stato misurato il coefficiente di determinazione R^2 nel tratto lineare della curva dell'energia, definito come:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} \quad (3.8)$$

$$SS_{\text{res}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.9)$$

$$SS_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.10)$$

Dove:

- R^2 : Coefficiente di determinazione [-]
- SS_{res} : Somma dei quadrati dei residui [-]
- SS_{tot} : Somma totale dei quadrati [-]
- y_i : Valore osservato del campione i [-]
- $\hat{y}_i$: Valore stimato (predetto) dal modello per il campione i [-]
- $\bar{y}$: Media dei valori osservati [-]
- n : Numero di osservazioni [-]

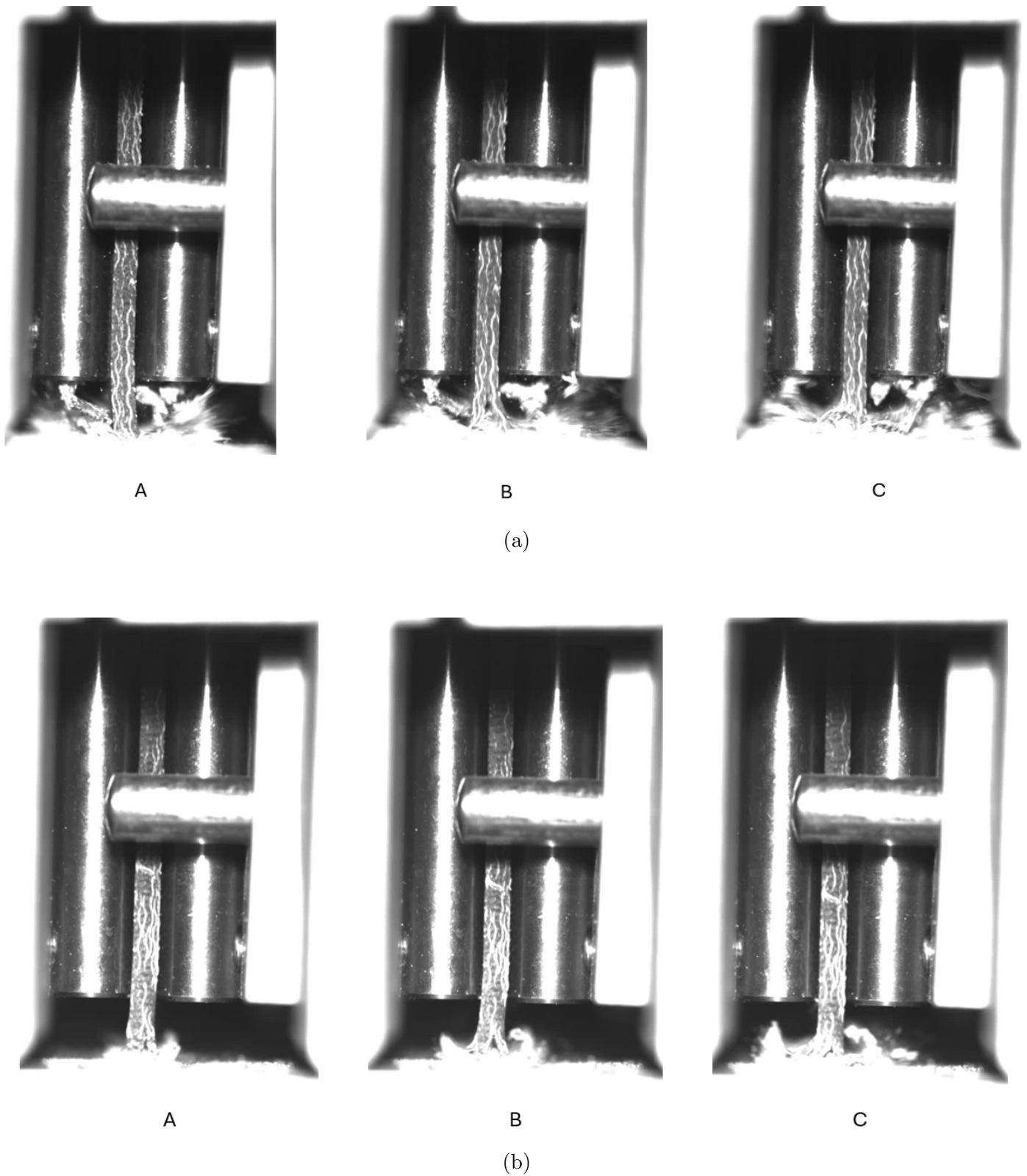


Figura 3.8: Rottura tipica di un provino con rinforzo semplice S.L.46 (a) e con rinforzo a frequenza doppia F.D.L.49 (b).

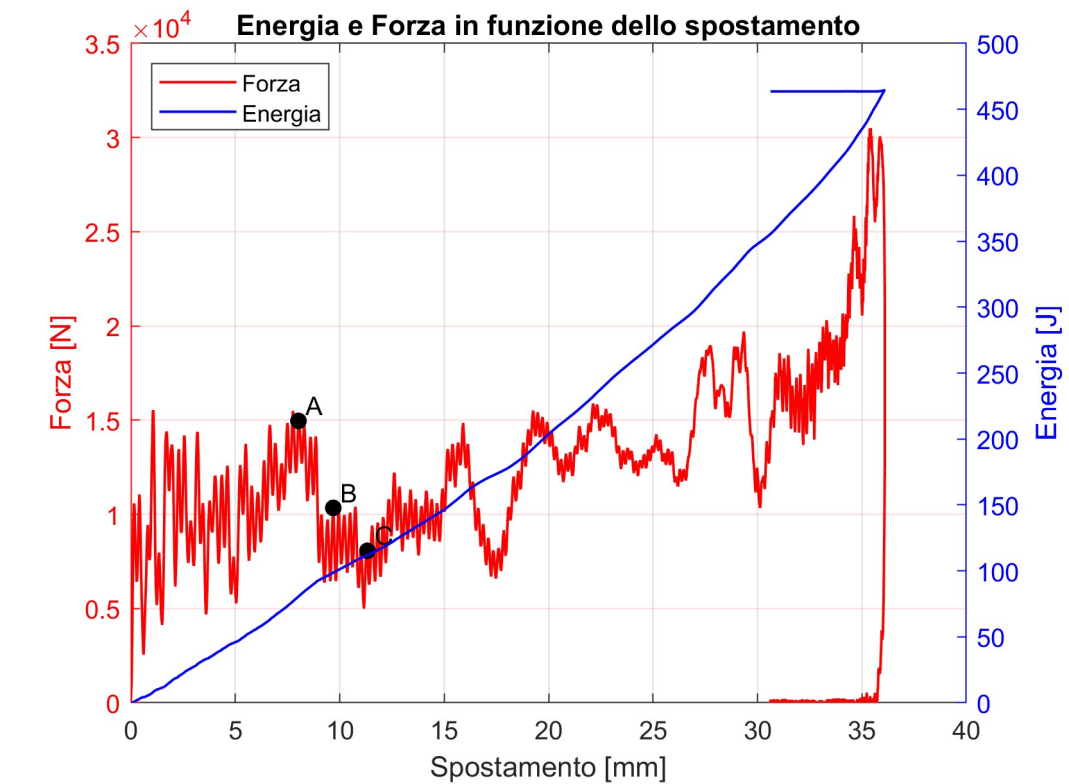
Si riportano i risultati nella tabella seguente:

Architettura	R^2 [-]	Deviazione standard
No rinforzo	0.988	0.007
Rinforzo in lino	0.992	0.005
Rinforzo in lino a frequenza doppia	0.990	0.008
Rinforzo in lino simmetrico	0.992	-
Rinforzo in carbonio	0.996	0.002

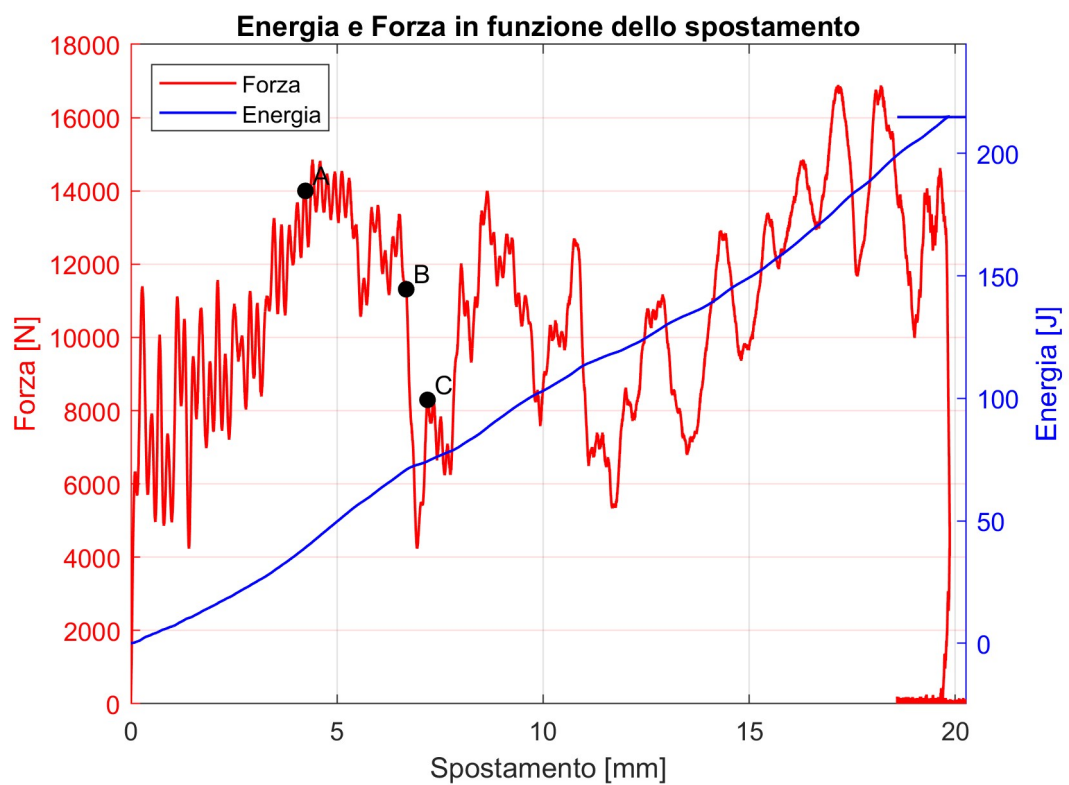
Tabella 3.2: Risultati R^2 per diverse architetture.

Come si può osservare, i rinforzi portano ad un miglioramento della linearità nell'assorbimento di energia, anche se molto contenuto. Il miglioramento più marcato si ha nel caso di rinforzo in carbonio, mentre il rinforzo in lino presenta un miglioramento più modesto, ma comunque positivo. Un comportamento più lineare nell'assorbimento dell'energia è da preferire poiché indice di minori oscillazioni della forza. Minori oscillazioni si traducono in picchi più ridotti, aspetto vantaggioso in termini di sicurezza. Infatti, valori massimi di forza elevati corrispondono a decelerazioni più brusche, potenzialmente nocive per il corpo umano.

Per meglio comprendere le differenze durante l'impatto, si riporta in Figura 3.10 la sovrapposizione delle curve forza spostamento del caso senza rinforzo con le varie architetture testate.

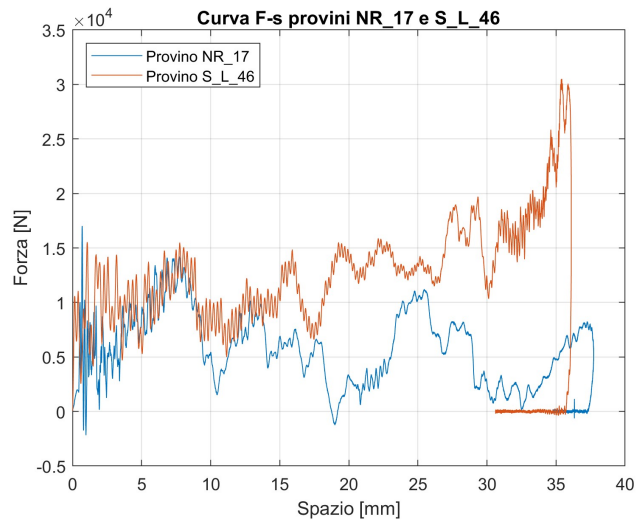


(a)

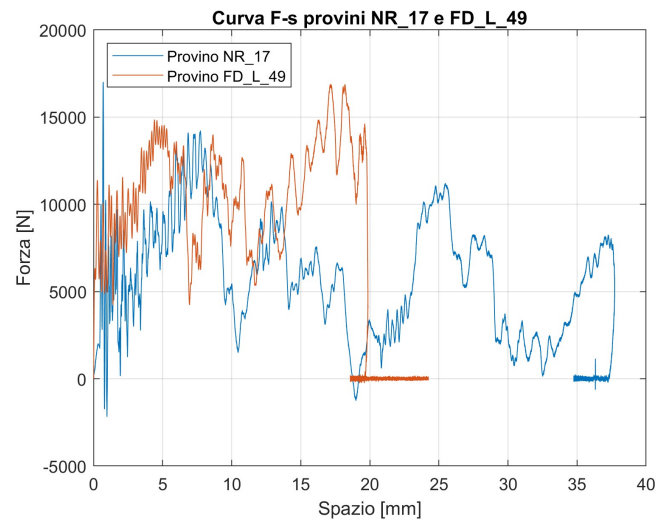


(b)

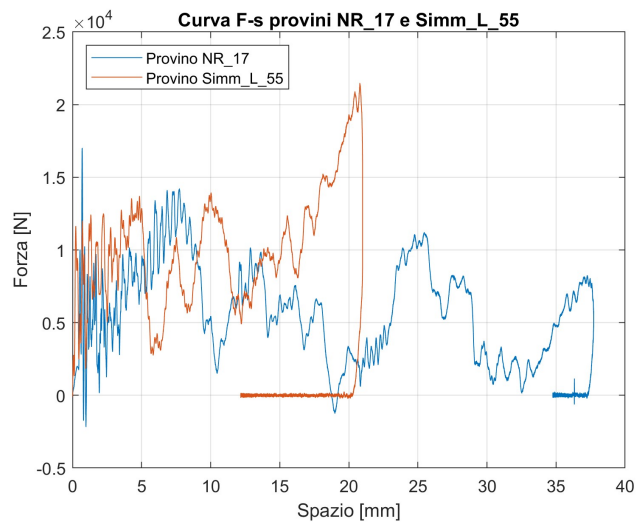
Figura 3.9: Curve Forza-Spostamento ed Energia-Spostamento di un provino con rinforzo semplice S.L.46 (a) e rinforzo a frequenza doppia FD.L.49 (b).



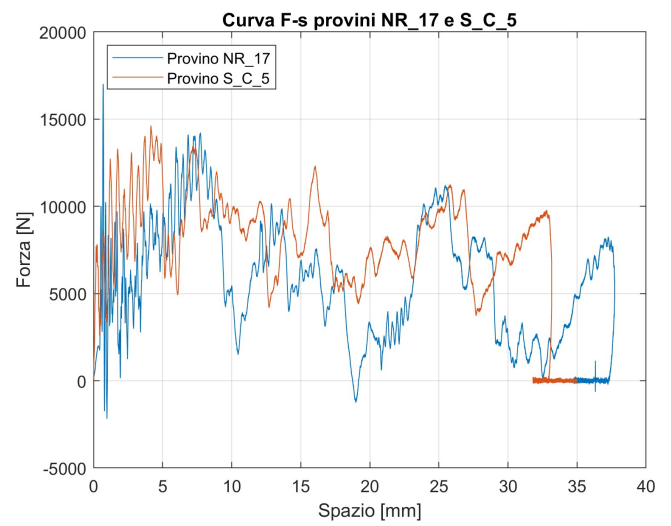
(a) NR.17 e S.L.47



(b) NR.17 e FD.L.49



(c) NR.17 e Simm.L.55



(d) NR.17 e S.C.5

Figura 3.10: Curve F - s sovrapposte.

Capitolo 4

Analisi delle prove sperimentali: Risultati

4.1 Confronto fra energia assorbita e SEA

Una prima analisi sulle proprietà del materiale può essere svolta analizzando l'energia assorbita dai provini, sfruttando il procedimento descritto nel Paragrafo 3.1. Ripetendo tale procedimento per ogni provino testato sono stati ottenuti i valori riportati in Tabella 4.1. Essi si riferiscono al caso di tutte le geometrie analizzate durante l'attività sperimentale, confrontate a pari velocità di impatto, cioè a 4 m/s .

Architettura	Energia assorbita [J]	Deviazione standard
No rinforzo	162.1	5.5
Rinforzo semplice in lino	164.7	21.5
Rinforzo a frequenza doppia in lino	134.9	4.9
Rinforzo simmetrico in lino	135.1	-
Rinforzo semplice in carbonio	210.2	3.3

Tabella 4.1: Risultati energia assorbita per diverse architetture.

Questi valori non permettono di ottenere informazioni sul comportamento del materiale, ma solo sul comportamento del singolo provino. Difatti, questi risultati sono caratteristici della singola prova e ciò lo si può osservare anche dal fatto che la deviazione standard nel caso "Rinforzo semplice in lino" sia piuttosto elevata. Questa

variazione così alta è dovuta al fatto che l'energia assorbita in valore assoluto dipende dalle condizioni di prova. Provini differenti avranno parti di materiale impattato diverse, cosa che necessariamente porterà a valori di energia assorbita differenti. Al fine di avere un'analisi efficace e sensata, il parametro scelto è il SEA, che normalizza l'energia assorbita proprio rispetto alla quantità in massa di materiale impattato, secondo la formula 3.5. Come si vedrà nei paragrafi successivi, l'uso del SEA permette di ottenere dei dati utili per la descrizione del materiale a prescindere dalle caratteristiche del singolo provino. In seguito, verranno definiti ulteriori parametri pensati per mettere in evidenza particolari aspetti dei materiali oggetto di studio.

4.2 Effetto dell'architettura tridimensionale

Si descrive ora l'effetto dell'architettura tridimensionale nei vari casi analizzati, partendo dal confronto con il caso di struttura bidimensionale. Il confronto è stato svolto a pari velocità di impatto, cioè a 4 m/s . Il rinforzo di partenza è quello descritto in Figura 2.3. Si riportano in Tabella 4.2 i valori ottenuti, in Figura 4.1 è possibile osservare gli stessi risultati sotto forma di grafico ad istogrammi, mentre in Figura 4.2 è possibile osservare il differente andamento della forza durante l'impatto.

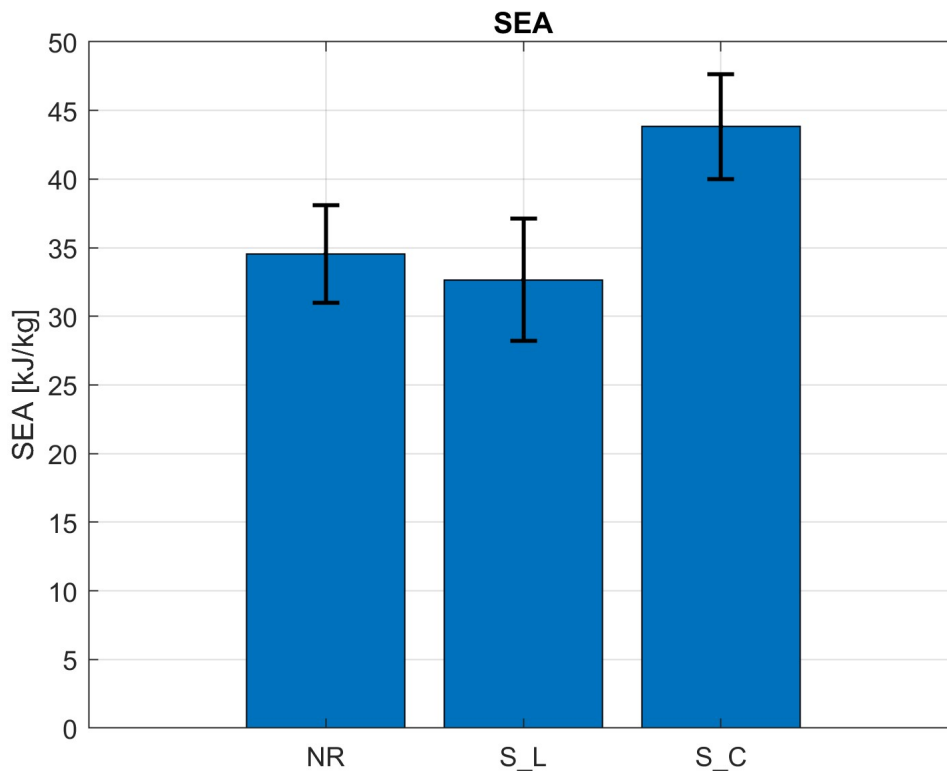
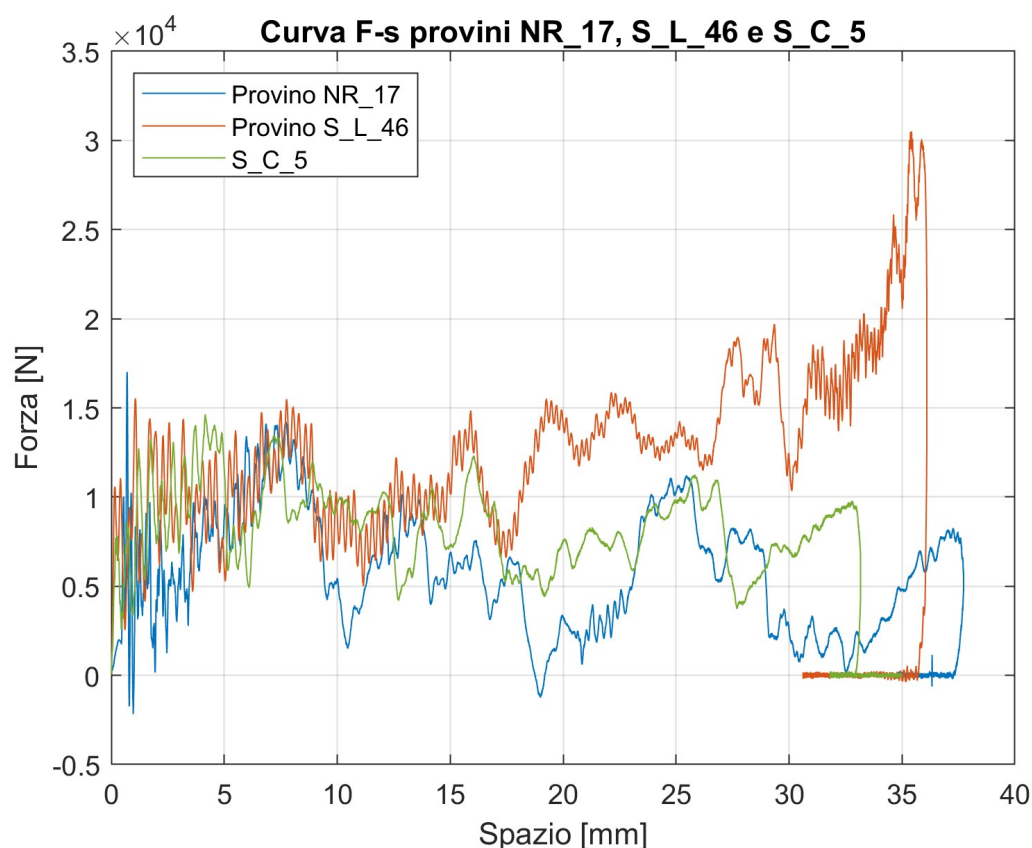


Figura 4.1: Risultati SEA per diverse architetture.

Architettura	SEA [kJ/kg]	Deviazione standard
No rinforzo	34.5	4.1
Rinforzo semplice in lino	32.7	4.4
Rinforzo semplice in carbonio	43.8	3.8

Tabella 4.2: Risultati SEA per diverse architetture.

Figura 4.2: Curve F - s dei provini NR.17, S.L.46 e S.C.5.

Come si può osservare, mentre il rinforzo in carbonio comporta un aumento di SEA di circa il 30 %, il rinforzo in lino non sembra portare a variazioni nelle proprietà di assorbimento di energia. Tuttavia, se si osserva la tabella 4.1, risulta evidente come l'energia assorbita in valore assoluto sia maggiore nel caso con rinforzo. È proprio in queste condizioni che il SEA permette di effettuare un confronto più indicativo delle proprietà del materiale. Analizzando la semplice energia assorbita si potrebbe concludere che il rinforzo studiato comporta un effettivo miglioramento, anche se lieve, delle proprietà. In realtà, dall'analisi della sola energia si può concludere solo che i provini con il rinforzo in lino hanno assorbito più energia di quelli senza

rinforzo. Le informazioni che otteniamo sono quindi relative al provino e non al materiale. Passando al SEA, invece, risulta evidente come la presenza del rinforzo non porti effettivi vantaggi. Questo perché il rinforzo ha portato sì un aumento di energia in termini di valore assoluto, ma ha anche aumentato la densità del materiale, fattore preponderante tra i due, che quindi ha portato ad una diminuzione del SEA. L'aumento di densità unito alle differenti quantità di materiale impattato, hanno fatto spostare il risultato qualitativo dell'analisi. Bisogna quindi considerare che questa prima analisi è fatta per mettere in risalto la differenza fra energia e SEA, che danno due risultati qualitativamente differenti. Osservando i pesi riportati nella Tabella 4.13, risulta evidente come la variazione di peso sia piccola tra i vari casi, ma unita alla differente quantità di materiale impattato comporta una variazione significativa nel risultato. Questo perché non è propriamente il peso del provino ad influire, ma la sua densità e quanto materiale si è rotto nella direzione di impatto. Nel complesso, quindi, la presenza del rinforzo per come è stato realizzato in questa fase dello studio non comporta un vantaggio in termini di energia per unità di massa nel caso del lino.

Questi risultati sono però significativi rispetto al tipo di fibra. Difatti, cambiare la quantità e la tipologia di fibra significa cambiare il composito di partenza, quindi le sue proprietà. Da questa prima campagna sperimentale risulta quindi evidente che anche poche fibre di carbonio comportano un significativo incremento dell'assorbimento di energia, viste le loro migliori proprietà meccaniche.

Osservazioni analoghe possono essere effettuate anche per i parametri CFE ed SCS sulla base dei risultati riportati di seguito nelle Figure 4.3 e 4.4 e nelle Tabelle 4.3 e 4.4.

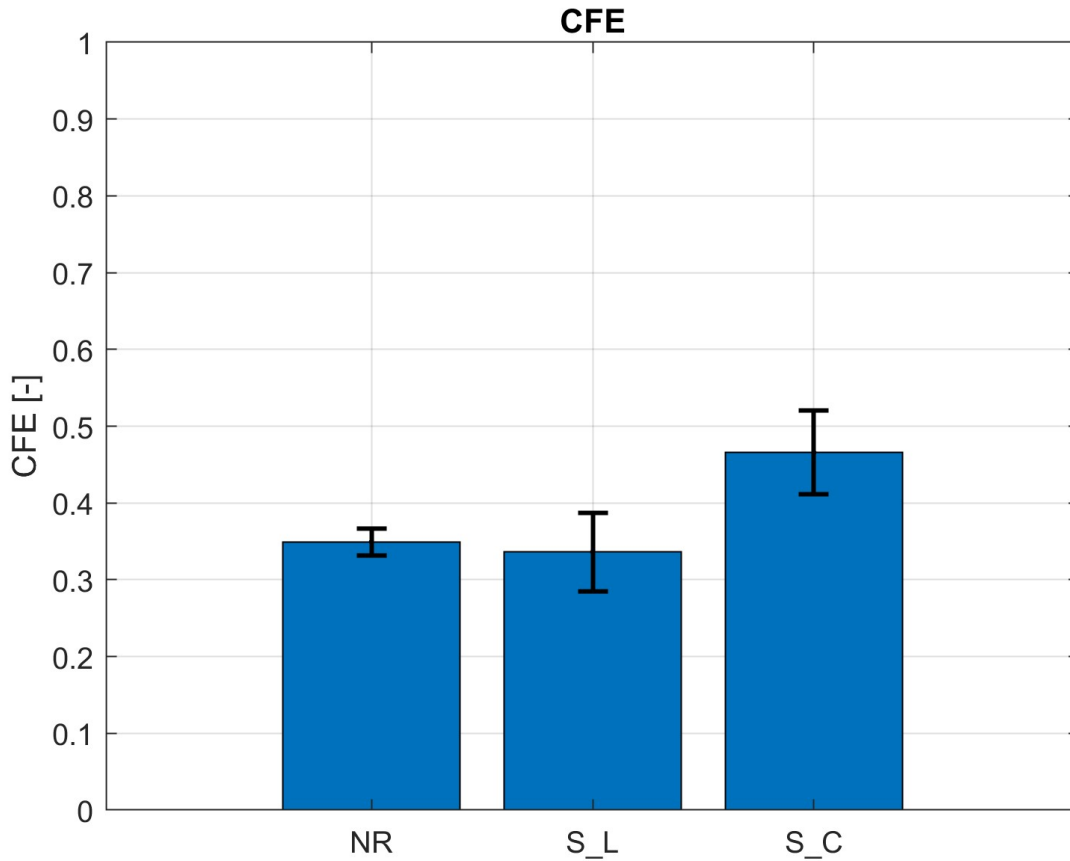


Figura 4.3: Risultati CFE per diverse architetture.

Architettura	CFE [-]	Deviazione standard
No rinforzo	0.35	0.02
Rinforzo semplice in lino	0.34	0.05
Rinforzo semplice in carbonio	0.47	0.05

Tabella 4.3: Risultati CFE per diverse architetture.

Architettura	SCS [MPa]	Deviazione standard
No rinforzo	42.6	0.3
Rinforzo semplice in lino	37.1	4.0
Rinforzo semplice in carbonio	50.5	3.9

Tabella 4.4: Risultati SCS per diverse architetture.

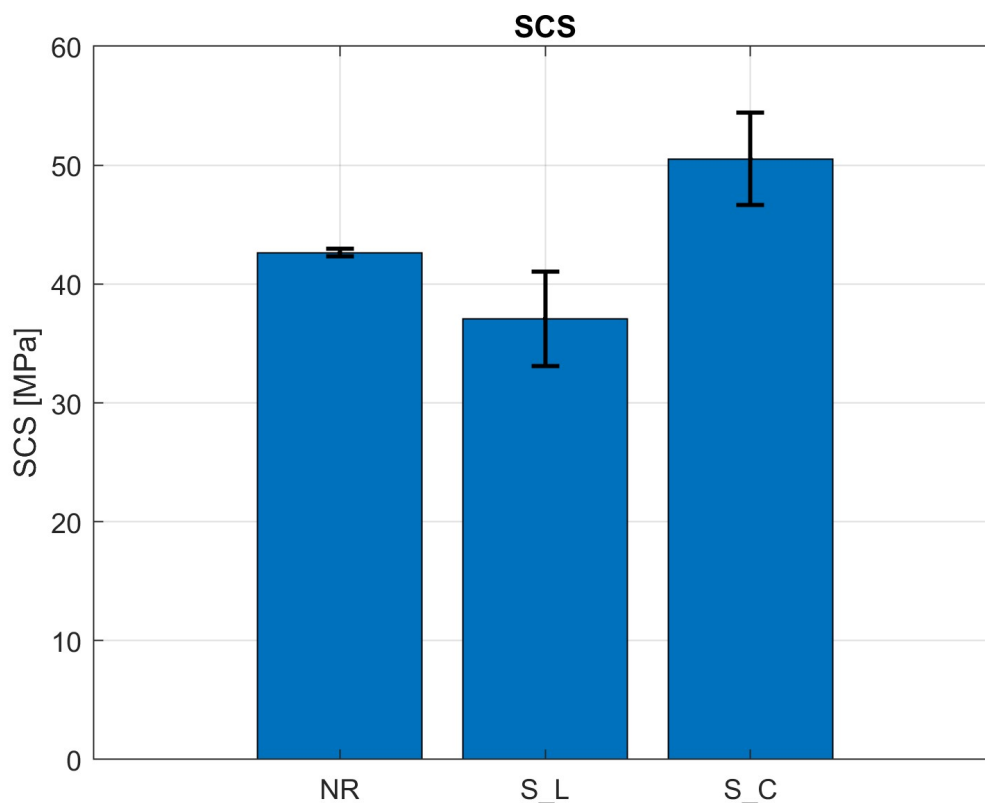


Figura 4.4: Risultati SCS per diverse architetture.

Anche in questo caso il principale incremento dei parametri si ha passando da rinforzo in fibra di lino a rinforzo in fibra di carbonio, con un incremento di circa il 34 % del CFE e di circa il 16 % del SCS. L'effetto dell'architettura del rinforzo di lino è invece trascurabile nel caso del CFE e leggermente negativo nel caso del SCS.

Si è quindi identificata la problematica nella *frequenza del rinforzo*, cioè la frequenza con cui la fibra di rinforzo attraversa i sei layer bidimensionali. Sono state pensate quindi nuove nuove geometrie con lo scopo di evidenziare la differenza tra le architetture. Entrambe sono state realizzate sia con rinforzo in lino che con rinforzo in carbonio. Le nuove strutture sono state già descritte nel Paragrafo 2.1.2, di cui si riporta comunque la rappresentazione grafica in Figura 4.5.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti nel caso dei soli rinforzi in lino, in quanto i rinforzi in carbonio presentano delle criticità che verranno descritte nel Capitolo 5.1. Inoltre, queste criticità hanno interessato anche il rinforzo in lino simmetrico, che è stato comunque preso in considerazione vista la buona ripetibilità delle altre prove.

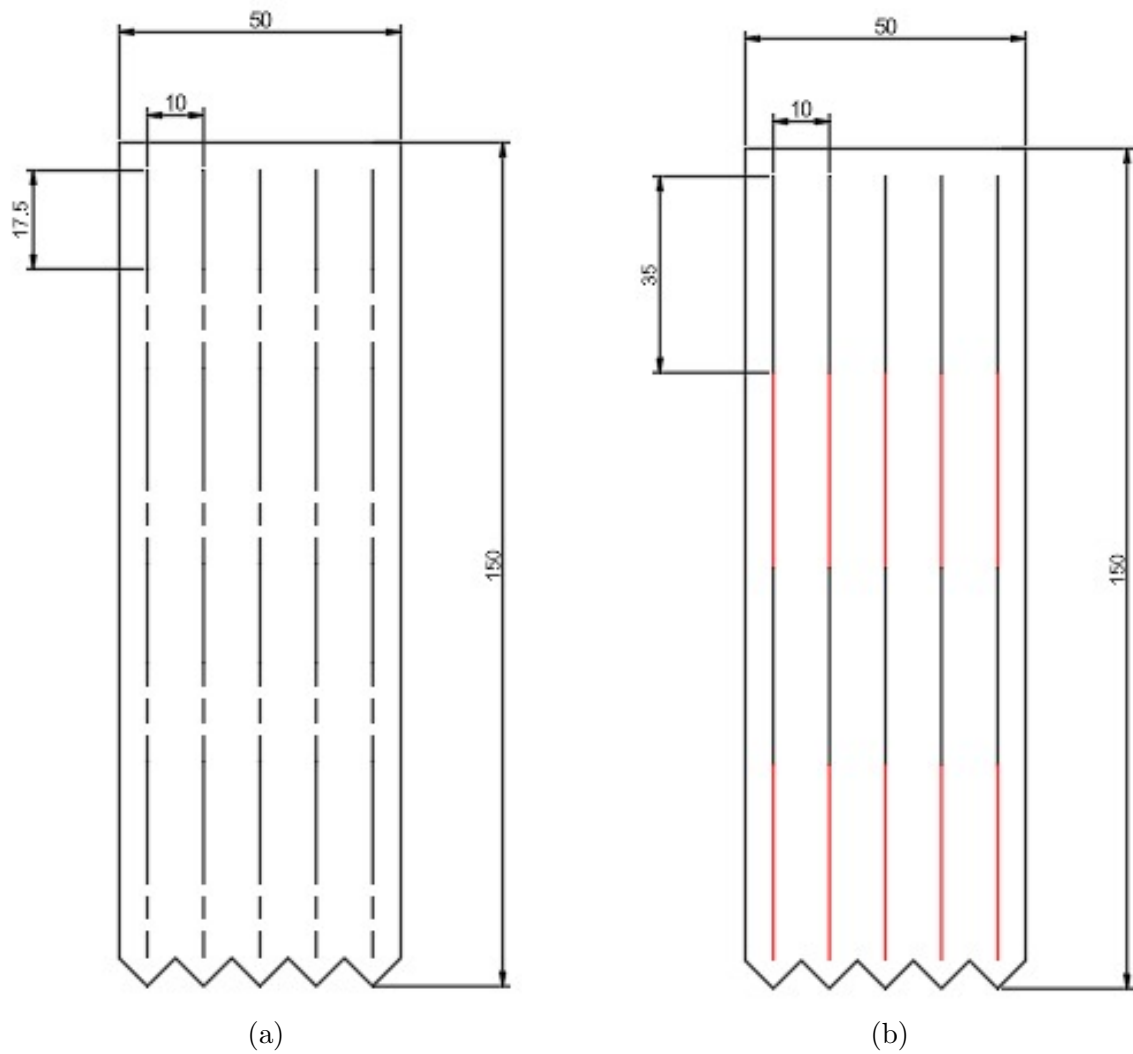


Figura 4.5: Geometria rinforzo a frequenza doppia (a) e simmetrico (b).

Per quanto riguarda il SEA si ottengono i risultati riportati in Tabella 4.5 e rappresentati graficamente in Figura 4.6, mentre in Figura 4.7 è possibile osservare il differente andamento della forza durante l'impatto.

Architettura	SEA [kJ/kg]	Deviazione standard
No rinforzo	34.6	3.6
Rinforzo semplice in lino	32.7	4.4
Rinforzo frequenza doppia in lino	62.5	3.0
Rinforzo simmetrico in lino	58.5	-

Tabella 4.5: Risultati SEA per diverse architetture.

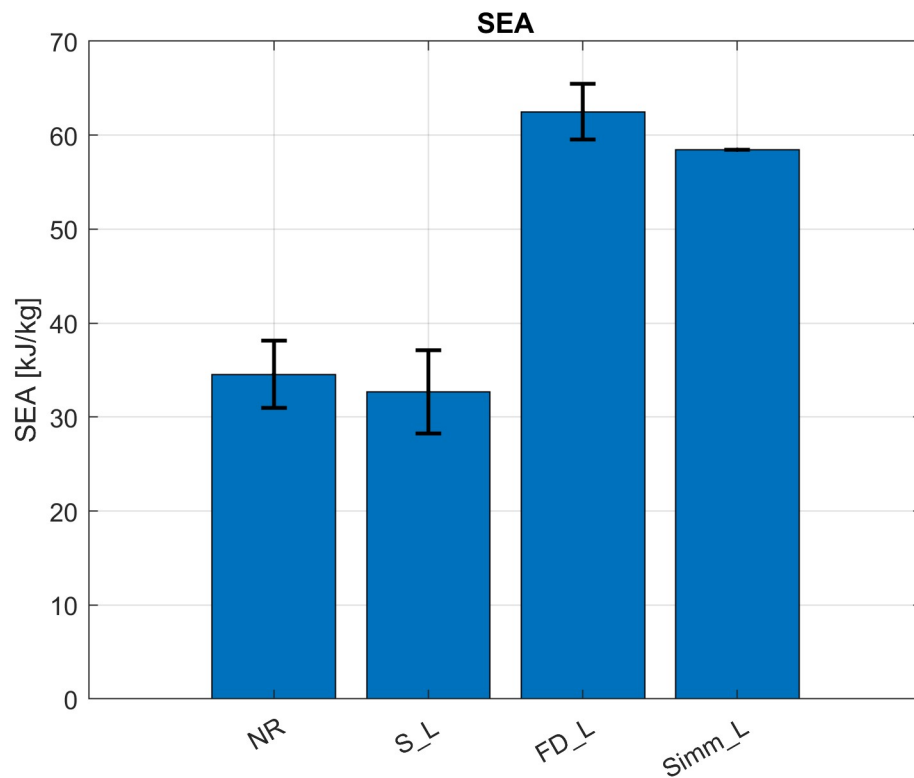
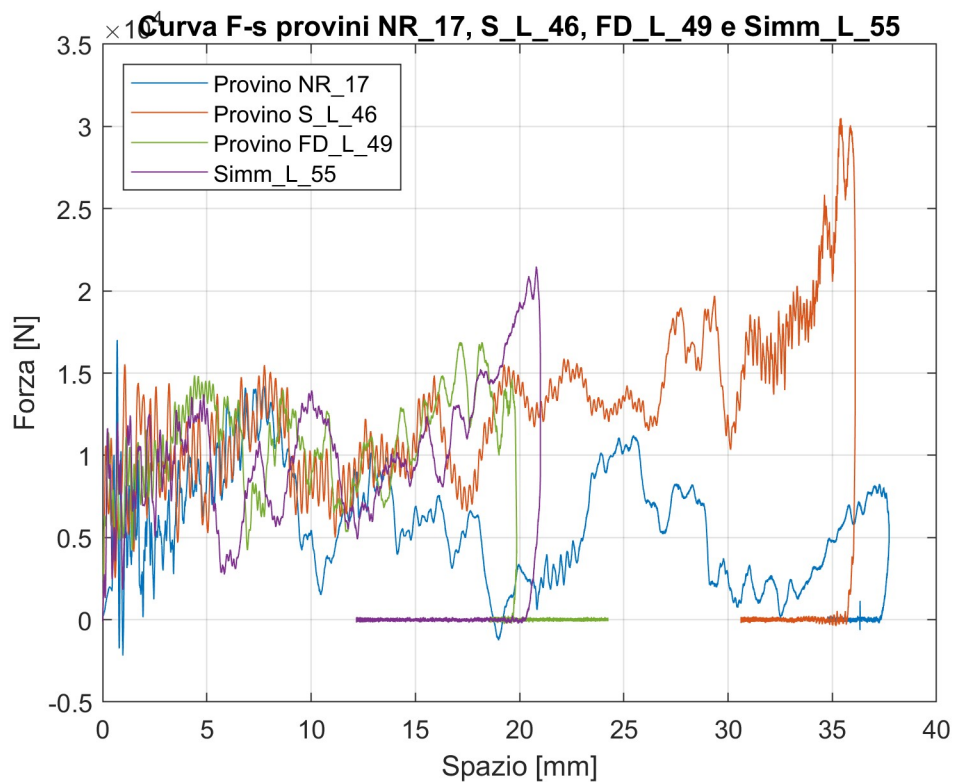


Figura 4.6: Risultati SEA per diverse architetture.

Figura 4.7: Curve F - s dei provini NR_17, S_L_46, FD_L_49 e Simm_L_55.

In questo caso, si osserva un effetto dell'architettura 3D molto più importante rispetto al caso precedente. Difatti, il rinforzo a frequenza doppia presenta un incremento del SEA di circa l'81 % rispetto al caso senza rinforzo, mentre il caso con rinforzo simmetrico comporta un incremento di circa il 69 %.

Per quanto riguarda il CFE, si riportano i risultati in Tabella 4.6 e in Figura 4.8.

Architettura	CFE [-]	Deviazione standard
No rinforzo	0.35	0.02
Rinforzo semplice in lino	0.34	0.05
Rinforzo frequenza doppia in lino	0.64	0.003
Rinforzo simmetrico in lino	58.5	-

Tabella 4.6: Risultati CFE per diverse architetture.

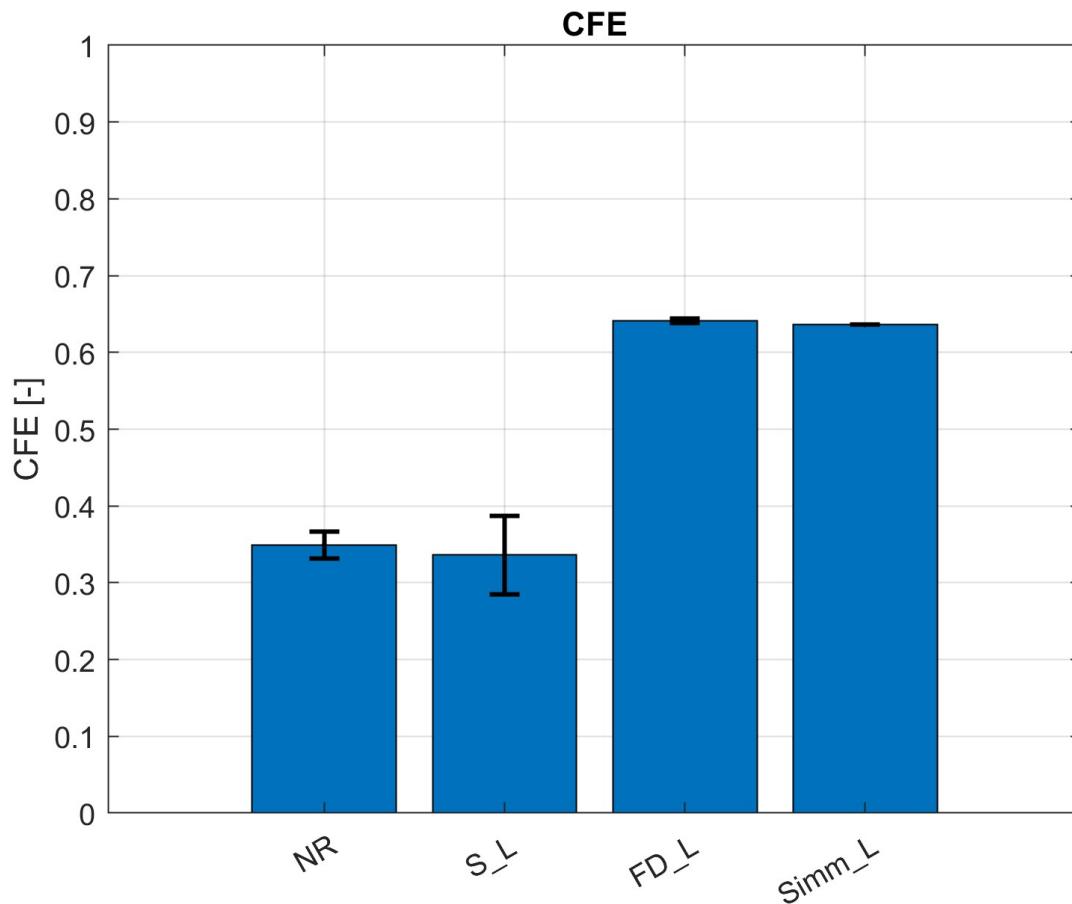


Figura 4.8: Risultati CFE per diverse architetture.

Le considerazioni che si possono fare sono analoghe al caso del SEA. Infatti, sia il rinforzo a frequenza doppia che quello simmetrico comportano un aumento del CFE rispettivamente di circa l'84 % e l'82 %. Così come l'incremento del SEA in queste due nuove soluzioni è un fattore positivo dal punto di vista progettuale, perchè comporta un aumento di energia assorbita per unità di massa, lo stesso si può dire per il CFE. Infatti, un aumento di CFE implica una diminuzione della forza massima rispetto al valore medio, aspetto fondamentale dal punto di vista della sicurezza passiva, ad esempio nel settore automotive. Infatti, le forze in gioco durante un impatto hanno sostanzialmente lo stesso andamento delle decelerazioni. Di conseguenza, aumentare il CFE significa ridurre il picco di forza rispetto al suo valore medio e quindi far sì che il passeggero sia sottoposto ad una decelerazione con un picco minore.

Per quanto riguarda l'SCS, si riportano i risultati in Tabella 4.7 e in Figura 4.9.

Architettura	SCS [MPa]	Deviazione standard
No rinforzo	42.6	0.3
Rinforzo semplice in lino	37.1	4.0
Rinforzo frequenza doppia in lino	68.0	5.3
Rinforzo simmetrico in lino	58.2	-

Tabella 4.7: Risultati SCS per diverse architetture.

Le considerazioni che si possono fare sono analoghe ai casi precedenti. Si osserva infatti come l'SCS aumenti nei casi di rinforzo a frequenza doppia e rinforzo simmetrico rispetto al caso iniziale, rispettivamente del 60 % e del 37 %. Questo incremento significa che le nuove architetture permettono al materiale di raggiungere tensioni più elevate prima di rompersi.

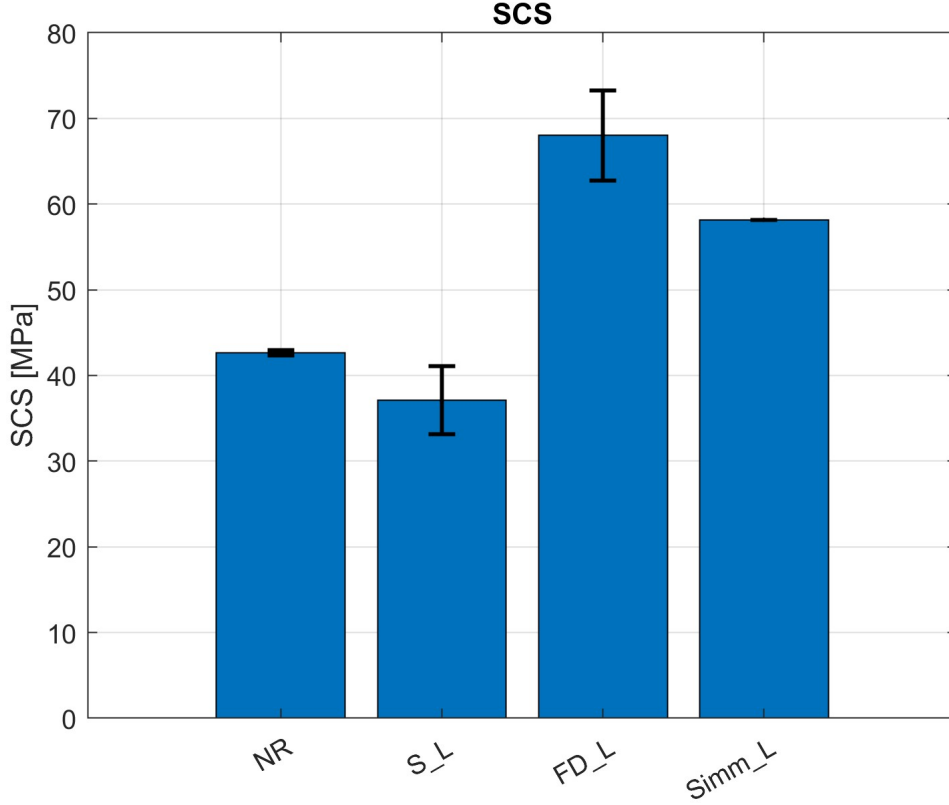


Figura 4.9: Risultati SCS per diverse architetture.

4.3 Indice per il confronto tra SEA e CFE

Come si è visto in precedenza, a fronte di un aumento di SEA si va incontro anche ad un aumento del CFE. Questo comporta in entrambi i casi dei vantaggi dal punto di vista della progettazione ai fini della sicurezza passiva. Tuttavia, cambiando architettura la crescita di questi due parametri è differente. Può quindi rivelarsi utile la definizione di un indice che contenga le informazioni relative all'incremento relativo dei vari parametri in esame e li confronti tra di loro. Questo al fine di avere un termine matematico che possa essere utile nell'ottica della realizzazione di un componente con tessuto in rinforzo 3D che varia nel componente stesso, per ottimizzare localmente le proprietà.

A seguito di varie iterazioni si è identificato l'indice più adatto definito come:

$$I_{log} = \ln \left(\frac{SEA_i}{SEA_{nr}} \right) - \ln \left(\frac{CFE_i}{CFE_{nr}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{SEA_i}{SEA_{nr}}}{\frac{CFE_i}{CFE_{nr}}} \right) \quad (4.1)$$

Dove:

- SEA_i : SEA dell'i-esimo caso di architettura 3D in esame
- SEA_{nr} : SEA del caso di riferimento, che è l'architettura senza rinforzo
- CFE_i : CFE dell'i-esimo caso di architettura 3D in esame
- CFE_{nr} : CFE del caso di riferimento, che è l'architettura senza rinforzo

I casi che questo indice permette di valutare sono i seguenti:

- Se $I_{log} > 0 \Rightarrow$ il SEA ha un vantaggio relativo sul CFE.
- Se $I_{log} < 0 \Rightarrow$ il CFE ha un vantaggio relativo sul SEA.
- Se $I_{log} = 0 \Rightarrow$ SEA e CFE si equivalgono.

Questo indice è quindi pensato per confrontare i due parametri non solo quando entrambi crescono, ma anche quando uno od entrambi diminuiscono rispetto al caso di riferimento. Di contro, osservando l'indice non possiamo ottenere indicazioni sulla crescita o decrescita dei due parametri, ma solo sul loro confronto. Per tenere conto di ciò la cosa più intuitiva è usare un vettore in cui sono presenti anche i segni dell'incremento percentuale di SEA e CFE. Le informazioni di interesse potevano essere condensate in un vettore con soli due termini. Tuttavia, per evitare che la lettura dell'indice diventasse troppo contro-intuitiva, si è scelto di usare un vettore a 3 componenti in cui sono presenti anche i segni dell'incremento percentuale del SEA e del CFE.

Si definisce quindi l'indice **I** come segue:

$$\mathbf{I} = \left(\text{sign}\left(\frac{SEA_i - SEA_{nr}}{SEA_{nr}}\right), \text{sign}\left(\frac{CFE_i - CFE_{nr}}{CFE_{nr}}\right), I_{log} \right) \quad (4.2)$$

Si riportano in Tabella 4.8 i valori dell'indice **I** calcolati sulla base delle analisi sperimentali effettuate.

Architettura	I
Rinforzo in lino semplice	$(-1, -1, -0.17)$
Rinforzo frequenza doppia	$(1, 1, -0.014)$
Rinforzo simmetrico	$(1, 1, -0.07)$
Rinforzo in carbonio semplice	$(1, 1, -0.04)$

Tabella 4.8: Valori di **I** per le architetture in esame.

Si può quindi osservare in maniera compatta come nel primo caso sia il SEA che il CFE diminuiscono, ma il CFE diminuisce meno del SEA. In tutti gli altri casi sia il SEA che il CFE aumentano, ma il CFE aumenta sempre più del SEA.

4.4 Effetto del quantitativo di fibre

Come già visto nel Paragrafo 4.2, cambiare il quantitativo di fibre comporta delle variazioni significative in termini di proprietà del materiale composito. Quindi, può essere interessante andare a definire un parametro che permetta di tenere in considerazione questo aspetto. A seguito di alcune analisi si è pensato di adottare come parametro il SEA normalizzato rispetto alla percentuale in volume di fibre:

$$SEA_f = \frac{SEA}{v_f} \quad (4.3)$$

Dove v_f è definito come il rapporto tra il volume di fibre V_f e il volume totale del composito V_c :

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (4.4)$$

Questo parametro permette di pesare l'energia assorbita dal materiale tenendo in considerazione sia la sua massa che la quantità di fibre in esso presente. Come per il SEA, la normalizzazione rispetto la massa ha lo scopo di tenere in considerazione le differenze di manifattura che inevitabilmente si hanno anche tra provini dello stesso tipo. Mentre la normalizzazione rispetto a v_f ha lo scopo di mettere in evidenza le proprietà dell'architettura e non del solo aumento del quantitativo di fibre.

Quindi per ottenere il SEA_f è necessario ricavare sperimentalmente il valore v_f . Per fare ciò si parte pesando le fibre presenti all'interno di un provino, ottenendo il valore W_f , e pesando il provino ultimato, ottenendone il peso W_c . Nel caso di materiale composito ibrido, cioè costituito da due o più tipologie di fibre differenti, si distinguerà in W_{f1} e W_{f2} . Considerando che:

$$V_{f1} = \frac{W_{f1}}{\rho_{f1}} \quad (4.5)$$

$$V_{f2} = \frac{W_{f2}}{\rho_{f2}} \quad (4.6)$$

$$V_m = \frac{W_c - W_{f1} - W_{f2}}{\rho_m} \quad (4.7)$$

$$V_c = V_{f1} + V_{f2} + V_m \quad (4.8)$$

Si ottiene:

$$v_{f1} = \frac{V_{f1}}{V_c} = \frac{\frac{W_{f1}}{\rho_{f1}}}{\frac{W_{f1}}{\rho_{f1}} + \frac{W_{f2}}{\rho_{f2}} + \frac{W_c - W_{f1} - W_{f2}}{\rho_m}} \quad (4.9)$$

$$v_{f2} = \frac{V_{f2}}{V_c} = \frac{\frac{W_{f2}}{\rho_{f2}}}{\frac{W_{f1}}{\rho_{f1}} + \frac{W_{f2}}{\rho_{f2}} + \frac{W_c - W_{f1} - W_{f2}}{\rho_m}} \quad (4.10)$$

Ed infine:

$$v_f = v_{f1} + v_{f2} \quad (4.11)$$

Applicando poi la 4.3 si ottiene il SEA_f .

La problematica principale legata a questo procedimento è che non è possibile pesare le fibre che andranno poi a comporre effettivamente lo specifico provino. Questo perché il provino viene tagliato a partire da una lastra in cui le fibre sono già

irreversibilmente unite alla matrice. Inoltre, l'inserimento della resina nello stampo non è un fenomeno controllato, risulta quindi impossibile capire dalla sola lastra quali sono le percentuali in volume od in massa di fibre e di matrice che costituiscono il composito. Nell'ottica di una caratterizzazione efficace del materiale, però, è fondamentale far in modo che la geometria del provino non influenzi la raccolta dei dati. Per tale motivo, si è scelto di non usare una proprietà media del laminato, ma si è scelto di ricavare le percentuali in volume per ogni singolo provino.

Per fare ciò sono state ricavate le densità sia delle fibre che costituiscono i layer sia delle fibre di rinforzo. Sono state effettuate delle misurazioni di peso e di dimensioni su dei campioni delle varie tipologie di fibre e sono stati ottenuti i valori medi riportati in Tabella 4.9.

Per quanto riguarda le fibre di rinforzo, invece, sono stati usati dei campioni di fibre singole di cui è stata misurata la lunghezza ed il peso, da cui è stata ricavata una densità lineare.

Tipologia di fibra	Tipologia di densità	Valore
Lino dei layer	Densità areale $[g/mm^2]$	2.20×10^{-4}
Lino di rinforzo	Densità lineare $[g/mm]$	2.92×10^{-4}
Carbonio di rinforzo	Densità lineare $[g/mm]$	8.18×10^{-4}

Tabella 4.9: Valori di densità delle varie tipologie di fibre.

Ottenuti questi valori, è stata calcolata l'area del singolo layer di ogni provino $A_{l,i}$ a partire dalle misure di lunghezza e larghezza media dello stesso e considerando la presenza del *trigger*. Moltiplicando tale valore per la densità areale ρ_{al} si ottiene la massa in fibre del singolo layer. Moltiplicando per il numero di layer n_l si ottiene $W_{f1,i}$, come espresso nella Formula 4.12.

$$W_{f1,i} = n_l A_{l,i} \rho_{al} \quad (4.12)$$

Per quanto riguarda il calcolo della massa delle fibre di rinforzo W_{f2} , esso dipende dal tipo di rinforzo scelto. Sono quindi state ipotizzate delle geometrie affini a quelle rappresentate nelle Figure 2.3 e 2.4. Si è considerato inoltre che la fibra di rinforzo attraversasse tutta la lunghezza del provino e attraversasse i layer sviluppandosi in una lunghezza perpendicolare al piano del laminato per circa l'80 % dello spessore, come rappresentato in Figura 4.10.

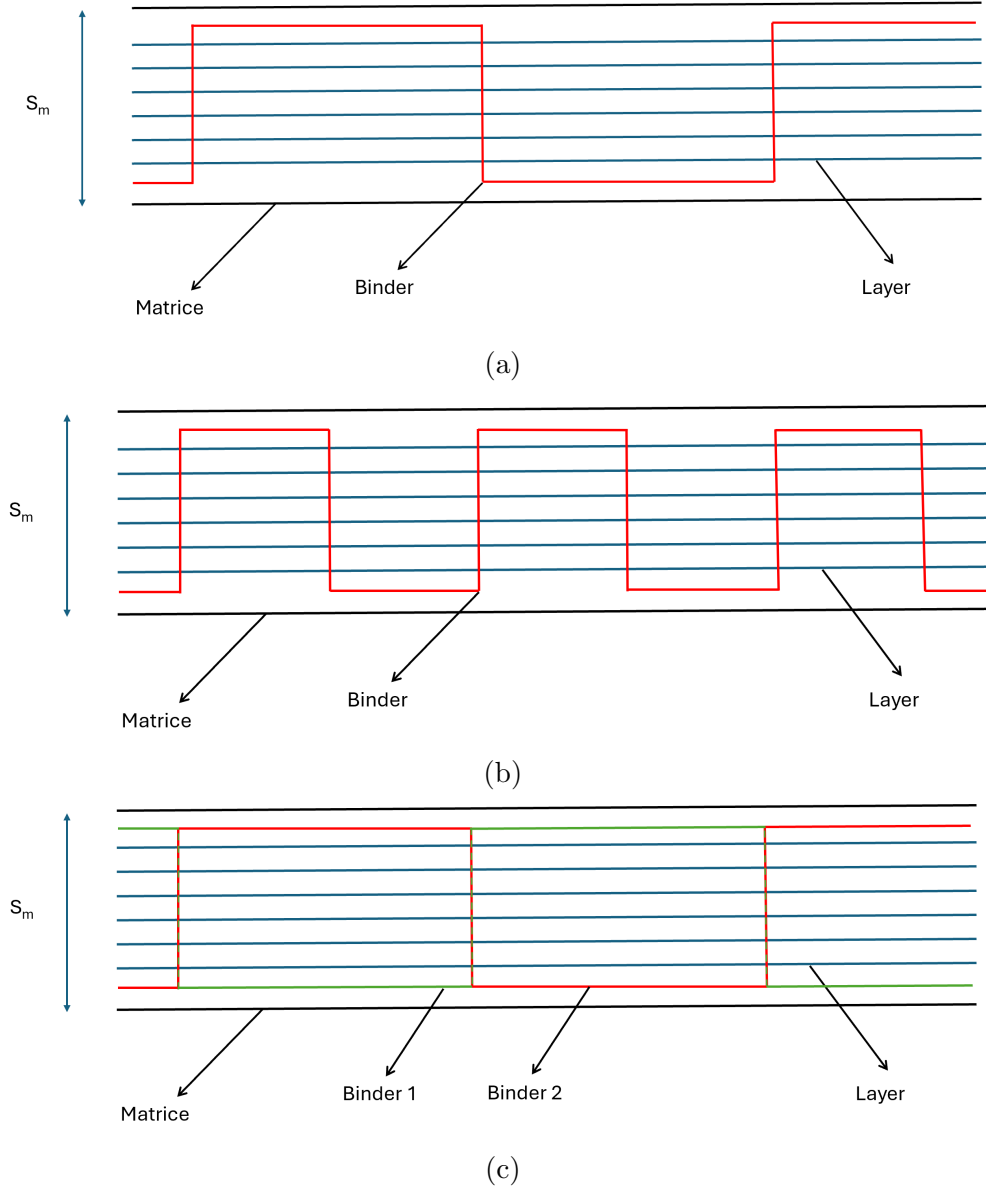


Figura 4.10: Andamento del rinforzo tra i layer nel caso di rinforzo semplice (a), rinforzo a frequenza doppia (b) e rinforzo simmetrico (c).

Sulla base di queste ipotesi, sono state calcolate le lunghezze delle fibre nei vari casi di rinforzo usando la Formula 4.13.

$$l_{fr,i} = (L_{m,i} + S_{m,i}c_{s,i}f_{r,i})n_{f,i} \quad (4.13)$$

Dove:

- $l_{fr,i}$: Lunghezza delle fibre di rinforzo dentro un provino [mm]

- $L_{m,i}$: Lunghezza media del provino $[mm]$
- $S_{m,i}$: Spessore medio del provino $[mm]$
- $c_{s,i}$: Fattore di attraversamento dello spessore $[-]$. Rappresenta quanto dello spessore complessivo viene effettivamente attraversato dal binder. In questo caso è ipotizzato per tutte le tipologie di rinforzo come 0.8
- $f_{r,i}$: Frequenza di attraversamento dello spessore $[-]$. Nel caso del rinforzo base è 5, mentre nel caso di rinforzo con densità doppia è 10
- $n_{f,i}$: Numero di fibre di rinforzo del provino $[-]$. Questo parametro vale 5 nel caso di rinforzo semplice e con frequenza doppia; mentre vale 10 nel caso di rinforzo simmetrico

Si ricava quindi W_{f2} usando la 4.14.

$$W_{f2,i} = l_{fr,i} \rho_{lr} \quad (4.14)$$

Dove $\rho_{lr,i}$ è la densità lineare delle fibre di rinforzo $[g/mm]$ i cui valori sono riportati in Tabella 4.9. Ottenuti W_{f1} e W_{f2} si possono eseguire i passaggi da 4.5 a 4.11 per ottenere il v_f di ogni provino. Si riportano nella Tabella 4.10 i valori medi percentuali di v_f ottenuti per le varie tipologie di rinforzo.

Architettura	$v_{f\%} \text{ [%]}$
No rinforzo	34.8
Rinforzo semplice in lino	38.5
Rinforzo frequenza doppia in lino	38.3
Rinforzo simmetrico in lino	42.5
Rinforzo semplice in carbonio	40.1

Tabella 4.10: Valori di $v_{f\%}$ delle varie tipologie di rinforzo.

Come si osserva, passando dal caso senza rinforzo a quello con rinforzo si ha un aumento della percentuale in volume di fibre. Nei casi Rinforzo in lino e Rinforzo frequenza doppia il valore di v_f è sostanzialmente lo stesso perché il quantitativo di fibre aggiuntivo è effettivamente lo stesso, cambia solo come esse attraversano i

layer. Invece, nel caso del Rinforzo simmetrico si usano il doppio delle fibre, cosa che inevitabilmente va a cambiare il valore di v_f rispetto al caso di rinforzo base.

Si analizzano ora i valori del SEA_f e li si confrontano con i valori precedentemente ottenuti di SEA , entrambi con velocità di impatto 4 m/s . Questi valori sono riportati in Tabella 4.11 e in Figura 4.11. I dati sono riportati senza deviazione standard perché è la stessa riportata nelle tabelle 4.2 e 4.5, dato che il contributo di v_f nella dispersione dei dati è trascurabile rispetto a quello del SEA .

Architettura	SEA [kJ/kg]	SEA_f [kJ/kg]
No rinforzo	34.6	98.3
Rinforzo semplice in lino	32.7	86.2
Rinforzo frequenza doppia in lino	62.5	164.3
Rinforzo simmetrico in lino	58.4	137.7
Rinforzo semplice in carbonio	43.8	108.8

Tabella 4.11: Confronto fra SEA e SEA_f .

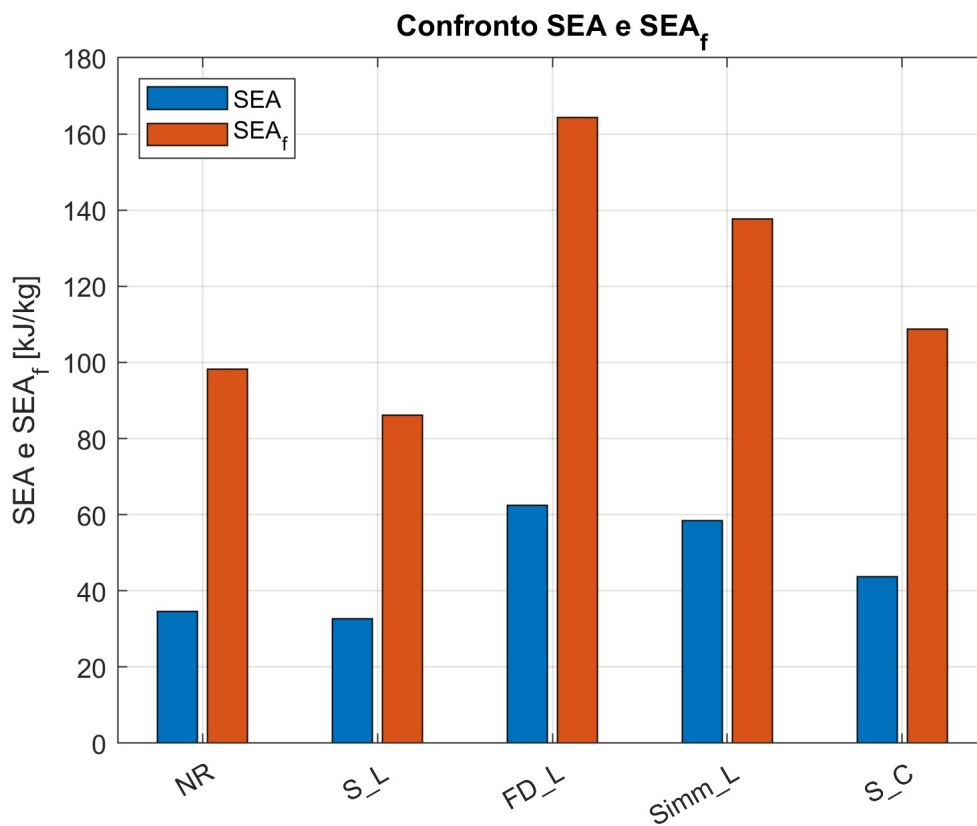


Figura 4.11: Confronto fra SEA e SEA_f .

In termini di valori assoluti non è facile confrontare SEA e SEA_f per apprezzarne le differenze. Quindi risulta utile usare gli incrementi relativi rispetto ad un caso base di confronto, che è quello senza rinforzo. Si calcolano gli incrementi con le Formule 4.15 e 4.16 e si riportano i valori in Tabella 4.12.

$$\Delta SEA = \frac{SEA_i - SEA_{nr}}{SEA_{nr}} \cdot 100 \quad (4.15)$$

$$\Delta SEA_f = \frac{SEA_{f,i} - SEA_{f,nr}}{SEA_{f,nr}} \cdot 100 \quad (4.16)$$

Architettura	ΔSEA [%]	ΔSEA_f [%]
Rinforzo semplice in lino	-5.5	-12.3
Rinforzo frequenza doppia in lino	+80.9	+67.2
Rinforzo simmetrico in lino	+69.2	+40.1
Rinforzo semplice in carbonio	+26.9	+10.7

Tabella 4.12: Confronto fra ΔSEA e ΔSEA_f .

Come si osserva dai risultati in Tabella 4.12 il SEA e il SEA_f indicano gli stessi andamenti in termini di assorbimento di energia, ma con quantità differenti. Un altro trend generale identificabile è quello per cui l'incremento di SEA_f è minore dell'incremento di SEA. Questo è dovuto al fatto che il primo è pensato per considerare meno prestazionali quei casi in cui l'incremento è dato da un aumento del numero di fibre e non da un'ottimizzazione del rinforzo tridimensionale.

Partendo dal caso con rinforzo in lino, in entrambi i casi si ha un peggioramento, che nel caso del SEA è inteso solo come peggioramento dell'assorbimento dell'energia in relazione al peso. Nel caso del SEA_f, invece, il peggioramento è inteso anche in termini di fibre usate, cioè questo parametro tiene conto anche del fatto che per cambiare l'assorbimento di energia è stato incrementato il numero di fibre, che sono quelle che danno il principale contributo in termini di prestazioni meccaniche. Quindi, con il SEA_f si mette in evidenza come l'uso di ulteriori fibre per un rinforzo come quello iniziale non sia giustificato in termini di prestazioni.

Per quanto riguarda il rinforzo a frequenza doppia, esso è quello che presenta un valore più alto di SEA_f. Questo è dovuto al fatto che è l'architettura che più permette

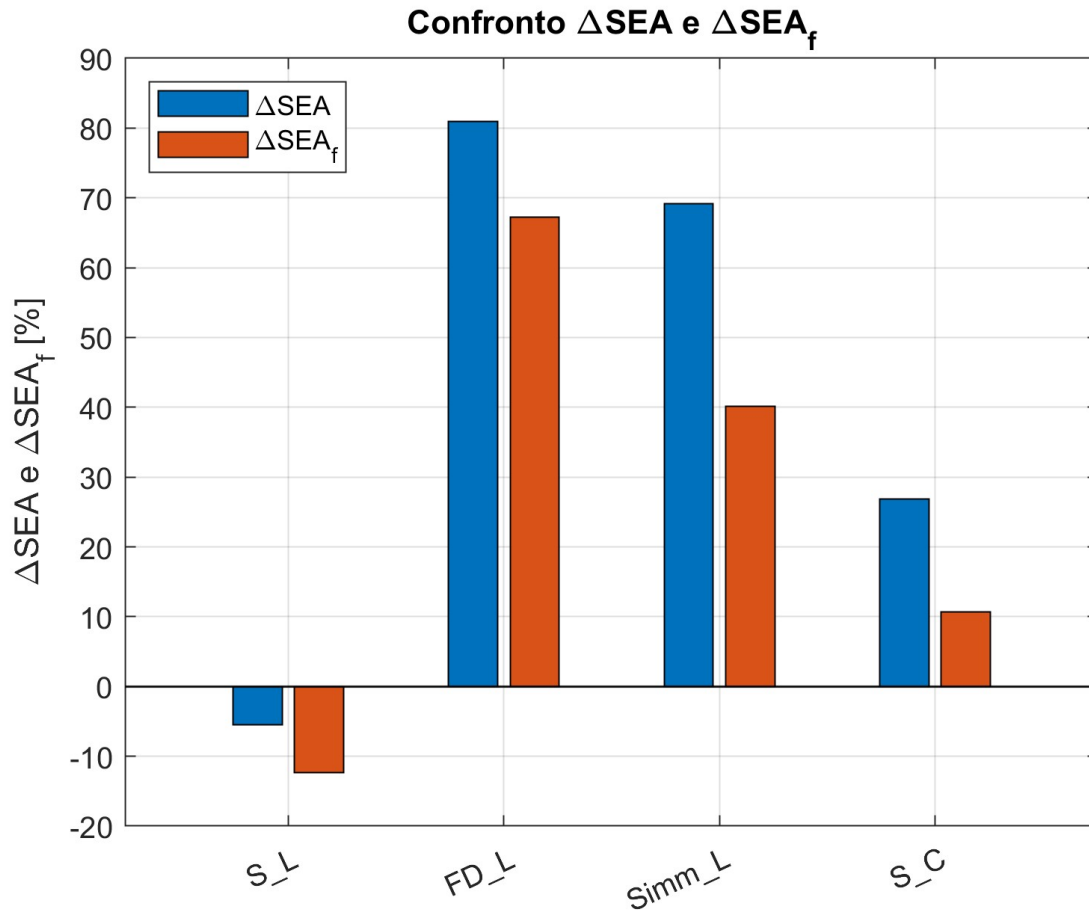


Figura 4.12: Confronto fra ΔSEA e ΔSEA_f .

di incrementare il SEA e allo stesso tempo di mantenere basso il numero di fibre aggiuntive usate. Dall'altro lato, il caso del rinforzo simmetrico subisce un crollo più drastico passando da SEA a SEA_f , questo perché un'architettura di questo tipo permette sì un aumento dell'energia assorbita contenendo l'aumento di peso, ma allo stesso tempo richiede un aumento delle fibre usate. Quindi il SEA_f si pone come un parametro in grado di evidenziare con maggiore enfasi anche le differenze tra architetture, oltre che a dare un peso più realistico al confronto fra caso rinforzato e non.

Le stesse osservazioni si possono fare nel caso del rinforzo in carbonio. Infatti, questo rinforzo comporta un aumento di SEA, che però non è giustificato dall'architettura usata. Il miglioramento è dovuto al fatto che nella matrice vengono inserite delle fibre di carbonio, che sono molto più prestazionali dal punto di vista delle proprietà meccaniche rispetto a quelle di lino. Per tale motivo, passando dal SEA al SEA_f si ha un crollo dal 26.9 % al 10.7 %.

Un'analisi del tutto analoga può essere svolta normalizzando il SEA rispetto alla massa di fibre usata, invece che rispetto al volume, con l'obiettivo di differenziare maggiormente gli effetti delle diverse fibre usate (lino e carbonio).

Per fare ciò calcoliamo il peso in fibre W_f svolgendo gli stessi passaggi usati in precedenza per ottenere W_{f1} e W_{f2} (Formule 4.12 e 4.14). Ottenuti questi valori si calcola W_f con la Formula 4.17, dove è presente il pedice i perché il procedimento è stato ripetuto per ogni provino.

$$W_{f,i} = W_{f1,i} + W_{f2,i} \quad (4.17)$$

Ottenuto questo parametro si definisce il SEA_W come:

$$SEA_W = \frac{SEA}{w_f} \quad (4.18)$$

Dove w_f è la frazione in massa delle fibre ed è definita come:

$$w_f = \frac{W_{f,i}}{W_{c,i}} \quad (4.19)$$

Si riportano nella Tabella 4.13 i valori medi percentuali di w_f ottenuti per le varie tipologie di rinforzo.

Architettura	$w_{f\%} [\%]$
No rinforzo	31.9
Rinforzo semplice in lino	35.9
Rinforzo frequenza doppia in lino	35.7
Rinforzo simmetrico in lino	40.0
Rinforzo semplice in carbonio	38.2

Tabella 4.13: Valori di $w_{f\%}$ delle varie tipologie di rinforzo.

In modo del tutto analogo a quanto visto in precedenza, si effettua un confronto non tanto sui valori assoluti di SEA_W , ma sugli incrementi percentuali, calcolati con la

Formula 4.20 e riportati in Tabella 4.14 ed in Figura 4.13.

$$\Delta SEA_f = \frac{SEA_{f,i} - SEA_{f,nr}}{SEA_{f,nr}} \cdot 100 \quad (4.20)$$

Architettura	ΔSEA [%]	ΔSEA_f [%]	ΔSEA_W [%]
Rinforzo semplice in lino	-5.5	-12.3	-12.4
Rinforzo frequenza doppia in lino	+80.9	+67.2	+67.1
Rinforzo simmetrico in lino	+69.2	+40.1	+40.3
Rinforzo semplice in carbonio	+26.9	+10.7	+8.8

Tabella 4.14: Confronto fra ΔSEA , ΔSEA_f e ΔSEA_W .

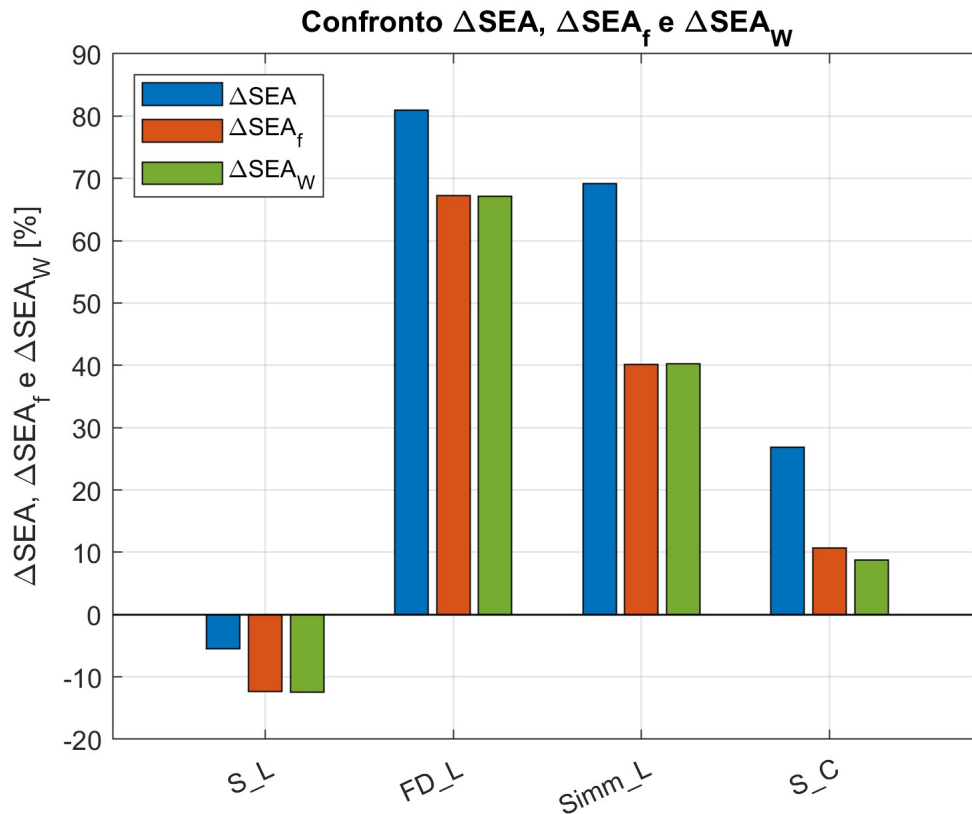


Figura 4.13: Confronto fra ΔSEA , ΔSEA_f e ΔSEA_W .

Come si può osservare, gli andamenti di ΔSEA_f e ΔSEA_W sono molto simili fra di loro, soprattutto nei primi tre casi. Nel caso di rinforzo in carbonio, invece, passando dal ΔSEA_f al ΔSEA_W si ha una lieve diminuzione, da 9.0% a 6.5%. Questo parametro distingue maggiormente le prestazioni tra il caso di rinforzo in lino e rinforzo in carbonio grazie al fatto che la differenza di densità tra i due materiali (e quindi di peso) è maggiore rispetto alla differenza di percentuale in volume. Con

questo parametro si amplifica quindi ancora di più l'effetto dell'architettura del rinforzo e non l'effetto dovuto alla presenza di fibre più prestazionali come quelle di carbonio. È da notare comunque che la fibra di carbonio comporta un miglioramento sostanziale rispetto al caso del rinforzo in lino, quindi anche questo parametro è inevitabilmente influenzato dalla tipologia di fibra di rinforzo usata. Per avere una panoramica completa della situazione, è quindi necessario tenere in considerazione tutti questi parametri ed i valori assoluti da cui essi derivano.

4.5 Effetto della velocità

Si passa ora ad analizzare i risultati ottenuti da prove effettuate a diverse velocità di impatto, con lo scopo di indagare eventuali influenze di questo parametro sul comportamento del materiale. Per variare la velocità è stata variata l'altezza di caduta del dardo secondo la legge espressa nella Formula 2.1. Il confronto è stato fatto tra il caso senza rinforzo ed il caso con rinforzo più efficace, cioè il lino con frequenza doppia.

Si riportano nella Tabella 4.15 gli andamenti di SEA, CFE ed SCS in funzione della velocità nel caso di architettura bidimensionale.

Velocità [m/s]	SEA [kJ/kg]	CFE [-]	SCS [MPa]
3.5	31.3	0.37	38.1
4	34.5	0.35	42.6
6	33.6	0.21	39.8

Tabella 4.15: Tabella andamenti SEA, CFE e SCS in funzione della velocità.

Mentre non si osservano particolari influenze della velocità rispetto al SEA e all'SCS, si nota un'evidente diminuzione del CFE all'aumentare della velocità di impatto. Questo aspetto è messo in risalto dal grafico in Figura 4.14.

Questo risultato sta a significare che all'aumentare della velocità, il picco di forza diventa sempre più grande rispetto al valore medio della forza di impatto. Ciò significa che in un impatto ad alta velocità la decelerazione iniziale aumenta rispetto a quella complessiva. Questo comportamento del materiale comporta un peggioramento delle sue proprietà dal punto di vista delle applicazioni per la sicurezza passiva. Questi risultati sono stati confrontati con le prove effettuate sul materiale con rinforzo tridimensionale a frequenza doppia. Si riporta in Figura 4.15 il confronto grafico tra i due SEA.

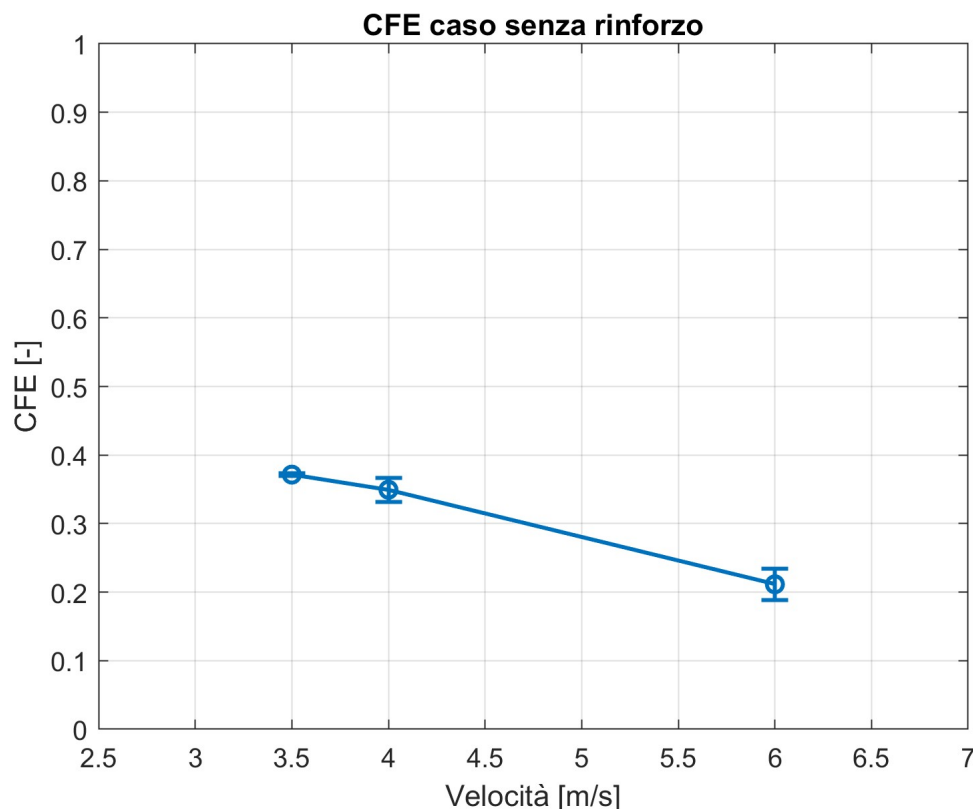


Figura 4.14: Andamento CFE in funzione della velocità nel caso senza rinforzo.

Come si osserva, mentre il caso senza rinforzo non presenta una significativa influenza della velocità, il caso con rinforzo risente invece particolarmente di questo parametro. Infatti, il SEA aumenta di circa il 21 % raddoppiando la velocità. Ciò significa che il materiale con rinforzo 3D presenta una predisposizione ad aumentare le sue proprietà di assorbimento all'aumentare della velocità. Questo è un fattore positivo perché, se si considera l'esempio di un veicolo in moto, a parità di massa, all'aumentare della velocità aumenterà necessariamente l'energia del veicolo stesso e quindi l'energia da dissipare in caso di incidente.

Per quando riguarda il confronto fra i CFE, anche nel caso di rinforzo tridimensionale si osserva come all'aumentare della velocità questo parametro tenda a diminuire. Questo comporta uno svantaggio dal punto di vista della sicurezza passiva, come descritto in precedenza. Tuttavia, mentre nel caso di rinforzo bidimensionale la riduzione del CFE all'aumentare della velocità risulta particolarmente significativa, nel caso di rinforzo tridimensionale non si osserva un crollo così drastico di questo parametro. Difatti, interpolando in modo lineare i dati sperimentali il caso con rinforzo bidimensionale ha un coefficiente angolare di -0.0657 , mentre il caso con rinforzo 3D di -0.0097 . Il tutto è rappresentato graficamente in Figura 4.16.

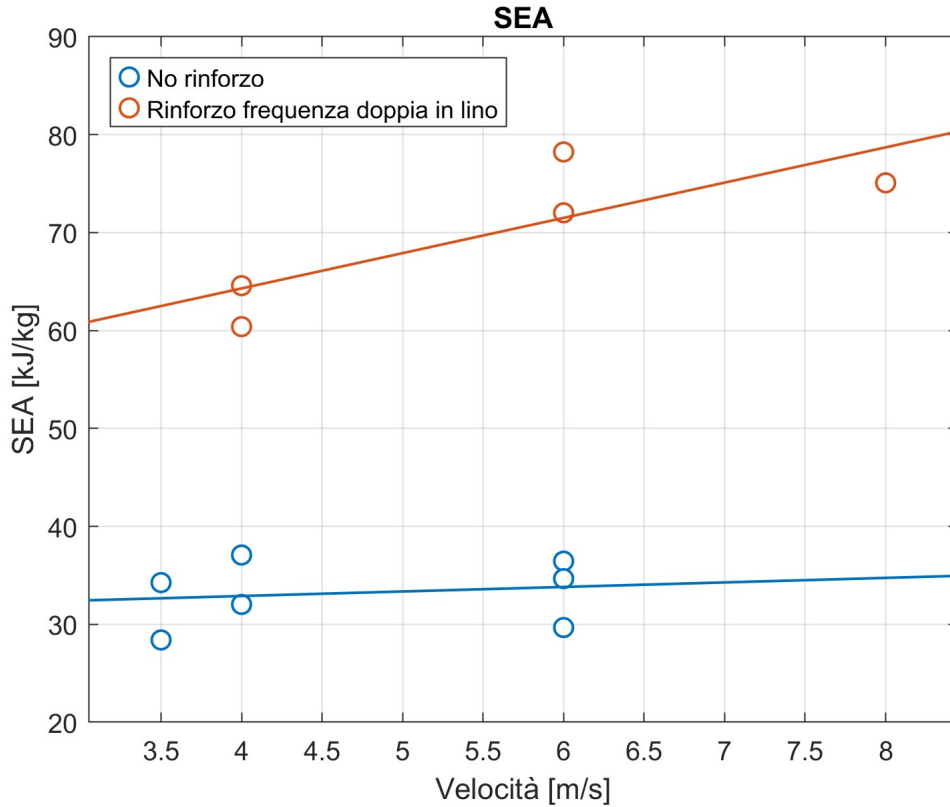


Figura 4.15: Andamento SEA in funzione della velocità nel caso senza rinforzo e nel caso con rinforzo a frequenza doppia in lino.

Infine si analizza l'andamento del SCS in funzione della velocità. Come nel caso del SEA, mentre l'architettura 2D non presenta una importante dipendenza dalla velocità, nel caso 3D notiamo un significativo aumento del SCS all'aumentare della velocità. Difatti, la pendenza della retta interpolante è di -0.0383 nel primo caso, contro il 22.4 nel secondo caso. L'andamento è riportato in Figura 4.17. Questo è un aspetto positivo perchè significa che in condizioni più critiche, come quelle in cui la velocità di impatto aumenta, il materiale con rinforzo tridimensionale è in grado di aumentare la tensione media alla quale è sottoposto.

Riassumendo, nel caso di rinforzo bidimensionale non si osserva una dipendenza del SEA e del SCS dalla velocità, mentre nel caso tridimensionale entrambi crescono all'aumentare della velocità. Questo colloca il rinforzo 3D in una posizione di efficacia maggiore in tutte quelle applicazioni di sicurezza passiva in cui è fondamentale l'assorbimento di energia in relazione al peso del componente.

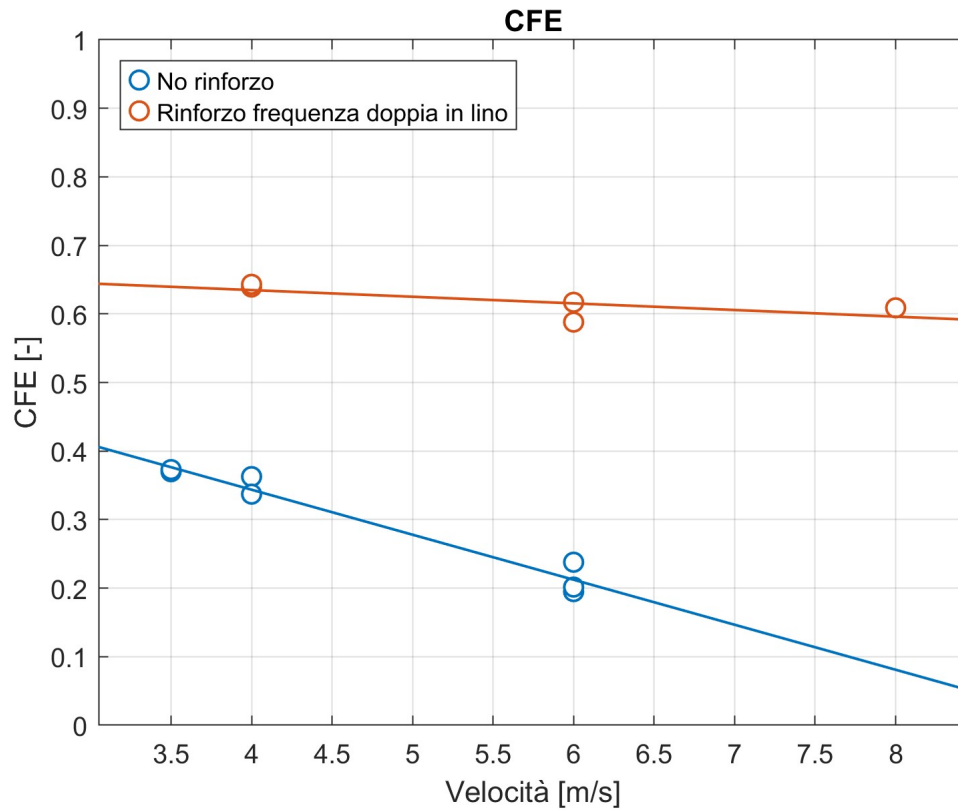


Figura 4.16: Andamento CFE in funzione della velocità nel caso senza rinforzo e nel caso con rinforzo a frequenza doppia in lino.

Per quanto riguarda lo studio del CFE, invece, in entrambi i casi all'aumentare della velocità si ha una diminuzione di tale parametro. Tuttavia, mentre nel caso del rinforzo 2D tale riduzione è particolarmente significativa, con conseguente perdita delle prestazioni all'aumentare della velocità, nel caso di rinforzo 3D la perdita risulta notevolmente più contenuta.

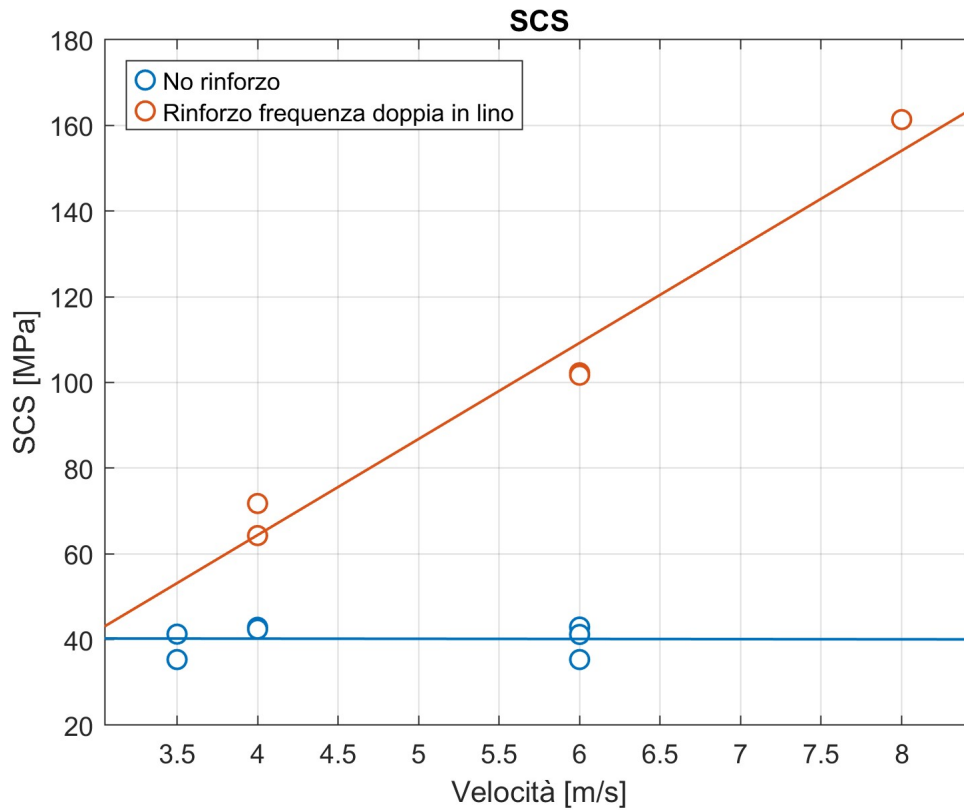


Figura 4.17: Andamento SCS in funzione della velocità nel caso senza rinforzo e nel caso con rinforzo a frequenza doppia in lino.

Tutti questi aspetti sono riassunti in Tabella 4.16 ed evidenziano come effettivamente l'uso di un rinforzo 3D permetta di migliorare le proprietà dinamiche del materiale in relazione all'aumento di peso che ne consegue.

Tessuto	SEA	CFE	SCS
No rinforzo	0.4624	-0.0657	-0.0383
Rinforzo semplice in lino	3.6009	-0.0097	22.4314

Tabella 4.16: Valori pendenze di SEA, CFE e SCS in funzione della velocità per i diversi tessuti.

Capitolo 5

Conclusioni

In questo capitolo vengono sintetizzati i principali risultati conseguiti nell'ambito dell'attività di ricerca. Vengono inoltre analizzate le criticità riscontrate e proposte le linee di sviluppo future utili al proseguimento dello studio.

5.1 Risultati e criticità

5.1.1 Risultati

Nel presente lavoro di tesi è stato analizzato il comportamento dinamico di materiali compositi in fibra di lino con rinforzi tridimensionali. Le fibre usate per i layer sono fibre di lino, mentre per i rinforzi sono state scelte sia fibre di lino che fibre di carbonio.

Lo studio è stato effettuato tramite un banco di prova che permette di impattare il materiale con energie a velocità differenti. Il supporto e la geometria del provino sono stati pensati per sviluppare un preciso modo di rottura del materiale durante la prova. In particolare, è stata analizzata la rottura per splaying. Per prima cosa è stato caratterizzato il materiale senza rinforzo al fine di costituire una base di dati per il confronto con i casi rinforzati. È stata progettata una prima architettura tridimensionale, la quale però metteva poco in evidenza l'effetto del rinforzo. Per tale motivo, sono state ideate altre geometrie al fine di differenziare maggiormente l'effetto dell'aumento del numero di fibre da quello dell'architettura. I provini sono stati ricavati da delle lamine di materiale tramite taglio ad acqua. Le lamine sono state realizzate con il processo di *vacuum bag moulding* e successivamente curate in

un forno.

Sono state analizzate le curve forza-tempo in parallelo con le immagini ricavate grazie all'uso di una telecamera ad alta frequenza di campionamento. Da queste analisi è emerso come, nonostante la presenza del supporto, si presentino comunque modi di rottura differenti da quello voluto. L'analisi a crash dei materiali compositi risulta altamente variabile per via della presenza di numerosi modi di rottura che si possono presentare, anche in un ambiente ben definito come quello di prova. Quindi, il risultato che si ottiene dipende notevolmente dalla scala in cui si vuole osservare il fenomeno, ma è comunque possibile osservare dei trend che caratterizzano le varie tipologie di materiale.

Dalle curve forza-tempo, con i passaggi descritti nel Capitolo 3, è stato possibile ricavare l'energia assorbita da ciascun provino. L'andamento della forza e dell'energia nello spostamento permettono di effettuare un primo confronto tra le tipologie di rinforzo. In particolare, materiali rinforzati presentano oscillazioni minori di forza, che si traducono in un assorbimento di energia più costante. Dall'analisi delle immagini è stato possibile osservare come le soluzioni con rinforzo ostacolano maggiormente l'avanzamento della cricca, favorendo la frammentazione del materiale e quindi l'assorbimento di energia. Tuttavia, non si nota una correlazione tra i punti di fine avanzamento della cricca ai punti in cui la fibra di rinforzo attraversava i layer.

Il confronto fra le varie architetture è stato poi svolto attraverso l'uso di parametri che permettessero di ottenere informazioni sul materiale in sé e non sulla singola prova. Per fare ciò, il primo approccio è stato quello di sfruttare alcune grandezze definite in letteratura che sono la *Specific Energy Absorption*, la *Crash Force Efficiency* ed il *Sustained Crash Stress*. Tali valori permettono un primo confronto evidenziando come architetture con rinforzo 3D offrano prestazioni maggiori. In particolare, il SEA mostra un miglioramento tra circa il 30 % ed il 75 %. Successivamente, sono stati definiti dei nuovi parametri pensati per mettere in evidenza ancora di più l'effetto dell'architettura tridimensionale. Questi hanno permesso di effettuare un'analisi più completa delle proprietà dei materiali, in quanto ogni fattore esprime aspetti differenti. Risulta in quest'ottica particolarmente efficace la soluzione in cui l'attraversamento dei layer da parte del rinforzo avviene con frequenza maggiore.

Infine, è stato studiato l'effetto della velocità di impatto. Il materiale con architettura bidimensionale non risente particolarmente della velocità, ad eccezione del CFE.

Esso infatti presenta una diminuzione significativa all'aumentare della velocità, diminuzione che è molto meno marcata nel caso con rinforzo. Da questo punto di vista il rinforzo 3D si identifica come particolarmente efficace in caso di applicazioni per la sicurezza passiva, poiché presenta picchi di forza minori rispetto al valor medio.

Complessivamente, questo studio ha permesso di approfondire la caratterizzazione dinamica dei materiali compositi, fornendo un riferimento utile per ulteriori studi e per lo sviluppo di modelli numerici.

5.1.2 Criticità

Durante le prove sperimentali sono emerse alcune problematiche legate alla natura dei materiali compositi e ad alcune criticità del banco di prova.

Per prima cosa, la realizzazione dei materiali usati non è stata effettuata con tecniche industriali. Ciò ha portato a disallineamenti impercettibili delle fibre dei vari layer o a piccole irregolarità. A ciò vanno aggiunte anche piccole differenze nella geometria riscontrate dopo il taglio ad acqua. Questi aspetti non sono influenti nel caso di prove statiche, ma fanno sì che in prove dinamiche il risultato dei test possa variare in modo non trascurabile da provino a provino. È stato quindi necessario scartare alcune prove, che non si sono sviluppate con i modi di rottura di interesse.

I diversi rinforzi in fibra di lino sono stati realizzati anche in fibra di carbonio. Tuttavia, tutti i test eseguiti hanno dato un esito negativo ad esclusione di quelli con il rinforzo con frequenza minore. Questo poiché nel momento in cui si va a migliorare notevolmente la resistenza allo splaying del materiale, la rottura sopraggiunge nella parte superiore del provino per buckling. Nel caso di rinforzo in carbonio, quindi, lo spessore ridotto insieme ad un buon aumento delle proprietà di assorbimento dell'energia, portano a rotture non desiderate che rendono la prova non valida. In Figura 5.1 è riportato un provino rotto nella zona superiore.



Figura 5.1: Provino rotto nella zona superiore.

5.2 Possibili sviluppi futuri

Questo studio ha permesso di caratterizzare il comportamento di materiali compositi con particolari rinforzi ancora poco approfonditi in letteratura. Sulla base dei risultati conseguiti, si può intraprendere una campagna di test con un supporto superiore più robusto, in modo da evitare un numero significativo di prove invalidate. In alternativa, si può passare a provini con spessore più elevato al fine di incrementarne la resistenza al buckling.

I risultati quantitativi ottenuti possono costituire una base per tarare un modello numerico che permetta di prevedere l'effetto di una determinata geometria di rinforzo, senza la necessità di ricorrere sistematicamente a prove sperimentali.

Bibliografia

- [1] Hull, D., 1988; *An Introduction to Composite Materials*. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK.
- [2] Mikko Hokka; *Dynamic Behavior of Materials: Fundamentals, Material Models, and Microstructure Effects*.
- [3] L. Tong, A.P. Mouritz and M.K. Bannister; *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*.
- [4] Gay D., Hoa S.V.; *Composite materials : design and applications*.
- [5] De Luca A., Caputo F., Department of Industrial and Information Engineering, University of Campania L. Vanvitelli; *A review on analytical failure criteria for composite materials*.
- [6] Shen Z, Zhou H (2017); *Mechanical and electrical behavior of carbon fiber structural capacitors: Effects of delamination and interlaminar damage. Compos Struct 166: 38–48*.
- [7] Tarpani JR, Milan MT, D S, Bose W. (2006); *Mechanical performance of carbon-epoxy laminates Part II: quasi-static and fatigue tensile properties. Mater Res 9 (2): 121–130*.
- [8] de Paiva JMF, Mayer S, Rezende MC (2003); *Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. Mater Res 8 (1): 91–97*.
- [9] Tsai SW (1965); *Strength Characteristics of Composite Materials. NASA CR-224*.
- [10] Hoffman O (1967); *The Brittle Strength of Orthotropic Materials. J Compos*

Mater 1: 200–206.

- [11] Cowper GR, Symonds PS (1957), Brown University, DTIC R28; *Strain hardening and strain rate effect in the impact loading of cantilever beams.*
- [12] Yen CF (2002), Proceedings of the 7th international LS-DYNA Users conference. Dearborn, Michigan; *Ballistic impact modeling of composite materials.*
- [13] De Luca A, Di Caprio F, Milella E, et al. (2017); *On the Tensile Behaviour of CF and CFRP Materials under High Strain Rates. Key Eng Mater 754: 111–114.*
- [14] Lukaszewicz DH -J. A (2013); *Automotive Composite Structures for Crashworthiness.* In: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK; Elmarakbi A (ed) *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness, pp 99–127.*
- [15] Farley GL, Jones RM (1989), NASA Technical Memorandum 101634; *Energy-Absorption Capability of Composite Tubes and Beams.*
- [16] Hull D (1991), Compos Sci Technol 40; *A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre- Reinforced Composite Tubes.*
- [17] Vigna L (2023), Doctoral Program in Mechanical Engineering (35th Cycle), Politecnico di Torino; *Development of an innovative procedure to assess the crashworthiness of composite materials.*
- [18] Feraboli P, Wade B, Deleo F, Rassaian M (2009); *Composites : Part A Crush energy absorption of composite channel section specimens.* Compos Part A 40:1248–1256. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.05.021>.
- [19] Edited by Sanjay M. Rangappa, Dipen Kumar Rajak, and Suchart Siengchin; *Natural and Synthetic Fiber Reinforced Composites: Synthesis, Properties, and Applications. Cap. 5: pp. 81-89.*
- [20] Harish, S., Michael, D.P., Bensely, A. et al. (2009); *Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite. Materials Characterization 60 (1): 44–49.*
- [21] Abilash, N. and Sivapragash, M. (2016); *Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite. Journal of King Saud University,*

- Engineering Sciences 28: 92–102.*
- [22] Ashori, A. Bioresour. Technol. (2008); *Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!*.
- [23] Kumar, R.; Haq, M.I.U.; Raina, A.; Anand, A. (2018); *Industrial applications of natural fibre-reinforced polymer composites—Challenges and opportunities.*
- [24] Adekomaya, O. (2020); *Adaption of green composite in automotive part replacements: Discussions on material modification and future patronage.*
- [25] Aisyah, H.A.; Paridah, M.T.; Sapuan, S.M.; Ilyas, R.A.; Khalina, A.; Nurazzi, N.M.; Lee, S.H.; Lee, C.H. (2021); *A Comprehensive Review on Advanced Sustainable Woven Natural Fibre Polymer Composites.*
- [26] Holbery J., Houston D. (2006); *Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications.*
- [27] Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., Arora S. (2004); *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?.*
- [28] Hammad A, Gyan C-S, Kasun H and Rehan S. (2022); *A Comprehensive Review on Construction Applications and Life Cycle Sustainability of Natural Fiber Biocomposites.*
- [29] Adekomaya, O.; Jamiru, T.; Sadiku, R.; Huan, Z. (2016); *A review on the sustainability of natural fiber in matrix reinforcement—A practical perspective. J. Reinf. Plast. Compos. 35, 3–7.*
- [30] Vishnu Prasad, Amal Alliyankal V, Thomasukutty J and Soney C. George. (2024); *A Comprehensive Review of Sustainability in Natural-Fiber-Reinforced Polymers.*
- [31] A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, K.H. Leong (1999); *Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites.*
- [32] F. Ko, D. Hartman (1986); *Impact behaviour of 2D and 3D glass–epoxy composites.*
- [33] E.D. Reedy, T.R. Guess (1986); *Additional comparisons of interlocked fabric and laminated fabric Kevlar 49/epoxy composites.*

- [34] S. Chou, H.C. Chen, C.C. Wu (1992); *BMI resin composites reinforced with 3D carbon-fibre fabrics*.
- [35] S. Voss, A. Fahmy, H. West (1993); *Impact tolerance of laminated and 3-dimensionally reinforced graphite-epoxy panels*.
- [36] B.N. Cox, M.S. Dadkhah, W.L. Morris (1996); *On the tensile properties of 3D woven composites*.
- [37] Instron (2025); *Support for dynamic crashworthiness testing*, Operating Instructions C-DCP135085-ADD-EN rev. A Support for dynamic crashworthiness testing.
- [38] *Flax Fibres FLAXDRY-BL200.*, Disponibile online: <https://eco-technilin.com/en/flaxdry/52-L-FLAXDRY-BL200-30.html> (accesso: 6 Dicembre 2023).
- [39] Easy Composites Ltd. *450g 2x2 Twill 12k Carbon Fibre Cloth*, Disponibile online: <https://www.easycomposites.co.uk/450g-22-twill-12k-carbon-fibre-cloth> (accesso: 6 Luglio 2025).
- [40] Bcomp Ltd. *ampliTex[®] 5009 – Product Data Sheet*. Disponibile online: <https://www.bcomp.ch> (accesso: 6 Luglio 2025).
- [41] Easy Composites Ltd. *IN2 Epoxy Infusion Resin*. Disponibile su: <https://www.easycomposites.eu/in2-epoxy-infusion-resin> (accesso: 6 Luglio 2025).
- [42] Cambridge University, GRANTA CES Edupack (2009). *Material and process selection charts, Vol. 2*.
- [43] Neale G., Yoo S., Dahale M., McGarrigli C., (2019). *ENERGY ABSORPTION MECHANISMS IN LAYER-TO-LAYER 3D WOVEN COMPOSITES*.
- [44] Neale G., Yoo S., Dahale M., McGarrigli C., (2020). *Improved crush energy absorption in 3D woven composites by pick density modification*.