

Politecnico di Torino

Corso di laurea magistrale in ingegneria meccanica
Indirizzo Additive Manufacturing



Tesi di laurea magistrale

**Provini in struttura lattice realizzati
mediante fabbricazione additiva:
Simulazione di prove statiche e di
impatto e validazione sperimentale**

Relatore

Prof. Andrea Tridello

Co-Relatore

Prof. Davide Paolino

Co-Relatore

Ing. Giulio Turinetti

Candidato

Mariano Della Ripa – 255274

Anno Accademico 2020 – 2021

*A nonno Angelo,
che mi ha insegnato molto
e ha sempre creduto in me.*

Ringraziamenti

Questa tesi è stato il frutto, non solo del lavoro svolto negli ultimi mesi, ma di tutto il mio percorso all'interno dell'università. In primo luogo vorrei ringraziare il professor Tredello e il professor Paolino che, nonostante questo periodo di pandemia, mi hanno dato la possibilità di poter realizzare una tesi sperimentale, andando incontro a tutte le difficoltà che in questo anno ci troviamo ad affrontare. Per portare a termine questo lavoro è stato fondamentale il sostegno dell'azienda Altair engineering che mi ha supportato tecnicamente su tutta la parte di modellizzazione dei test, in particolare voglio ringraziare Giulio, Carlo, Alessandro e Francesco.

In tutto il percorso di studi ho avuto la fortuna di incontrare molti amici, la maggior parte li ho conosciuti all'interno del Team H2politO, con loro ho affrontato i momenti più belli della mia carriera universitaria per questo ci tengo moltissimo a ringraziare tutti i ragazzi del team ma in particolare Pietro C., Alessandro, Luca, Marco A., Pietro P, Michele, Giuseppe B., Giuseppe L.R. e Davide.

Se sono arrivato a questo punto devo ringraziare Teresa, insieme siamo riusciti ad arrivare a questo importante traguardo. Nei momenti più difficili ho sempre trovato il suo sostegno e in quei attimi di sconforto ha sempre trovato il modo per motivarmi. Infine devo ringraziare tutta la mia famiglia che ha creduto in me fin dall'inizio. Li ringrazio per avermi dato questa possibilità e per avermi sostenuto economicamente in questi anni.

Abstract

Lo scopo di questa tesi è quello di studiare le strutture lattice, sia nel campo quasi-statico sia in quello dinamico. Questo studio è propedeutico per l'analisi di una crash box realizzata con una struttura lattice. L'idea di progettare una crash box utilizzando strutture lattice, nasce con l'obiettivo di massimizzare l'energia assorbita a parità di ingombri del componente. Come primo step, si è condotta una ricerca bibliografica circa le diverse tipologia di celle lattice e si è andati a selezionare le geometrie sulle quali, successivamente, si sono effettuati i test di compressione quasi-statica e drop-test. I test di compressione sono stati utili a comprendere, tra tutte le celle studiate, quale era la più performante per questa applicazione. Infine, dopo aver selezionato la cella migliore e validato il modello FEA sul polimero, sono stati effettuati i test di crash, sia su polimero sia su alluminio, finalizzati a valutare l'assorbimento dell'energia in campo dinamico.

Indice

Ringraziamenti	v
Abstract	vii
Indice	x
Elenco delle figure	xiii
Elenco delle tabelle	xv
1 Introduzione	1
1.1 Additive manufacturing	1
1.2 Struttura lattice	3
2 Studio geometria provino	5
2.1 Ricerca celle lattice	5
2.2 Geometria provino	6
3 Compressione su polimero	11
3.1 Test sperimentali su polimero	11
3.1.1 Test su provino E_01_02_01	14
3.1.2 Test su provino E_01_03_01	15
3.1.3 Test su provino E_01_04_01	17
3.1.4 Test su provino E_01_07_01	18
3.1.5 Test su provino E_01_08_01	20
3.2 Scelta cella lattice	22
3.3 Modello FEA	24
3.3.1 Costruzione del modello FEA	24
3.3.2 Validazione del modello FEA	29
4 Compressione su alluminio	33
4.1 Test sperimentali	34
4.2 Modello FEA	37
4.2.1 Validazione del modello FEA	40
5 Drop-Dart Test	43

5.1	Test sperimentali: validazione del sistema di prova	48
5.2	Drop Dart test su provini in AlSi10Mg	50
5.2.1	Drop-dart test a 3 m/s	50
5.2.2	Drop-dart test a 2.2 m/s	54
5.2.3	Valutazione dell'effetto di strain-rate	58
5.3	Modello FEA: test d'impatto	58
5.3.1	Validazione modello FEA: test d'impatto	63
5.4	Considerazioni conclusive sul modello FEA	65
	Conclusioni	69

Elenco delle figure

Figure 1.1	Tecniche di fabbricazione additiva per materiali metallici . . .	2
Figure 1.2	Tecniche di fabbricazione additiva per materiali polimerici . . .	2
Figure 1.3	Classificazione delle strutture lattice [8]	3
Figure 2.1	Cella: 02-01, 03-01, 04-01, 07-01, 08-01 (da Dx a Sx)	5
Figure 2.2	Grafico comparazione provini con diverso numero di layer [4] .	7
Figure 2.3	Comparazione rottura di provini con diverso numero di layer [4]	8
Figure 2.4	Rottura provino classico sottoposto a compressione [7]	8
Figure 2.5	Geometria provino	9
Figure 3.1	Immagini catturate al microscopio elettronico a scansione sui provini	11
Figure 3.2	Parametri di stampa utilizzati per la produzione dei provini .	12
Figure 3.3	Grafico Forza-Spostamento con fenomeno della densificazione .	13
Figure 3.4	Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_02_01	14
Figure 3.5	Seguenza di rottura provino E_01_02_01	15
Figure 3.6	Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_03_01	16
Figure 3.7	Seguenza di rottura provino E_01_03_01	17
Figure 3.8	Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_04_01	17
Figure 3.9	Seguenza di rottura provino E_01_04_01	18
Figure 3.10	Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_07_01	19
Figure 3.11	Seguenza di rottura provino E_01_07_01	19
Figure 3.12	Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_08_01	21
Figure 3.13	Seguenza di rottura provino E_01_08_01	21
Figure 3.14	Istogramma con valori del SEA e della Forza	22
Figure 3.15	Istogramma con valori dell'energia e della Forza	23
Figure 3.16	Confronto delle modalità di rottura dei provini	23
Figure 3.17	Modelizzazione dell'elemento beam in Radioss	24
Figure 3.18	Modello FEA per test di compressione su polimero	25
Figure 3.19	Curva sforzo-deformazione ingegneristica del Carbon-Nylon . .	26

Figure 3.20	Curva sforzo-deformazione reale del Carbon-Nylon	27
Figure 3.21	Curva sforzo-deformazione importata sul software radioss	27
Figure 3.22	Parametri impostati per la creazione della proprietà P18	28
Figure 3.23	Parametri per il calcolo dei punti di integrazione della sezione	29
Figure 3.24	Forza-Spostamento e SEA-Spostamento modello FEA	30
Figure 3.25	Confronto andamento Forza-Spostamento del modello con i test sperimentali	30
Figure 3.26	Confronto deformata tra modello e test	31
Figure 4.1	Provino E_01_04_01 realizzato in alluminio	33
Figure 4.2	Forza-Spostamento e Energia-Spostamento del test 1 sul provino E_01_04_01 in alluminio	34
Figure 4.3	Forza-Spostamento completa del test 2 sul provino E_01_04_01 in alluminio	35
Figure 4.4	Forza-Spostamento e Energia-Spostamento del test 2 sul provino E_01_04_01 in alluminio	35
Figure 4.5	Rottura dei provini dopo i test	36
Figure 4.6	Immagini catturate con microscopio elettronica a scansione sulla faccia alta del provino	38
Figure 4.7	Immagini catturate con microscopio elettronica a scansione sulla faccia laterale del provino	38
Figure 4.8	Tratto plastico della curva sforzo-deformazione reale dell'AlSi10Mg	39
Figure 4.9	Andamento forza-spostamento del modello FEA senza un criterio di rottura	40
Figure 4.10	Confronto andamento Forza-Spostamento risultati FEA con test sperimentali	41
Figure 4.11	Confronto andamento Energia-Spostamento risultati FEA con test sperimentali	41
Figure 5.1	Macchinario CEAST 9350 per drop-dart test	43
Figure 5.2	Sistema di afferraggio del provino nel macchinario CEAST 9350	44
Figure 5.3	CAD base e impattatore progettati per i drop-dart test	45
Figure 5.4	Impattatore utilizzato durante i drop-dart test.	45
Figure 5.5	Tavola utilizzata per la realizzazione della base.	46
Figure 5.6	Tavola utilizzata per la realizzazione dell'impattatore.	47
Figure 5.7	Tavola utilizzata per la realizzazione dell'adattatore.	47
Figure 5.8	Forza-Spostamento drop-dart test 1 su carbon-nylon.	49
Figure 5.9	Forza-Spostamento drop-dart test 2 su carbon-nylon.	49
Figure 5.10	Forza-Spostamento drop-dart test 1 su AlSi10Mg.	51
Figure 5.11	Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 1 su AlSi10Mg.	52
Figure 5.12	Rottura del provino utilizzato nel test 1	52
Figure 5.13	Forza-Spostamento drop-dart test 2 su AlSi10Mg.	53

Figure 5.14 Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 2 su AlSi10Mg.	53
Figure 5.15 Rottura del provino utilizzato nel test 2	54
Figure 5.16 Forza-Spostamento drop-dart test 3 su AlSi10Mg.	55
Figure 5.17 Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 3 su AlSi10Mg.	55
Figure 5.18 Rottura del provino utilizzato nel test 3	56
Figure 5.19 Forza-Spostamento drop-dart test 4 su AlSi10Mg.	56
Figure 5.20 Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 4 su AlSi10Mg.	57
Figure 5.21 Rottura del provino utilizzato nel test 4	57
Figure 5.22 Forza-Spostamento dei 6 test: 4 dinamici e 2 quasi-statici. . .	58
Figure 5.23 Modello FEA drop-dart test	59
Figure 5.24 Esempio di modellizzazione dello strain-rate in radios	60
Figure 5.25 Parametri inseriti per modellizzare l'effetto dello strain-rate . .	60
Figure 5.26 Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 1	61
Figure 5.27 Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 2	61
Figure 5.28 Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 1	62
Figure 5.29 Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 2	63
Figure 5.30 Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 3	63
Figure 5.31 Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 4	64
Figure 5.32 Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 3	64
Figure 5.33 Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 4	65
Figure 5.34 Dettaglio della manzanza dell'effetto della densificazione . . .	66
Figure 5.35 Dettaglio sulla differenza dello spostamento a fine test	67

Elenco delle tabelle

Table 3.1	Risultati dei due test sul provino E_01_02_01	15
Table 3.2	Risultati dei due test sul provino E_01_03_01	16
Table 3.3	Risultati dei due test sul provino E_01_04_01	18
Table 3.4	Risultati dei due test sul provino E_01_07_01	20
Table 3.5	Risultati dei due test sul provino E_01_08_01	20
Table 3.6	Dati Carbon Nylon	26
Table 3.7	Risultati dei due test e del modello sul provino E_01_04_01 .	31
Table 4.1	Dati AlSi10Mg	33
Table 4.2	Risultati dei due test sul provino E_01_04_01 in alluminio . .	36
Table 4.3	Risultati sperimentali e del modello sul provino E_01_04_01 in AlSi10Mg	42
Table 5.1	Dati iniziali dei drop-dart test su privini in AlSi10Mg	50
Table 5.2	Risultati dei drop dart test 1 e 2	51
Table 5.3	Risultati dei drop dart test 3 e 4	54

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Additive manufacturing

La fabbricazione additiva è una tecnica di produzione caratterizzata dalla costruzione del componente attraverso l'aggiunta di layer di materiale. Si tratta di una netta inversione di tendenza rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali, le quali prevedono l'asportazione di materiale partendo da geometrie standard (parallelepipedi, barre, lastre, ecc.), come avviene ad esempio con la fresatura o la tornitura.

Nella prima parte del processo di fabbricazione additiva, è necessario preparare il modello di stampa: infatti, il modello 3D dell'oggetto viene esportato in formato STL, il quale prevede l'approssimazione delle superfici del componente mediante triangoli. In seguito, viene impostata, grazie all'utilizzo di software specifici spesso associati ai macchinari di produzione, la messa in macchina del componente, considerando tutti gli aspetti del processo. Tralasciando, quindi, il posizionamento ottimale del componente in macchina, si procede alla fase di "slicing", nella quale il componente viene suddiviso in strati che rappresentano la stratificazione reale del pezzo durante il processo di stampa. Sui componenti realizzati in materiali metallici, dopo la realizzazione tramite questa tecnologia, è opportuno effettuare dei trattamenti termici specifici per poter ottenere delle proprietà meccaniche accettabili, in quanto il componente appena realizzato presenta elevate tensioni residue che potrebbero compromettere il corretto funzionamento. Realizzare componenti tramite la fabbricazione additiva permette di ottenere molti vantaggi. Di seguito vengono riportati i punti di forza di questa tecnologia:

- Minimizzare la massa del componente, grazie alla possibilità di poter aggiungere materiale solo nelle parti in cui è necessario per garantirne l'integrità strutturale (per esempio utilizzando algoritmi di ottimizzazione topologica);
- Realizzare canali interni nel componente;
- Massima personalizzazione dell'oggetto;
- Possibilità di ottimizzare gli assiemi riducendo il numero di componenti.

La fabbricazione additiva racchiude molte tecniche di produzione, differenziate sia per il processo sia per i tipi di materiali utilizzati. Nella Figura 1.1 vengono riportate le tecniche attualmente esistenti per i materiali metallici, a loro volta suddivise in funzione della tipologia di materia prima utilizzata (polvere e solido). Invece, nella Figura 1.2 viene riportata la suddivisione delle tecnologie utilizzate per materiali polimerici, secondo le stesse considerazioni fatte per i materiali metallici.

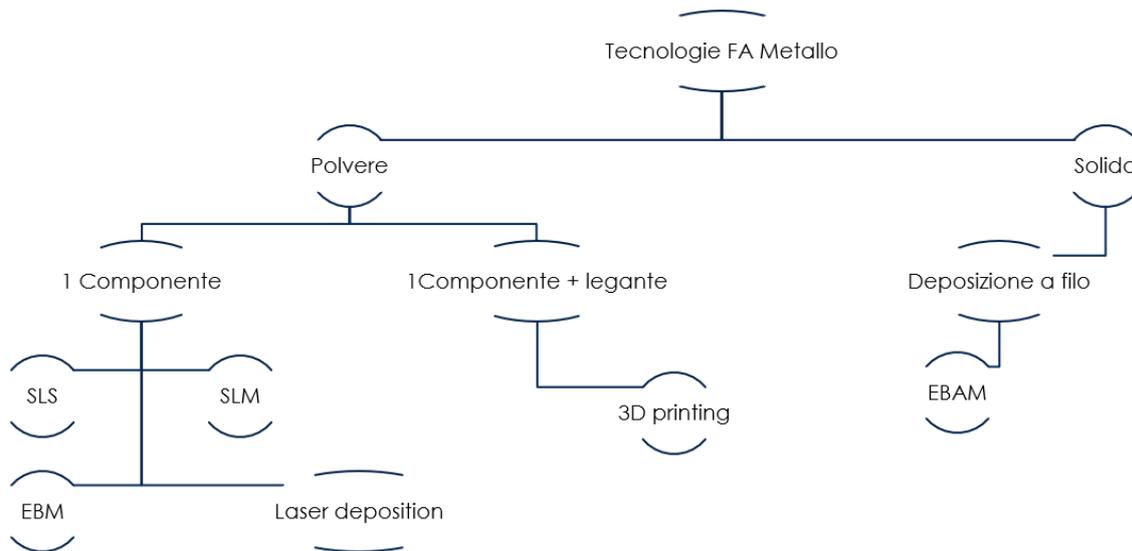


Figura 1.1. Tecniche di fabbricazione additiva per materiali metallici

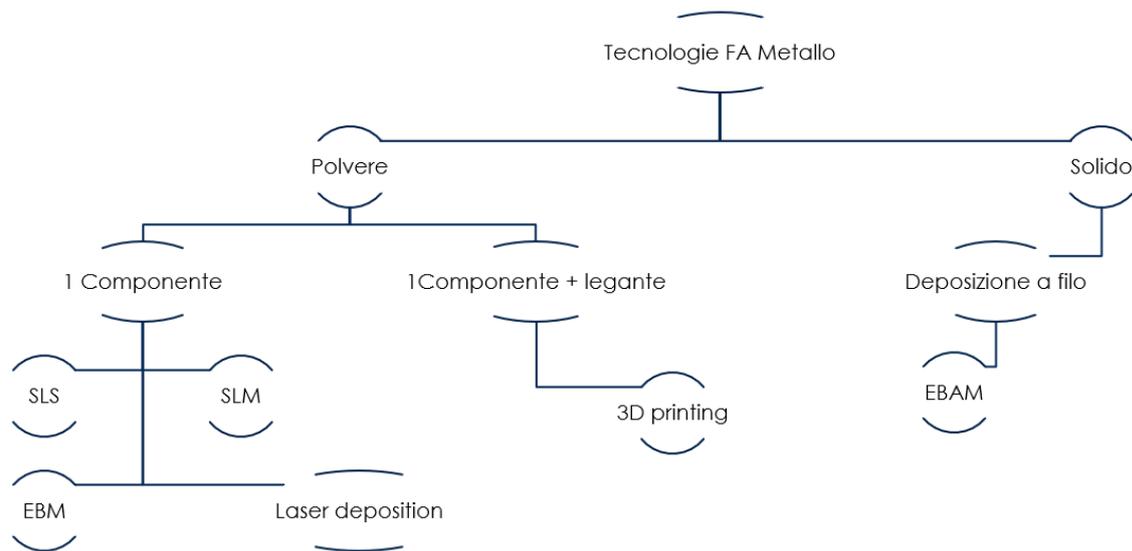


Figura 1.2. Tecniche di fabbricazione additiva per materiali polimerici

1.2 Struttura lattice

L'utilizzo dell'additive manufacturing permette la fabbricazione di strutture resistenti e leggere con geometrie complesse, come le strutture lattice, non producibili utilizzando tecnologie tradizionali. Questa tipologia di struttura tridimensionale è composta da celle aperte topologicamente ordinate, composte da una o più celle unitarie ripetute. Queste ultime vengono definite dalle dimensioni e dalla connettività dei loro elementi costitutivi, i quali sono collegati a nodi specifici. Modificando i parametri del reticolo, come la topologia delle celle, la dimensione delle celle e le dimensioni dei montanti, la risposta fisica di queste strutture può essere significativamente migliorata per ottenere proprietà irraggiungibili dai loro materiali di partenza, comprese le proprietà meccaniche.

Le strutture reticolari vengono classificate, in funzione della disposizione delle celle unitarie, in strutture reticolari casuali e strutture reticolari periodiche. Nello studio *"Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis"* [2] viene descritta la classificazione delle strutture reticolari in dettaglio, suddividendole in tre categorie. Alla prima categoria appartengono le strutture reticolari casuali o disordinate (come mostrato nella Figura 1.3a). Le celle unitarie delle strutture reticolari casuali sono distribuite in modo random nello spazio di progettazione e sono costituite da diverse strutture topologiche e di diverse dimensioni. La seconda categoria, invece, è quella delle strutture reticolari periodiche. Questa tipologia è caratterizzata dalla disposizione periodica ripetuta di celle con una certa forma, topologia e dimensione nello spazio (come mostrato nella Figura 1.3b). Infine, al terzo tipo appartengono le strutture reticolari pseudo periodiche, chiamate anche strutture reticolari conformali. In questa categoria ogni cella unitaria è caratterizzata dalla stessa topologia, ma da dimensione diversa (come mostrato nella Figura 1.3c) [8].

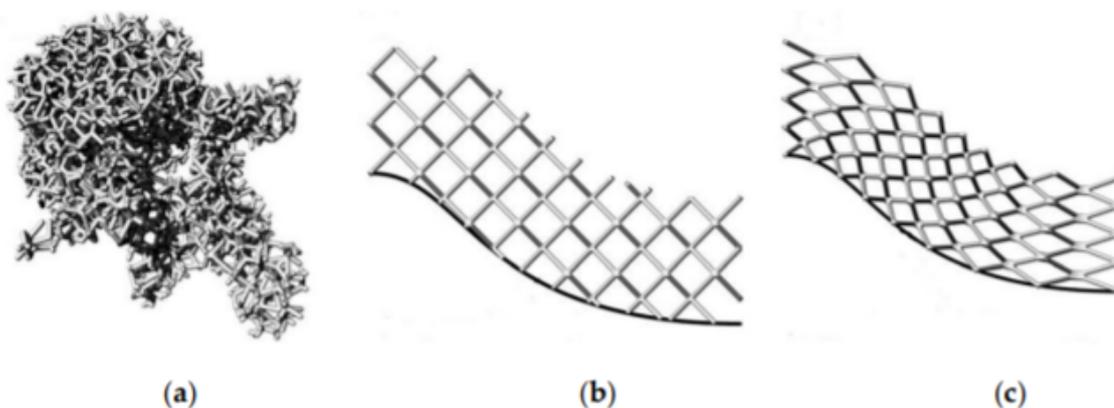


Figura 1.3. Classificazione delle strutture lattice [8]

Durante lo studio condotto in questa tesi si è analizzata, come struttura di riferimento, la seconda categoria, caratterizzata da celle uniformi per topologia e dimensioni, disposte in modo ordinato.

La realizzazione delle strutture lattice, tramite la tecnologia dell'additive manufacturing, permette di integrare tali strutture all'interno di un componente. Questa soluzione porta ad avere vantaggi, oltre che sulle proprietà meccaniche e fisiche del componente anche sul processo di produzione, minimizzando il materiale utilizzato, l'energia e i tempi di processo.

Infatti, lo scopo del seguente studio è quello di analizzare il comportamento di queste strutture tramite test sperimentali. I risultati delle prove serviranno per valutare le strutture più performanti in modo da poterle utilizzare nei futuri studi. Inoltre, la validazione dei modelli FEA permetterà di valutare, senza eseguire test sperimentali, il comportamento di componenti più complessi in cui sono presenti le strutture studiate in questa tesi.

Capitolo 2

Studio geometria provino

L'iter seguito in questa prima fase di studio prevede la selezione mediante ricerca bibliografica, delle varie tipologie di celle più comunemente utilizzate in letteratura. Successivamente, è stata scelta la geometria dei provini più opportuna in funzione delle proprietà meccaniche richieste.

2.1 Ricerca celle lattice

La selezione delle celle è stata fatta analizzando le celle comunemente utilizzate in letteratura.

Uno dei primi studi presi in analisi è quello svolto direttamente da Altair Engineering. In questo studio, sono stati analizzati sia diverse configurazioni di celle sia diverse geometrie di crash box. Altre strutture sono state scelte dai seguenti studi: "*Design and optimization of crashworthy components based on lattice structure configuration*" [3] e "*Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology*" [6]. In ogni studio viene scelta una specifica cella in base all'esigenza e alla tecnica di produzione. Quindi, incrociando i vari studi sono state selezionate 5 celle riportate in Figura 2.1 con l'obiettivo di massimizzare l'assorbimento dell'energia.

A tal fine, durante l'analisi si è valutata l'energia assorbita per unità di volume. Oltre



Figura 2.1. Cella: 02-01, 03-01, 04-01, 07-01, 08-01 (da Dx a Sx)

a questo parametro, sono state prese in considerazione anche tutte le altre proprietà meccaniche, tenendo conto del materiale trattato nello studio di riferimento. Infine, si è valutata anche la densità del reticolo, affinché il risultato finale massimizzi l'energia

assorbita con riduzione del peso complessivo.

Nello studio "*Design and optimization of crashworthy components based on lattice structure configuration*" [3] sono state analizzate 10 diverse strutture realizzate in AlSi-12 tramite la tecnologia SLM. Combinando le considerazioni fatte in precedenza con i risultati ottenuti e riportati nell'articolo [3], è stata selezionata la cella "octet", che in questa tesi, per semplicità, viene denominata cella 04-01. Quest'ultima rappresenta la struttura più diffusa tra gli studi condotti in questo ambito. A partire dalla cella 04-01, è stata disegnata sia la cella 07-01 sia la 02-01. Queste ultime differiscono dalla prima per la loro struttura interna, in quanto si è andati a modificare la disposizione dei beam interni alla cella. Invece, la struttura 03-01, è stata disegnata modificando radicalmente la cella 04-01, eliminando completamente i beam interni e inserendo beam verticali ai quattro spigoli della cella. Per poter diversificare le tipologie di cella, sempre restando in strutture inscritte in un cubo, dallo studio [6] si è scelto di analizzare la cella 08-01, selezionata per la sua bassa densità reticolare. Tutte le celle citate finora sono state ridisegnate con i seguenti parametri:

- Lato del cubo di 8.5 mm
- Sezione circolare dei beam
- Diametro beam 1.5 mm.

Queste caratteristiche sono state scelte sia tenendo conto degli studi precedentemente citati, sia pensando alla tecnologia di produzione utilizzata successivamente per i provini. Infatti, avendoli realizzati tramite la tecnologia FDM è stato necessario tener conto del diametro minimo che era possibile stampare con tale tecnologia, per ottenere un risultato con una qualità accettabile. Quindi, per scegliere il diametro ottimale del beam, sono stati condotti vari test di stampa con diverse orientazioni e successivamente è stata analizzata la qualità di stampa al microscopio.

2.2 Geometria provino

Dopo aver stabilito le diverse celle lattice da analizzare, si è passati alla definizione della geometria del provino. Per poter studiare e confrontare le varie strutture lattice, si sono effettuati dei test di compressione con "Zwick-Roell Z100". Dato che lo scopo di questa prima parte dello studio è quello di confrontare le diverse strutture e trovare la cella ottimale per il caso di questa tesi, si è optato per produrre i provini in materiale polimerico, più precisamente in Carbon Nylon. Questa scelta è stata fatta considerando sia i tempi di produzione più rapidi sia i costi minori rispetto alla produzione in materiale metallico. Quindi, tenendo in considerazione la tipologia di test e il materiale dei provini, si è definita la geometria ottimale.

Le prime considerazioni per la definizione della geometria del provino (per esempio, scelta del numero di layer) sono state tratte dallo studio "*Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and*

μ-CT-based finite element analysis" [4], nel quale viene analizzata l'influenza del numero di layer di una struttura lattice durante i test di compressione. I test sono stati effettuati su strutture con uno, tre, cinque e sette layer. Per le strutture a tre strati è stato evidenziato un danno layer per layer: questo ha portato ad ottenere una curva stress-strain con vari picchi, ed a differenza della curva del provino a singolo layer, si nota una diminuzione drastica della forza massima raggiunta inizialmente. Invece, per i provini a cinque e sette layer si è osservata una linea di danneggiamento a 45° durante la fase iniziale di compressione, dovuta all'instabilità della struttura che induce una deformazione di taglio. Continuando la compressione, si è osservata una rottura mista di compressione e taglio. Questo ha portato ad ottenere un grafico stress-strain con molteplici picchi. Inoltre, si è notata una diminuzione del modulo elastico all'aumentare del numero di layer [7]. Il comportamento riscontrato sulle strutture a cinque e sette strati è molto simile al quello che si riscontra su provino metallico classico sottoposto a compressione Figura 2.4.

Nella Figura 2.2, viene riportato il grafico ottenuto durante i test sui provini con diverso numero di layer. Invece nella Figura 2.3 viene riportato il confronto del tipo di rottura, precedentemente descritto, per i diversi tipi di provino. Le relative immagini corrispondono al momento in cui $\varepsilon = 0.2$.

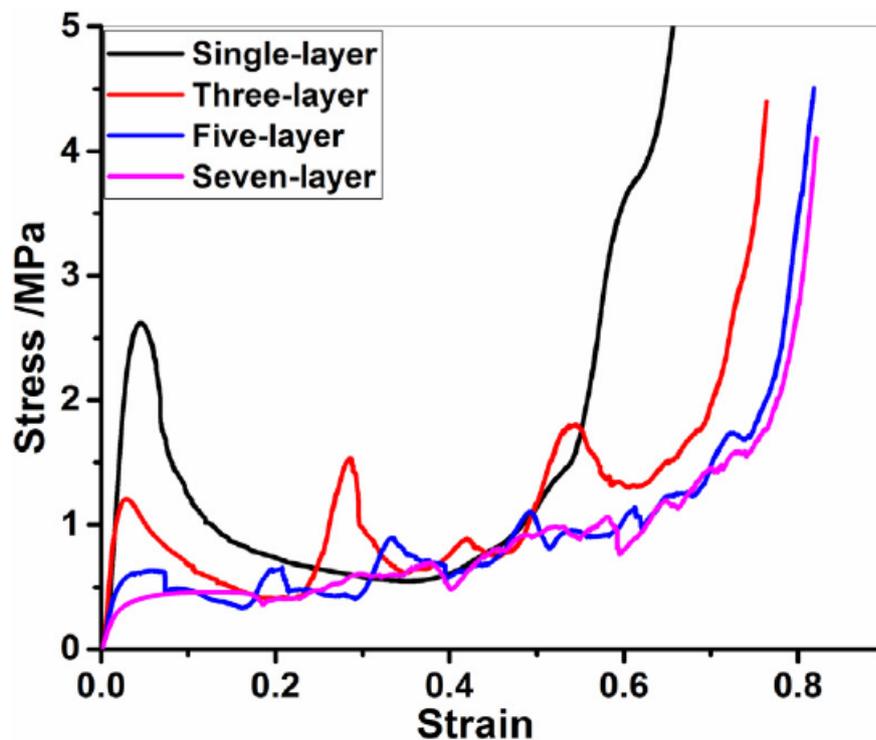


Figura 2.2. Grafico comparazione provini con diverso numero di layer [4]

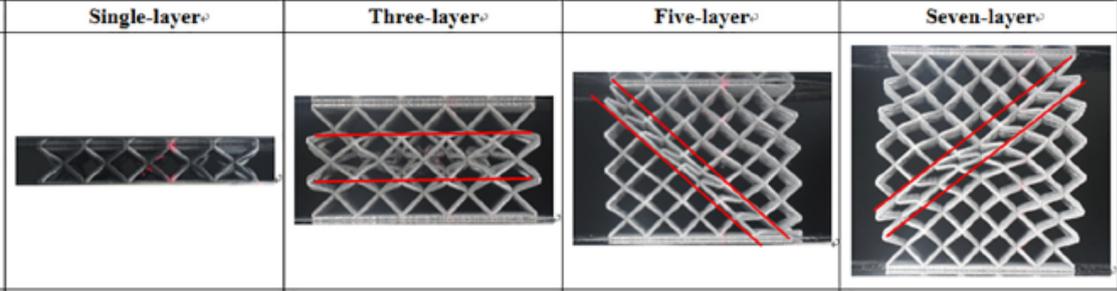


Figura 2.3. Comparazione rottura di provini con diverso numero di layer [4]



Figura 2.4. Rottura provino classico sottoposto a compressione [7]

In funzione dei risultati analizzati, si è scelto di utilizzare un provino con tre layer, in modo da poter studiare il comportamento della cella nel caso di pura compressione e quindi non introducendo fattori dovuti alla deformazione di taglio. Inoltre, si è scelto di avere un provino cubico, quindi è stato disegnato disponendo tre celle per ogni lato, così ottenendo un cubo di 27mm per lato. Un'ultima considerazione fatta su questa geometria è quella di non introdurre alcun piano nella parte superiore ed inferiore del provino, in modo da non ottenere una struttura sandwich. Tutte queste scelte sono state fatte per introdurre meno fattori possibili che influenzassero l'analisi dei test e ottenere, quindi, risultati finali riguardanti solamente la struttura lattice.

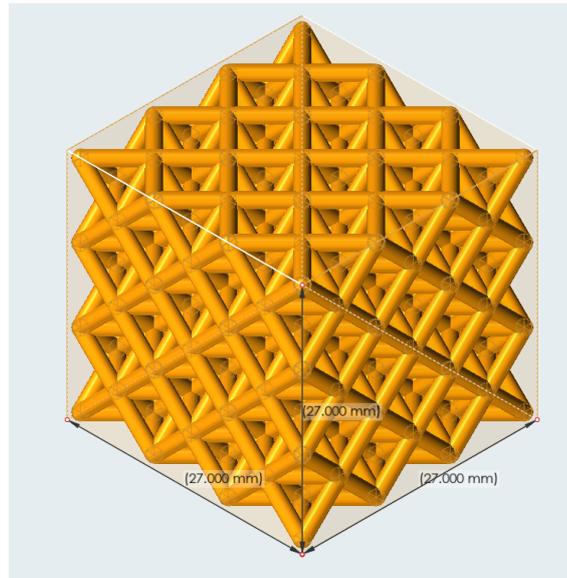


Figura 2.5. Geometria provino

Capitolo 3

Compressione su polimero

Dopo la definizione della geometria del provino, sono stati eseguiti i test con provini in materiale polimerico, per la precisione in Carbon-Nylon. Sono stati effettuati due test per ogni tipologia di cella e in seguito, analizzando i risultati, è stato possibile determinare la cella più efficiente per il caso analizzato. Con la cella selezionata è stato costruito un modello FEA, il quale è stato validato confrontando i risultati sperimentali con quelli numerici.

3.1 Test sperimentali su polimero

La realizzazione dei provini in Carbon-Nylon è stata fatta utilizzando la stampante Ultimaker s5. Per tutti i provini sono stati usati gli stessi parametri di stampa, riportati in Figura 3.2 , in modo da eliminare qualsiasi variabile dovuta al processo che potesse influenzare i risultati sperimentali.

In Figura 3.1 si riportano le immagini ottenute con il microscopio elettronico a scansione, per controllare la qualità di stampa.

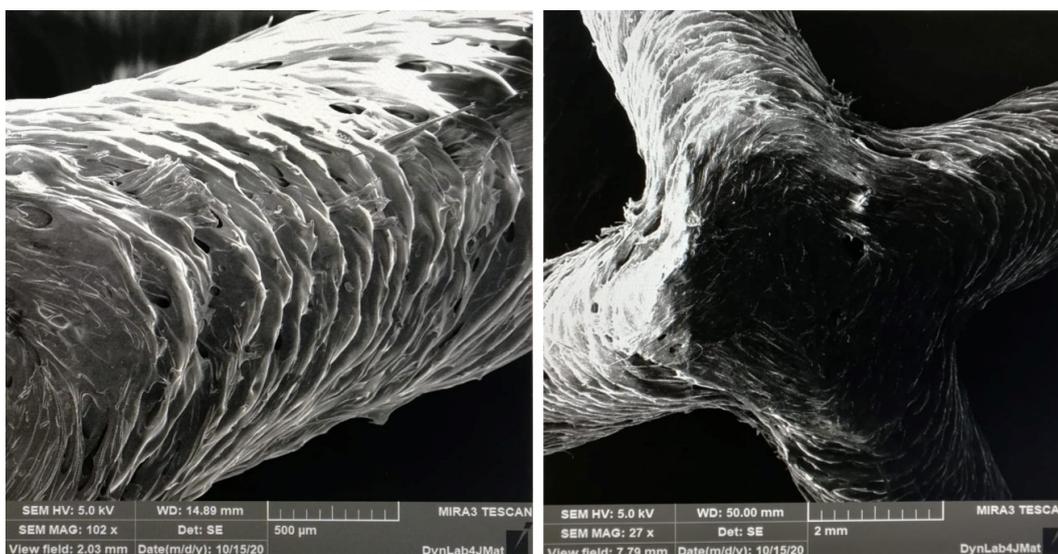


Figura 3.1. Immagini catturate al microscopio elettronico a scansione sui provini

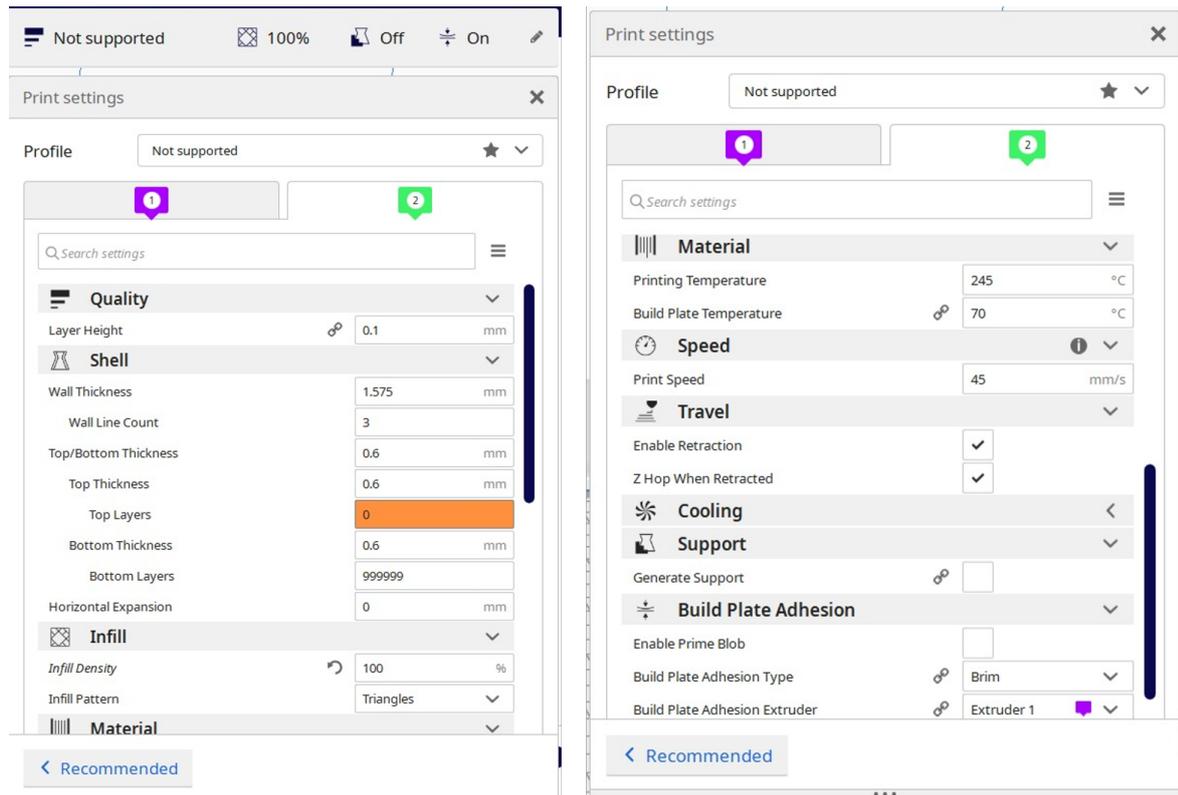


Figura 3.2. Parametri di stampa utilizzati per la produzione dei provini

I test sono stati effettuati con il macchinario *Zwick-Roell Z100* con i seguenti parametri:

- Velocità d'avanzamento: $1\text{mm}/\text{min}$
- Limite sulla forza massima: 10kN
- Limite sullo spostamento massimo: 15mm

La velocità di avanzamento è stata scelta molto bassa in modo da non introdurre effetti dovuti al fenomeno dello strain rate. Infatti, approcciando il problema del comportamento di un materiale da un punto di vista sperimentale, si osserva che la risposta non dipende solamente dalla tensione applicata, ma esistono altre due variabili: temperatura e strain rate (derivata nel tempo della deformazione), quest'ultima correla la velocità con cui la deformazione è imposta con la risposta del materiale. Infatti, i risultati di prove sperimentali effettuate a diverse velocità di deformazione mostrano come all'aumentare della velocità la caratteristica del materiale cambia, si assiste ad un aumento della regione di deformazione elastica a causa di un aumento della tensione di snervamento ed un aumento della tensione a rottura. Per quel che riguarda l'allungamento a rottura si assiste a comportamenti diversi ma si può generalizzare dicendo che c'è una riduzione della zona di deformazione plastica;

Invece, i limiti sullo spostamento e sulla forza servono a definire la fine del test: il primo limite raggiunto tra i due comporta l'arresto nel macchinario e quindi la conclusione del test. Con i parametri impostati, come indicato sopra, tutti i test si

sono conclusi con il raggiungimento del limite sullo spostamento.

I test sono stati filmati in modo da poter confrontare le modalità di cedimento con quelle ottenute tramite analisi agli elementi finiti. Dal test di compressione si ottiene una curva Forza-Spostamento.

Nelle strutture lattice, durante i test di compressione, si assiste al fenomeno della densificazione, cioè, dopo la rottura di tutte le celle, il materiale si compatta. Questo fenomeno è possibile identificarlo facilmente nei risultati; infatti, dal grafico in Figura 3.3 è possibile vedere che, dopo il cedimento dei vari layer, a circa 14mm lungo lo spostamento, si ha un aumento del valore della forza dovuta alla compressione della struttura completamente compattata. Dato che, la finalità di questi test è quella di valutare la struttura lattice, la curva sperimentale è stata tagliata prima che la densificazione del provino entrasse in gioco.

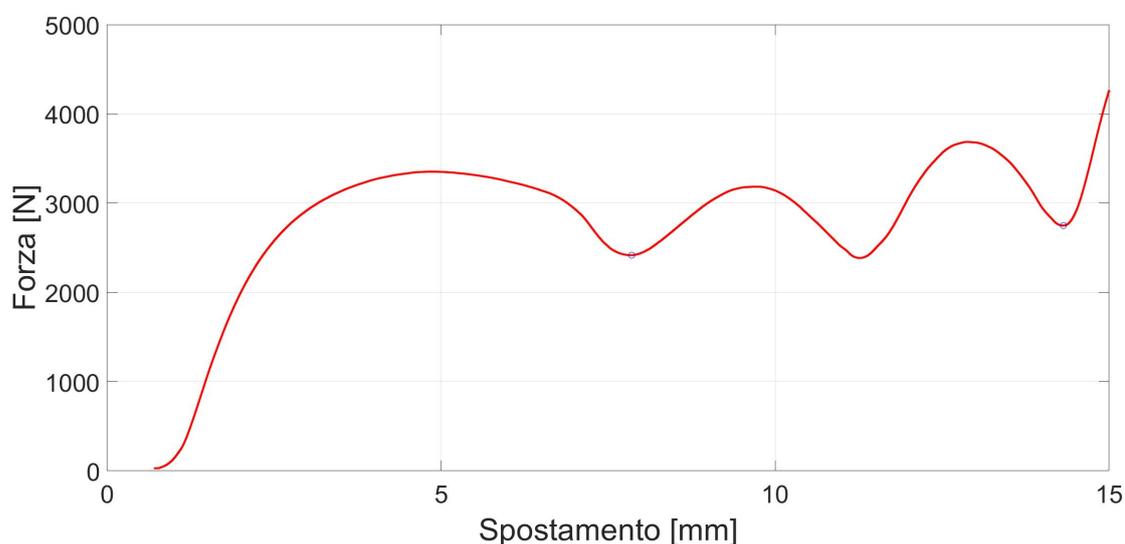


Figura 3.3. Grafico Forza-Spostamento con fenomeno della densificazione

Con questi risultati si è passato al calcolo dell'energia assorbita tramite la relazione 3.1.

$$E = \int F ds \quad (3.1)$$

Per poter confrontare i test eseguiti su strutture differenti, è stato scelto di calcolare l'energia per unità di volume. Avendo un'area variabile al variare dell'altezza del provino è stata calcolata l'area media: dal modello CAD sono state eseguite 85 sezioni per un singolo layer, quindi un taglio a distanza di 0.1mm , poi su ogni sezione è stata calcolata l'area effettiva del provino e utilizzata per il successivo calcolo dell'area media. A questo punto è stato possibile calcolare il volume del materiale compresso durante la prova, tramite la relazione 3.2, conoscendo sia l'area sia lo spostamento.

$$V = \int A_{med} ds \quad (3.2)$$

Infine, è stata calcolata l'energia specifica per unità di volume che d'ora in avanti verrà indicata con l'abbreviativo "SEA".

$$SEA = \frac{E}{V} \quad (3.3)$$

Il confronto tra il SEA di ogni test è stato fatto prendendo in considerazione solo il tratto del test in cui questo parametro risulta costante. Quindi, il tratto di interesse del test per il confronto è quello che va dal cedimento del primo layer all'attimo prima che abbia inizio la densificazione. Di seguito vengono riportati i risultati di tutti i test effettuati sui provini in Carbon-Nylon. Per analizzare i risultati si riportano per ogni test:

- Grafico Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2
- Sequenza di tre immagini del provino durante la prova
- Tabella riassuntiva dei risultati

3.1.1 Test su provino E_01_02_01

Nel Grafico 3.4 si può subito notare la ripetibilità dei due test, confrontando l'andamento della forza rispetto allo spostamento del test 1 e 2. Il primo picco della forza

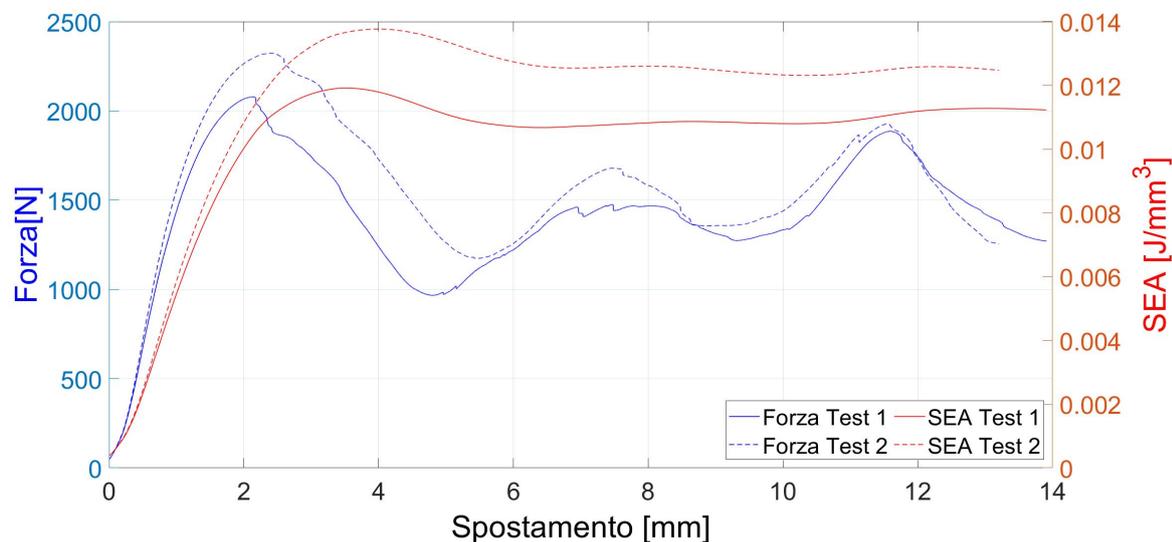


Figura 3.4. Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_02_01

si raggiunge nel momento in cui la struttura inizia a cedere, infatti, si ha subito un decremento della forza stessa. Dalla Figura 3.5 si vede che il cedimento inizia dal layer più in basso e man mano si ha la rottura dei layer superiori, prima quello intermedio e infine l'ultimo layer in alto. Nel Grafico 3.4 sono presenti altri due picchi di forza che corrispondono all'istante prima del cedimento degli altri layer. Nella Tabella

3.1 vengono riportati tutti i dati calcolati per i test sul provino E_01_02_01. La differenza, presente tra i valori di forza massima dei due test, è possibile giustificarla pensando alla possibilità di presenza di difetti nel primo provino. Nel secondo test raggiungendo forze maggiori si ha come conseguenza una maggiore energia assorbita.

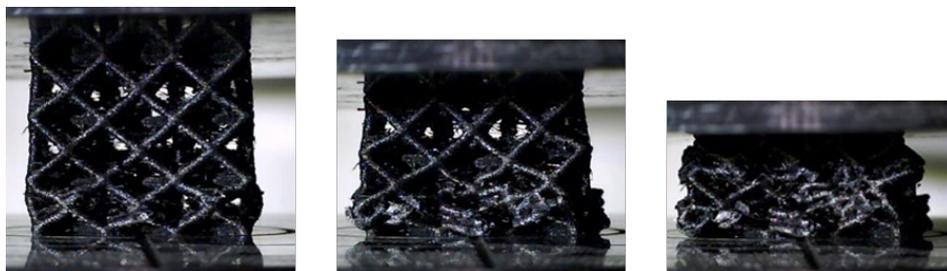


Figura 3.5. Sequenza di rottura provino E_01_02_01

Tabella 3.1. Risultati dei due test sul provino E_01_02_01

Provino E_01_02_01			
		Test 1	Test 2
Area min	$[mm^2]$	68.447	68.447
Area max	$[mm^2]$	284.062	284.062
Area media	$[mm^2]$	126.018	126.018
Spostamento iniziale (s_{in})	$[mm]$	4.811	5.434
Spostamento finale (s_{end})	$[mm]$	13.911	13.207
Forza massima	$[N]$	2078.6	2323.1
Energia massima	$[J]$	16.686	20.759
SEA medio	$[J/mm^3]$	0.0109	0.0125

3.1.2 Test su provino E_01_03_01

I test effettuati sul provino E_01_03_01, a differenza di quelli del provino E_01_02_01, presentano una ripetibilità meno evidente, specialmente analizzando la seconda parte del grafico forza-spostamento, riportato in Figura 3.6, dove si nota maggiormente la differenza dell'andamento delle due funzioni.

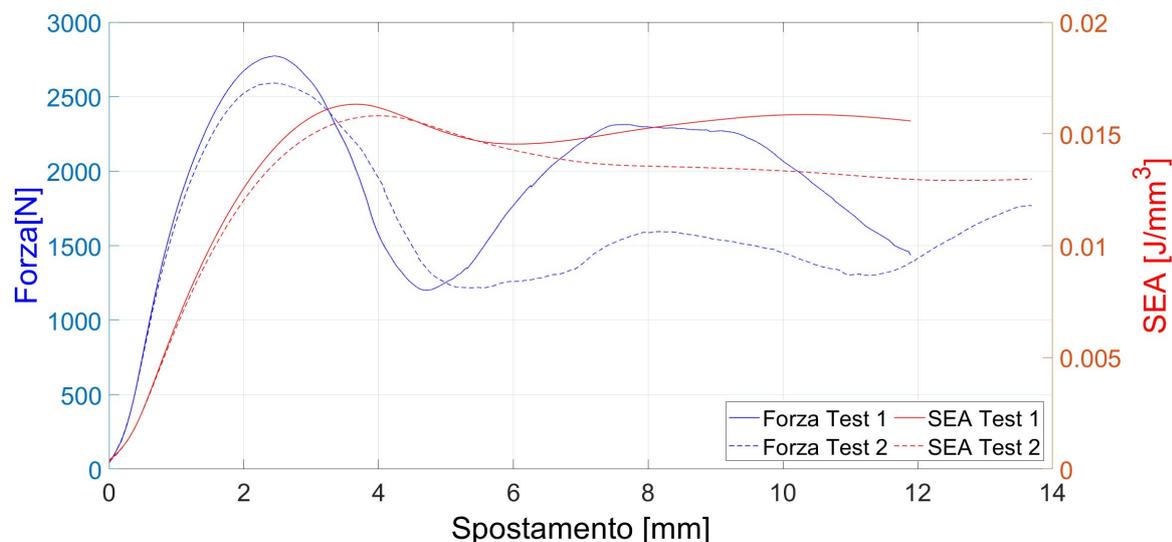


Figura 3.6. Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_03_01

Invece, per quanto riguarda la parte dei risultati calcolati e riportati in Tabella 3.2, si hanno dati molto simili tra loro, infatti, la differenza di energia assorbita è di circa $1J$.

Tabella 3.2. Risultati dei due test sul provino E_01_03_01

Provino E_01_03_01			
		Test 1	Test 2
Area min	$[mm^2]$	60.889	60.889
Area max	$[mm^2]$	284.062	284.062
Area media	$[mm^2]$	123.159	123.159
Spostamento iniziale (s_{in})	$[mm]$	4.72	5.35
Spostamento finale (s_{end})	$[mm]$	11.897	13.691
Forza massima	$[N]$	2779.1	2590.9
Energia massima	$[J]$	22.825	21.886
SEA medio	$[J/mm^3]$	0.0159	0.0134

Un aspetto interessante di questo provino, rispetto agli altri, è la modalità di cedimento, in quanto parte dal layer più in alto e successivamente si ha il cedimento contemporaneo degli altri due layer. Questa caratteristica è possibile notarla sia dalla sequenza di rottura riportata in Figura 3.7 sia nel grafico in Figura 3.6. Infatti, nel grafico non sono presenti i tre picchi, ma solamente due, il primo dovuto al cedimento del primo layer e il secondo dovuto al cedimento degli altri due. Nella seconda immagine della Figura 3.7, si nota, infatti, che i due layer più in basso iniziano a deformarsi contemporaneamente, fenomeno più evidente nel lato destro del provino.

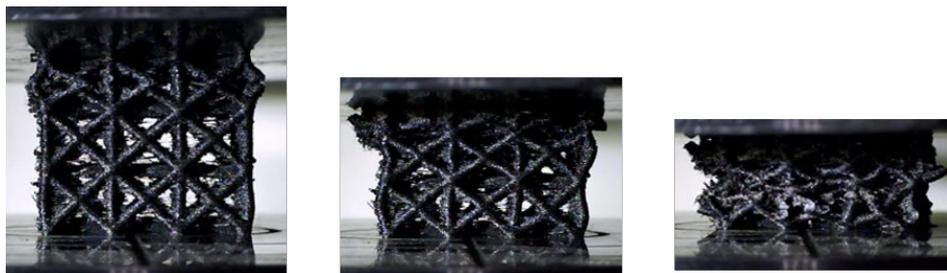


Figura 3.7. Sequenza di rottura provino E_01_03_01

3.1.3 Test su provino E_01_04_01

In questo sottocapitolo vengono analizzati i risultati riguardanti i test eseguiti sul provino E_01_04_01. Dal grafico forza-spostamento in Figura 3.8, si può subito vedere la ripetibilità dei due test, sia nei valori ottenuti sia nell'andamento. In questi

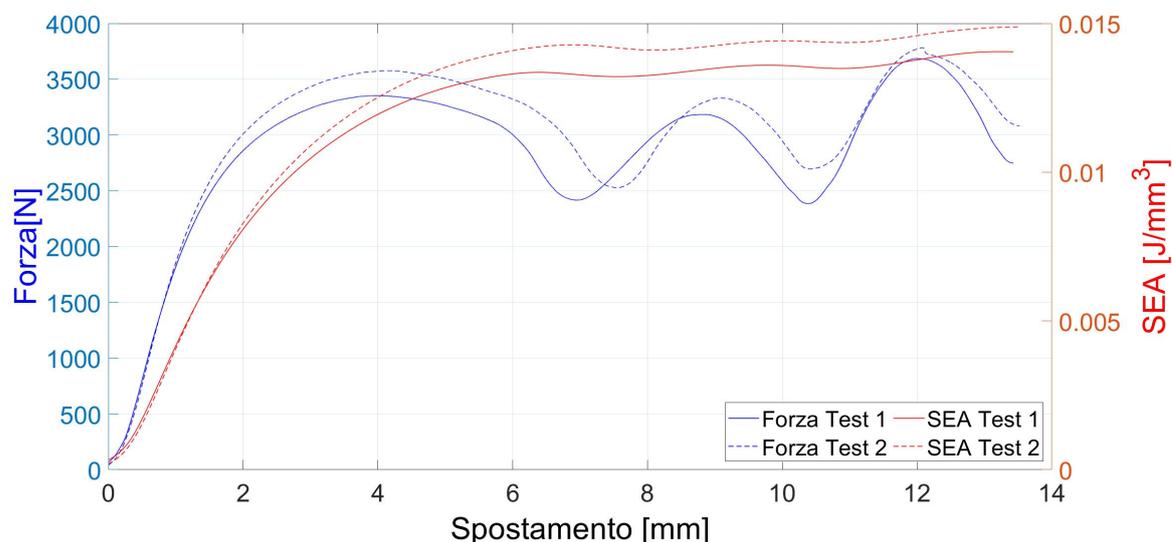


Figura 3.8. Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_04_01

test si nota molto chiaramente il cedimento di ogni singolo layer, infatti nel grafico si ha la presenza di tre massimi. Nella Figura 3.9 si può analizzare la sequenza delle rotture dei vari layer, il primo cedimento si ha nel layer centrale seguito dal primo in basso e infine si ha la rottura nel layer più in alto. In questi due test le forze in gioco sono molto superiori rispetto agli altri test, in prima analisi questo è giustificabile per ad un'area media resistente maggiore rispetto agli altri provini. Tuttavia, proseguendo l'analisi, si vede anche che il SEA ottenuto è più alto rispetto agli altri test. Questi risultati verranno approfonditi e confrontati con quelli del provino E_01_03_01 nel Capitolo 3.2.

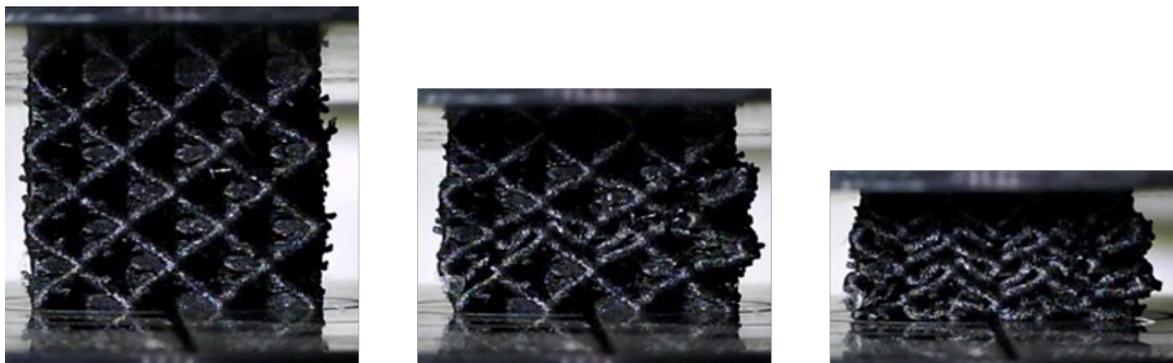


Figura 3.9. Sequenza di rottura provino E_01_04_01

Tabella 3.3. Risultati dei due test sul provino E_01_04_01

Provino E_01_04_01			
		Test 1	Test 2
Area min	$[mm^2]$	136.893	136.893
Area max	$[mm^2]$	284.062	284.062
Area media	$[mm^2]$	202.267	202.267
Spostamento iniziale (s_{in})	$[mm]$	6.967	7.55
Spostamento finale (s_{end})	$[mm]$	13.43	13.523
Forza massima	$[N]$	3685.7	3782.5
Energia massima	$[J]$	38.156	40.966
SEA medio	$[J/mm^3]$	0.0136	0.0144

3.1.4 Test su provino E_01_07_01

Il provino E_01_07_01 è l'ultimo con la configurazione con cella cubica. Analizzando questi test è possibile subito notare dal grafico forza-spostamento, in Figura 3.10, che la struttura lavora molto più uniformemente rispetto agli altri provini; infatti, nel grafico non sono molto evidenti i tre picchi dovuti ai cedimenti dei singoli layer, ma una volta raggiunto il primo massimo, la forza resta pressoché costante fino alla fase di densificazione. I valori della forza sono più bassi rispetto ai test precedenti e di conseguenza anche l'energia assorbita è più bassa.

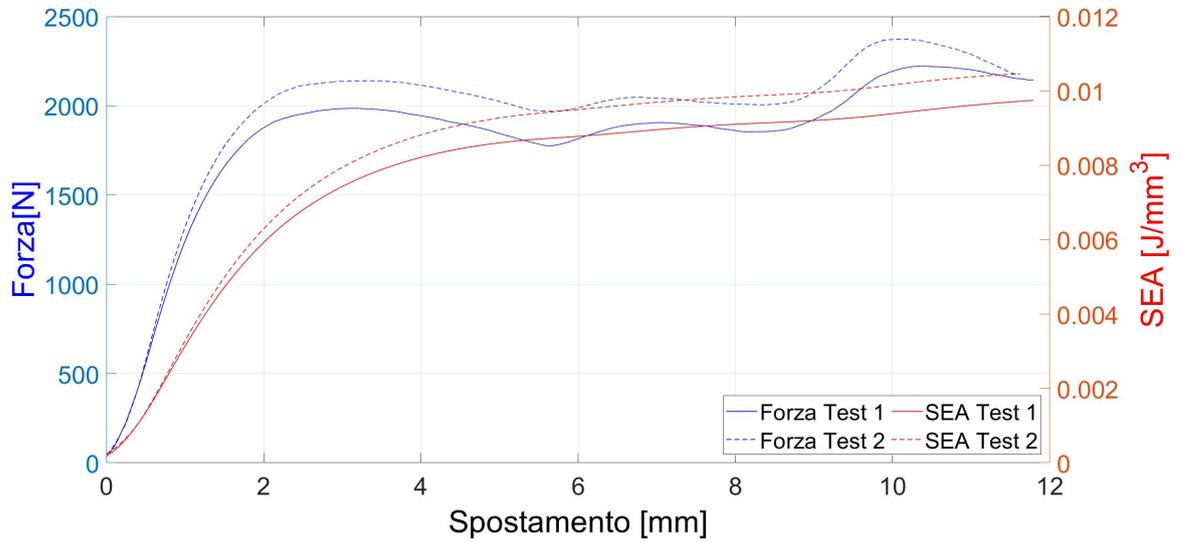


Figura 3.10. Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_07_01



Figura 3.11. Sequenza di rottura provino E_01_07_01

Tabella 3.4. Risultati dei due test sul provino E_01_07_01

Provino E_01_07_01			
		Test 1	Test 2
Area min	$[mm^2]$	81.714	81.714
Area max	$[mm^2]$	284.062	284.062
Area media	$[mm^2]$	186.695	186.695
Spostamento iniziale (s_{in})	$[mm]$	5.636	3.388
Spostamento finale (s_{end})	$[mm]$	11.793	11.617
Forza massima	$[N]$	2222.3	2374.1
Energia massima	$[J]$	21.461	22.686
SEA medio	$[J/mm^3]$	0.0092	0.0097

3.1.5 Test su provino E_01_08_01

I provini che vengono analizzati in questo sottocapitolo sono formati da celle ottaedriche. Una prima caratteristica di questo provino, rispetto ai precedenti, è quella riguardante l'area media resistente che è molto bassa. Quest'aspetto però, comporta un'energia assorbita molto più bassa rispetto ai provini analizzati finora. Il parametro che fa subito capire che il provino E_01_08_01 non è performante come i precedenti è il SEA che è riportato in Tabella 3.5, il quale presenta un valore molto basso. Continuando ad analizzare i risultati e spostando l'attenzione sul grafico in Figura 3.12, si può vedere la presenza dei tre picchi, che sono stati trovati nella maggior parte dei test, ma a differenza degli altri, il cedimento del secondo layer, quindi guardando il secondo massimo locale di forza, è quasi istantaneo.

Tabella 3.5. Risultati dei due test sul provino E_01_08_01

Provino E_01_08_01			
		Test 1	Test 2
Area min	$[mm^2]$	54.716	54.716
Area max	$[mm^2]$	177.642	177.642
Area media	$[mm^2]$	108.964	108.964
Spostamento iniziale (s_{in})	$[mm]$	6.727	5.057
Spostamento finale (s_{end})	$[mm]$	13.885	12.152
Forza massima	$[N]$	1395.2	1271.2
Energia massima	$[J]$	16.692	13.187
SEA medio	$[J/mm^3]$	0.0106	0.0098

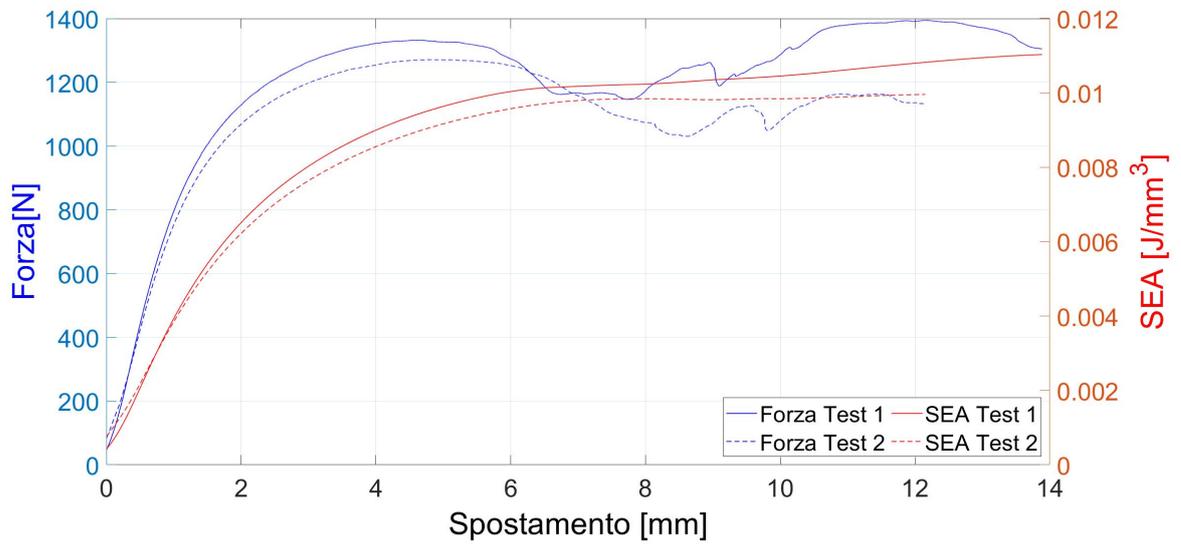


Figura 3.12. Forza-Spostamento e SEA-Spostamento dei test 1 e 2 sul provino E_01_08_01

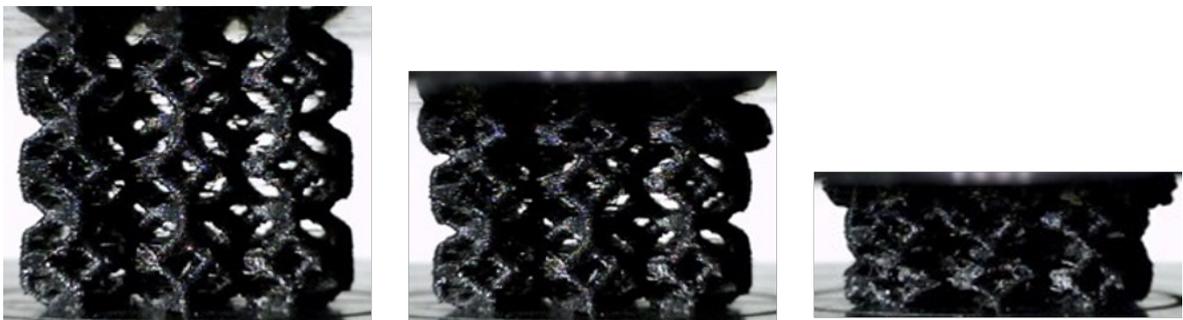


Figura 3.13. Sequenza di rottura provino E_01_08_01

3.2 Scelta cella lattice

Analizzando i test sperimentali, effettuati su tutti i provini, e confrontando i vari risultati, è stato possibile stabilire quale tra le celle analizzate è la più performante. I parametri che sono stati tenuti maggiormente in considerazione sono l'energia assorbita e il SEA, infatti in Figura 3.14 e in Figura 3.15 si riportano gli istogrammi con i valori rispettivamente di SEA-Forza e Energia-Forza. Negli istogrammi vengono riportati entrambi i test effettuati sulle diverse celle, quindi, il primo dato si riferisce al test 1 eseguito sul provino E_01_02_01, il secondo, invece, è riferito al test 2 eseguito su provino E_01_02_01 e così via.

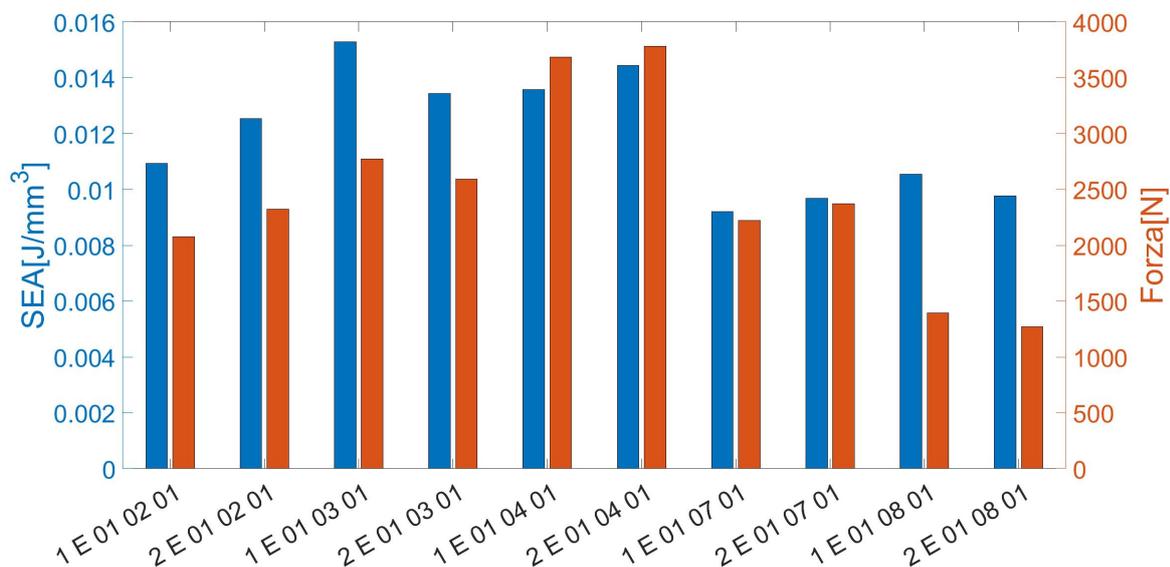


Figura 3.14. Istogramma con valori del SEA e della Forza

Andando a confrontare i valori di SEA e forza in Figura 3.14, le prove che hanno portato ad un risultato migliore, sono i test sui provini 03 e 04. Infatti, il valore di forza massima si ha sul provino 04, mentre, il valore di SEA massimo sul provino 03. Questo porterebbe a scegliere come cella più efficiente la 03, ma siccome il valore del SEA in questo caso non è molto differente da quello del provino 04 si va a considerare, oltre questi due parametri, anche l'energia assorbita. Come si evince dal secondo grafico in Figura 3.15, l'energia assorbita dal provino 04 è quasi il doppio di quella del provino 03. Per tanto, si può concludere questa analisi affermando che la cella 04 è la più efficiente per il caso in questione.

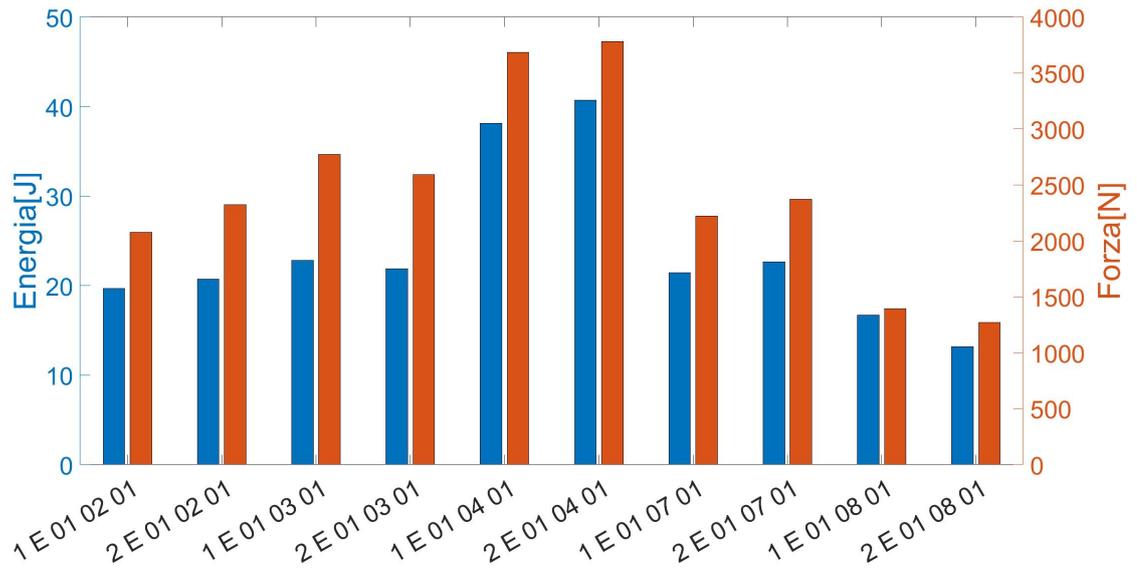


Figura 3.15. Istogramma con valori dell'energia e della Forza

Per completezza, in Figura 3.16, si riporta il confronto delle modalità di rottura di tutti i provini analizzati.

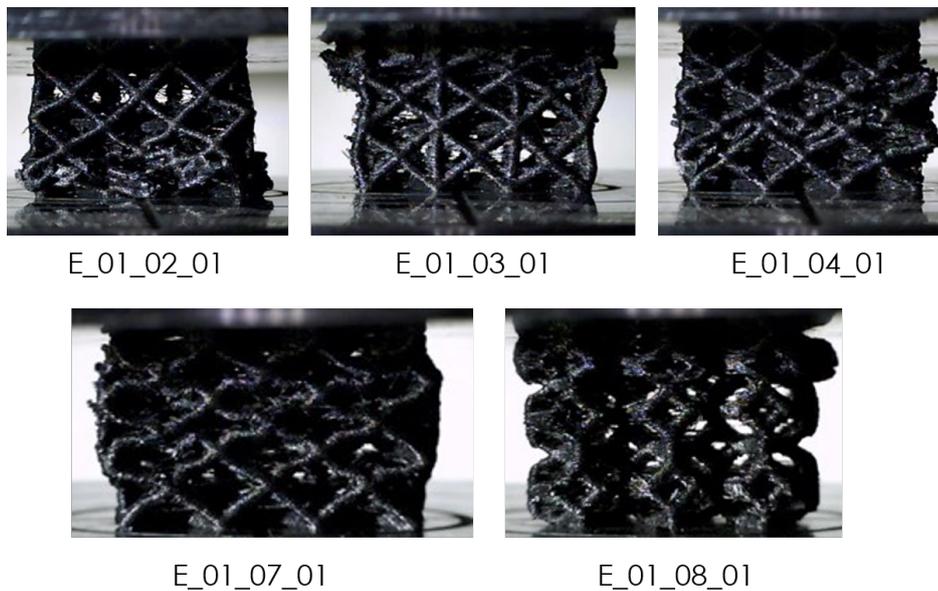


Figura 3.16. Confronto delle modalità di rottura dei provini

3.3 Modello FEA

3.3.1 Costruzione del modello FEA

I risultati sperimentali ottenuti sottoponendo a prova di compressione il provino E_01_04_01, sono stati utilizzati per validare un modello agli elementi finiti. Per la costruzione del modello FEA è stato utilizzato il software Radioss del pacchetto Altair Hyperworks. Il modello FEA è stato realizzato con la geometria del provino E_01_04_01, il quale è risultato il più performante per questo studio, come spiegato nel Capitolo 3.2. Lo scopo di questa parte della tesi è quello di modellizzare sul software il test eseguito sul provino E_01_04_01 e, successivamente, validare il modello confrontando i risultati con i test sperimentali.

Per ridurre i tempi di calcolo, ottenendo comunque dei risultati accettabili, si è scelto di modellizzare il provino con elementi 1D di tipo beam. L'alternativa all'utilizzo di quest'ultimi è la scelta di elementi 3D, i quali permettono di ottenere un risultato più accurato, poiché è possibile trovare i punti di stress massimi, introdurre modelli per tenere in considerazione il fenomeno dello strain-rate ed anche utilizzare criteri di rottura per poter avere un diagramma forza-spostamento che si avvicini il più possibile alla realtà. Tuttavia, utilizzando gli elementi 3D, i tempi di calcolo si dilatano maggiormente e i risultati dipendono dalla qualità della mesh. I beam sono elementi 1D collegati tra di loro ai vertici e a cui vengono associate delle proprietà geometriche. Utilizzandoli, il modello avrà un numero limitato di elementi che comporta un tempo di calcolo ridotto.

Il solutore Radioss, per gli elementi beam, usa la teoria delle travi a taglio o la formulazione di Timoshenko. Essa presuppone che il lavoro interno all'elemento sia associato agli sforzi assiali, torsionali e di taglio. Inoltre non viene presa in considerazione nessuna deformazione della sezione sul piano. Le proprietà che descrivono un elemento beam sono tutte definite in un sistema di coordinate locali. Questo sistema di coordinate può essere visto nella Figura 3.17.

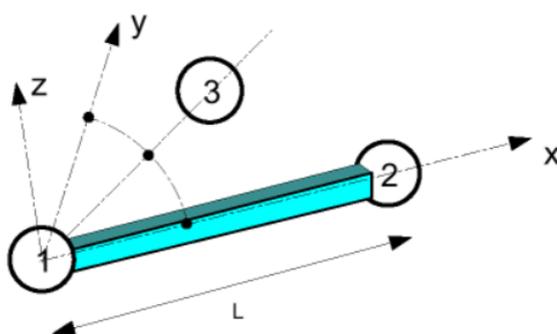


Figura 3.17. Modellizzazione dell'elemento beam in Radioss

I nodi 1 e 2 dell'elemento sono usati per definire l'asse X locale, con l'origine al nodo 1. L'asse Y locale è definito usando il nodo 3, che si trova nel piano XY locale, insieme ai nodi 1 e 2. L'asse Z è determinato dal prodotto vettoriale incrociato degli assi X

e Y positivi. Le deformazioni sono calcolate rispetto al sistema di coordinate locali traslate e ruotate per tenere conto del movimento del corpo rigido. Infine, la geometria di un elemento beam è definita tramite i seguenti parametri:

- A: Area della sezione
- I_x : Momento d'inerzia rispetto all'asse x locale
- I_y : Momento d'inerzia rispetto all'asse y locale
- I_z : Momento d'inerzia rispetto all'asse z locale

Dove i momenti d'inerzia rispetto a y e z possono essere calcolati tramite le relazioni 3.4 e 3.5. Invece, quello rispetto all'asse x viene calcolata con la relazione 3.6.

$$I_y = \int \int_A z^2 dydz \quad (3.4)$$

$$I_z = \int \int_A y^2 dydz \quad (3.5)$$

$$I_x = I_y + I_z \quad (3.6)$$

Una volta terminata la creazione della geometria si è passati all'impostazione del test (Figura 3.18). Per imporre uno spostamento uniforme su tutta la faccia superiore del provino, è stato creato un nodo, che, successivamente, è stato collegato a tutti i nodi superiori della geometria con degli elementi di tipo rigids. Al nodo è stato imposto uno spostamento lungo l'asse z e bloccati i gradi di libertà su x e y. Infine, su tutti gli elementi alla base del provino è stato applicato un vincolo per bloccare la traslazione lungo l'asse z.

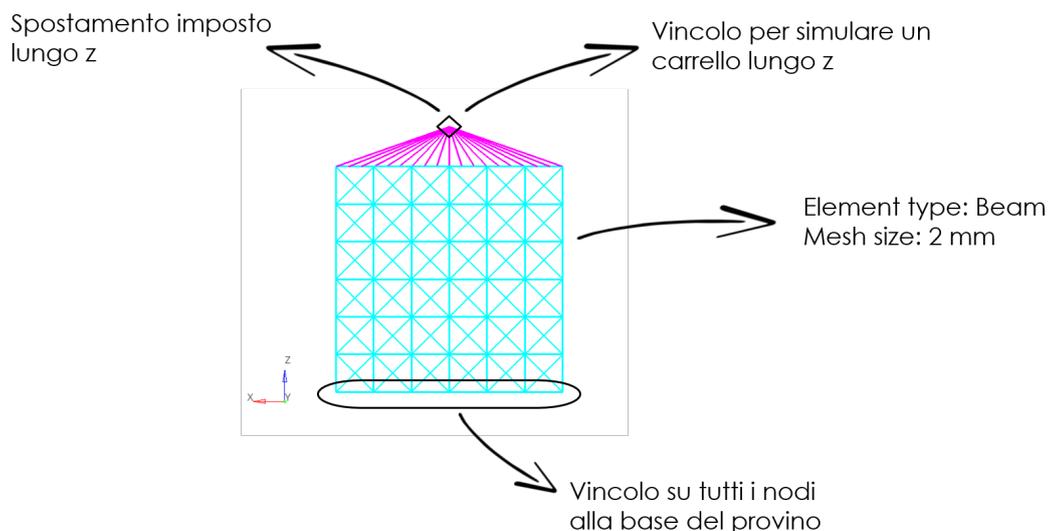


Figura 3.18. Modello FEA per test di compressione su polimero

Per rendere il modello più simile possibile alla realtà, è stato scelto di inserire il materiale tramite la legge 36 di Radioss, che permette di modellizzare il comportamento di un materiale elastoplastico. La parte elastica della curva sforzo-deformazione del materiale è modellata usando il modulo elastico E e il rapporto di Poisson ν . Invece, per il tratto plastico è possibile inserire la curva sforzo-deformazione reale. Il comportamento di indurimento del materiale è definito in funzione della deformazione plastica per una data velocità di deformazione.

I dati del carbon-nylon sono stati presi dall'articolo "Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing" [8], dove è stato studiato il comportamento e valutate le proprietà di questo materiale. I test eseguiti sul carbon-nylon sono stati effettuati, sia variando la percentuale di riempimento dei provini, sia cambiando l'orientazione durante il processo di stampa. Per semplicità in Tabella 3.6 si riportano i dati riferiti solo al caso che interessa questo studio. La curva sforzo-deformazione ingegneristica viene riportata in Figura 3.19.

Tabella 3.6. Dati Carbon Nylon

Carbon Nylon			
E [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{UTS} [MPa]	σ_{break} [MPa]
3700	39	45	38

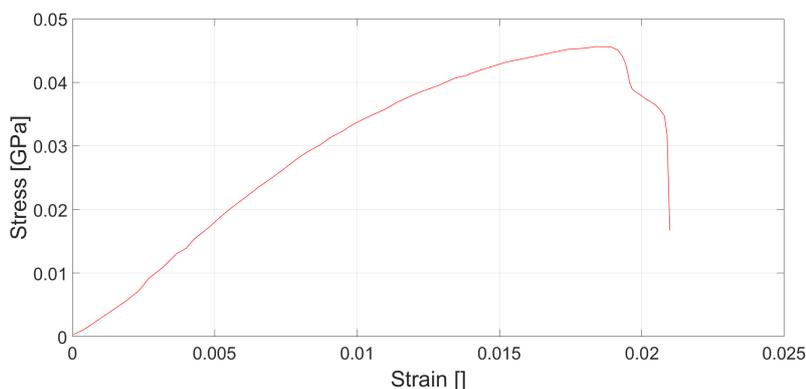


Figura 3.19. Curva sforzo-deformazione ingegneristica del Carbon-Nylon

Nel software Radioss è necessario inserire la curva sforzo-deformazione reale e non ingegneristica, inoltre, bisogna importare solo il tratto che interessa il comportamento plastico. Infatti, utilizzando le relazioni 3.7 e 3.8 con i valori della curva ingegneristica, riportata in Figura 3.19, è stata ricavata la curva reale mostrata in Figura 3.20.

$$\varepsilon_{pl} = \ln(1 + \varepsilon_e) - \frac{\sigma_e(1 + \varepsilon_e)}{E} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{pl} = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (3.8)$$

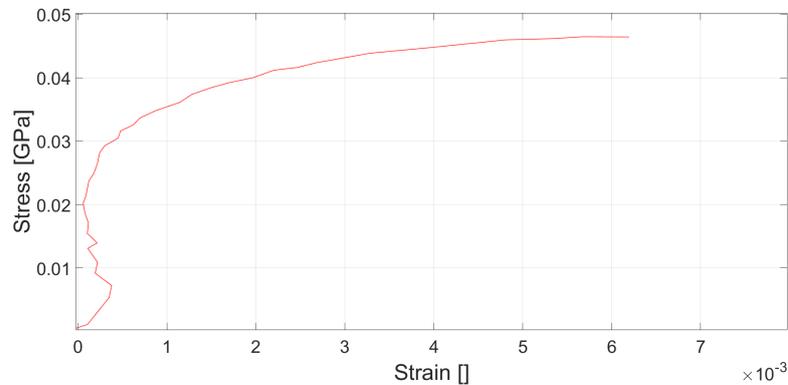


Figura 3.20. Curva sforzo-deformazione reale del Carbon-Nylon

A questo punto, dopo aver eliminato il primo tratto della curva che descrive il comportamento elastico, essa è stata importata all'interno del software come riportato in Figura 3.21.

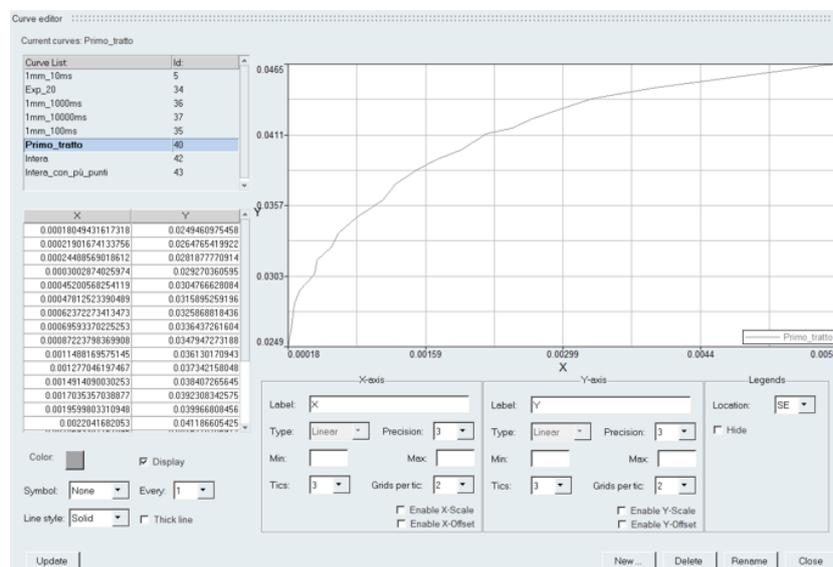


Figura 3.21. Curva sforzo-deformazione importata sul software radioss

Oltre alla curva, per completare la definizione del materiale, è stato necessario inserire anche il modulo di Young E , la densità ρ e il coefficiente di Poisson ν . Il modulo di Young è stato ottimizzato sulla struttura, partendo da quello nominale del materiale, come riportato nei seguenti studi: *Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured lattice structures with large diameters* [9], *Compressive behaviour of stain less steel micro-lattice structures* [10] e *The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel*

microlattice structures [11]. Dove, non essendo note le proprietà della cella e non potendole ricavare sperimentalmente per la complessità della geometria, i dati sono stati ricavati confrontando il modello agli elementi finiti con i risultati sperimentali. Questo iter viene utilizzato anche nel caso delle schiume, dove non vengono utilizzati i dati nominali del materiale.

Successivamente, è necessario settare una proprietà da assegnare agli elementi. La scelta della proprietà da impostare è strettamente legata alla tipologia di elementi utilizzati, quindi, avendo degli elementi beam, è stata utilizzata la proprietà P18. Quest'ultima essendo associata ad un elemento trave si basa sulla teoria di Timoshenko e tiene conto della deformazione trasversale a taglio senza tener conto della deformazione dovuta alla torsione. Infatti, si raccomanda di utilizzarla nel caso di travi corte, come nel caso dello studio in questione. Durante l'impostazione della proprietà, è necessario indicare la sezione di riferimento e i punti di integrazione. In Figura 3.22, è stata riportata l'impostazione della proprietà all'interno di Radioss. In essa è stata selezionata una sezione di forma circolare e, impostando NITR=3, si sono indicati 9 punti di integrazione sull'intera sezione, come riportato in Figura 3.23.

Name	Value
Solver Keyword	/PROP/INT_BEAM/
ID	2
Name	P18_Beam
Color	
Include	[Master Model]
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
User Comments	Hide In Menu/Export
Card Image	P18_INT_BEAM
Regular_OR_encrypted_flag	Regular
Isect	2: Predefined circular section
Ismstr	4: Full geometric nonlinearities
dm	0.0
df	0.0
Y0	0
Z0	0
NITR	3
L1	0.7
Rotation_Wx1	<input type="checkbox"/>
Rotation_Wy1	<input type="checkbox"/>
Rotation_Wz1	<input type="checkbox"/>
Rotation_Wx2	<input type="checkbox"/>
Rotation_Wy2	<input type="checkbox"/>
Rotation_Wz2	<input type="checkbox"/>

Figura 3.22. Parametri impostati per la creazione della proprietà P18

Come ultimo passaggio per la costruzione del modello FEA, è stato implementato il

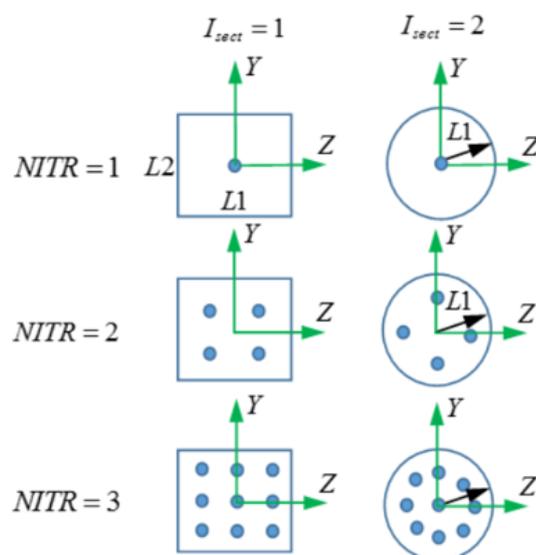


Figura 3.23. Parametri per il calcolo dei punti di integrazione della sezione

contatto tra le varie beam, durante la compressione, di tipo TYPE11. Questa interfaccia simula il contatto che avviene tra due elementi 1D. Le proprietà dell'interfaccia sono:

- Il contatto avviene tra una linea master e una linea slave
- Una linea slave può impattare su una o più linee master
- Una linea può appartenere all'elemento master e all'elemento slave. Questo permette di definire un auto-contatto.

3.3.2 Validazione del modello FEA

La validazione del modello precedentemente descritto è stata eseguita sulla cella scelta nel Capitolo 3.2. I risultati ottenuti dalla simulazione FEA sono stati confrontati con quelli dei test sperimentali. Nel grafico in Figura 3.24 è stato riportato l'andamento della Forza e del SEA rispetto allo spostamento del modello. Invece, nella Figura 3.25 si può osservare il confronto dell'andamento della forza rispetto allo spostamento tra i due test sperimentali e il modello agli elementi finiti. La parte dove il risultato del modello differisce da quelli sperimentali è nella parte centrale, dove non si ha un netto cedimento del secondo layer.

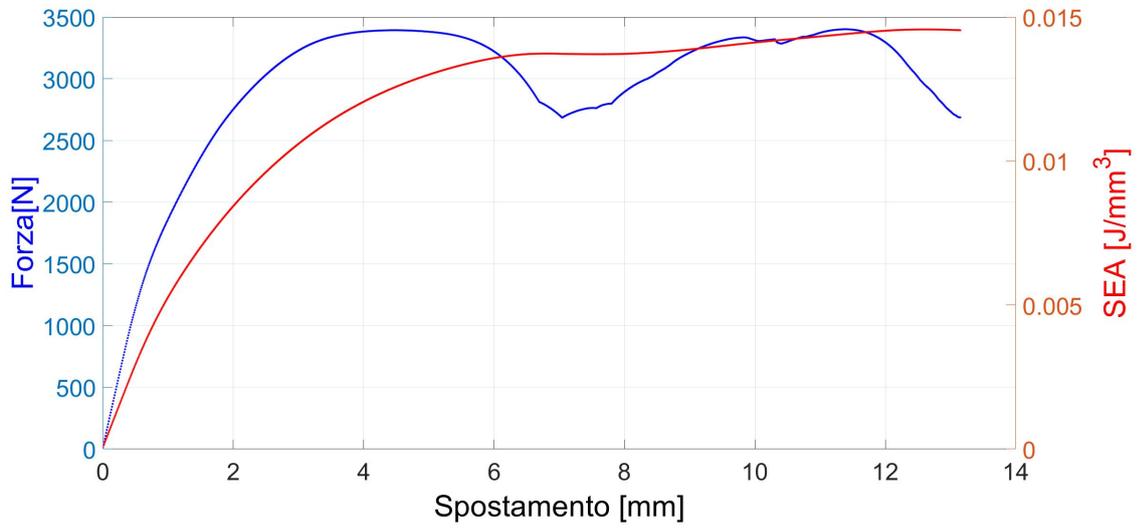


Figura 3.24. Forza-Spostamento e SEA-Spostamento modello FEA

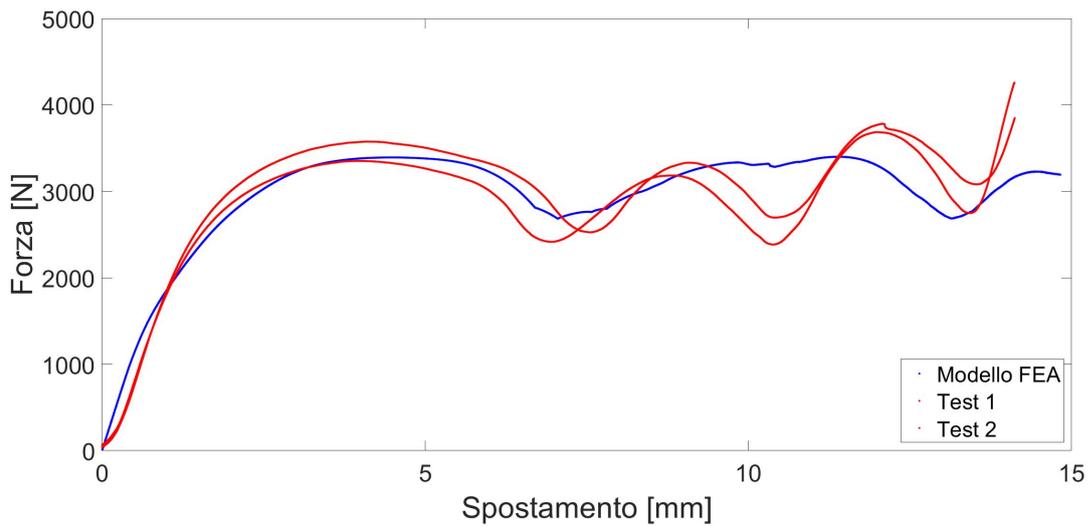


Figura 3.25. Confronto andamento Forza-Spostamento del modello con i test sperimentali

Invece, confrontando l'energia assorbita e il SEA, come riportato in Tabella 3.7, si può ritenere il modello molto realistico, infatti, i risultati sono simili.

Tabella 3.7. Risultati dei due test e del modello sul provino E_01_04_01

Provino E_01_04_01		Test 1	Test 2	Modello FEA
Forza massima	[N]	3685.7	3782.5	3400.4
Energia massima	[J]	38.156	40.966	38.67
SEA medio	[J/mm ³]	0.0136	0.0144	0.0145

Infine, il confronto è stato anche fatto sulla deformata, riportata in Figura 3.26, dove si può vedere che il cedimento della struttura avviene con le stesse modalità. Concludendo il confronto dei risultati tra il modello agli elementi finiti e i test sperimentali, è possibile affermare che la simulazione rispecchia, negli aspetti principali, la realtà, quindi, potrà essere successivamente utilizzato per verificare il comportamento di strutture simili e realizzate con lo stesso materiale.

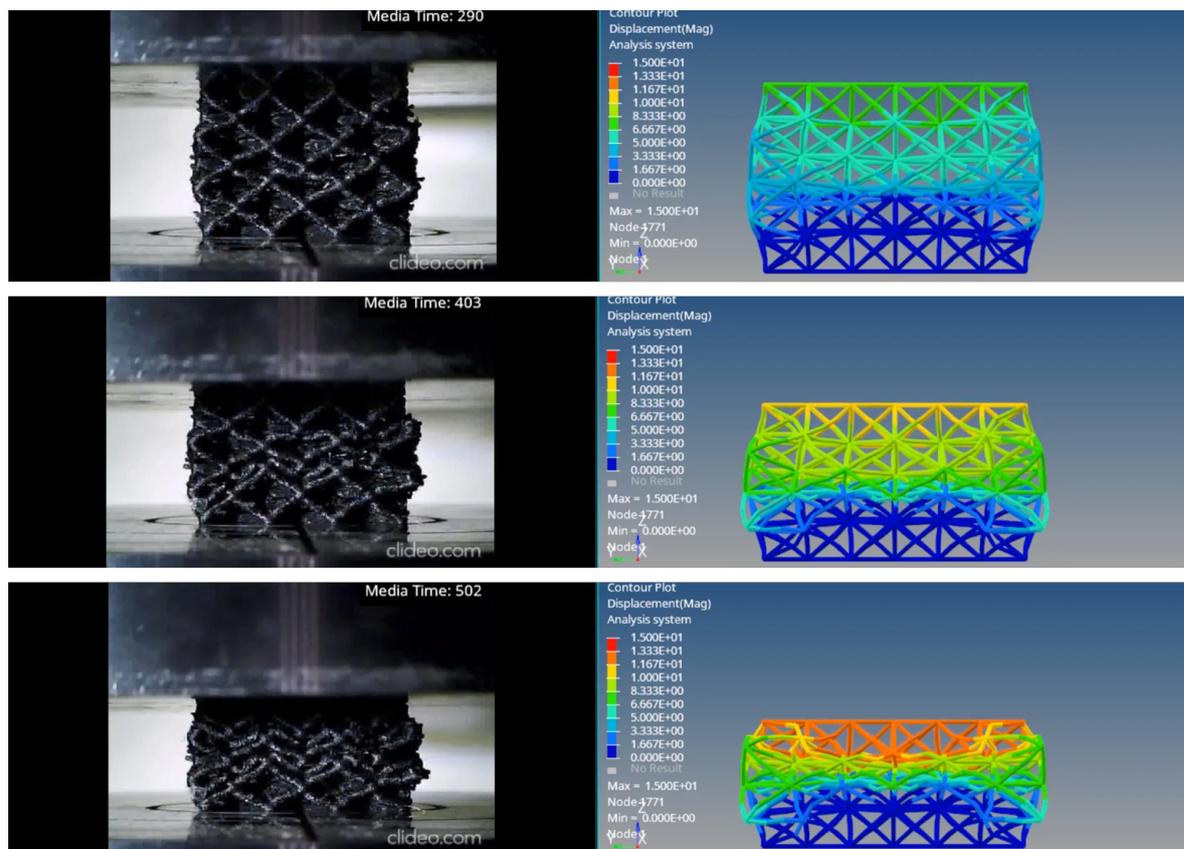


Figura 3.26. Confronto deformata tra modello e test

Capitolo 4

Compressione su alluminio

Dopo aver stabilito la struttura ottimale per questo studio, sono stati realizzati i provini in alluminio per poter effettuare gli stessi test, in modo da studiare più attentamente la geometria del provino E_01_04_01. I provini sono stati realizzati tramite la tecnologia SLM in lega di alluminio AlSi10Mg, uno dei materiali più utilizzati nell'ambito dell'additive manufacturing.

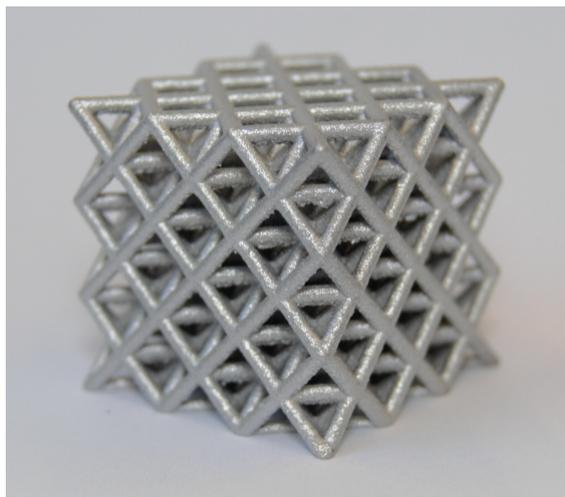


Figura 4.1. Provino E_01_04_01 realizzato in alluminio

Di seguito, in Tabella 4.1, si riportano i dati relativi alla lega AlSi10Mg forniti dal produttore dei provini.

Tabella 4.1. Dati AlSi10Mg

AlSi10Mg			
E [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{UTS} [MPa]	Allungamento a rottura [%]
69	226	405	3.5

4.1 Test sperimentali

Le prime prove eseguite sui provini E_01_04_01, realizzati in alluminio, sono state quelle di compressione. Questi test sono stati effettuati con il macchinario *Zwick-Roell Z100*, lo stesso utilizzato per provini in carbon-nylon. Per renderli paragonabili ai test fatti in precedenza è stata impostata la stessa velocità di avanzamento. I parametri utilizzati sono riportati di seguito.

- Velocità d'avanzamento: $1\text{mm}/\text{min}$
- Limite sulla forza massima: 100kN
- Limite sullo spostamento massimo: 15mm
- limite sul decremento della forza massima pari al 70%

Il limite sulla forza è stato aumentato a 100kN , in quanto essendo provini in alluminio la forza resistente è molto più alta rispetto ai provini realizzati in polimero. Questi limiti sono stati inseriti per gli stessi motivi spiegati nel Capitolo 3.1. Invece, il limite impostato sul decremento della forza, serve ad interrompere il test quando la forza resistente della struttura crolla oltre il 70% rispetto alla forza massima registrata durante il test. Questo parametro è stato raggiunto durante il primo test di compressione, dopo che la struttura ha ceduto e non opposto più resistenza. Nel secondo test per poter verificare l'andamento della forza anche dopo il cedimento, si è spostato questo limite dal 70% al 90%. Poiché si è riscontrato che dopo il primo cedimento della struttura si è subito innescato il fenomeno della densificazione, il test è stato interrotto manualmente e i dati sono stati tagliati.

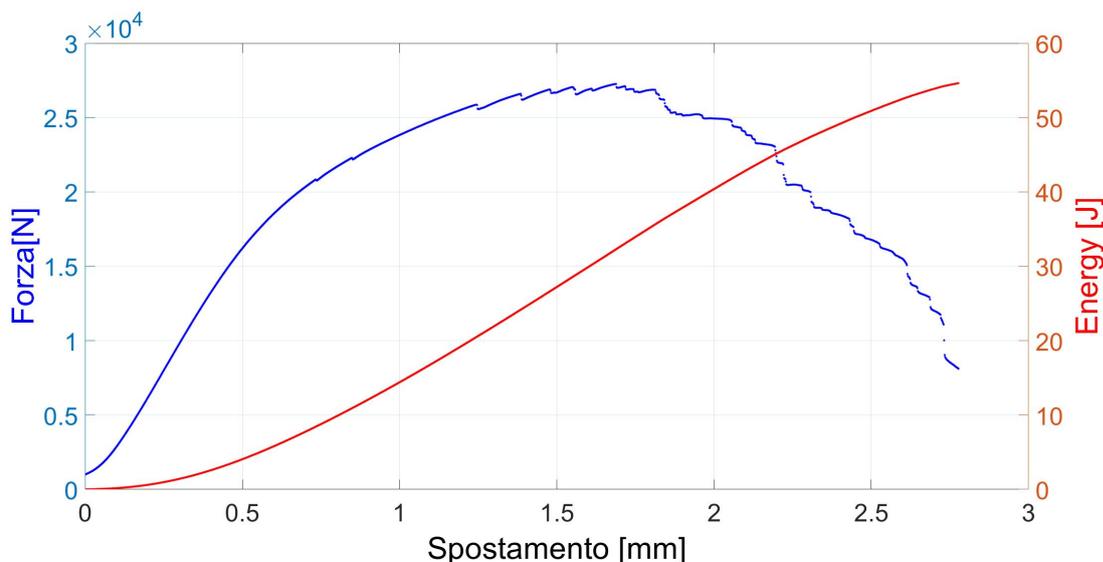


Figura 4.2. Forza-Spostamento e Energia-Spostamento del test 1 sul provino E_01_04_01 in alluminio

In Figura 4.3 viene riportato l'andamento forza-spostamento dell'intera seconda prova. Invece in Figura 4.4 viene riportato l'andamento forza-spostamento e energia-spostamento del secondo test tagliati allo stesso punto degli andamenti riportati per il test 1.

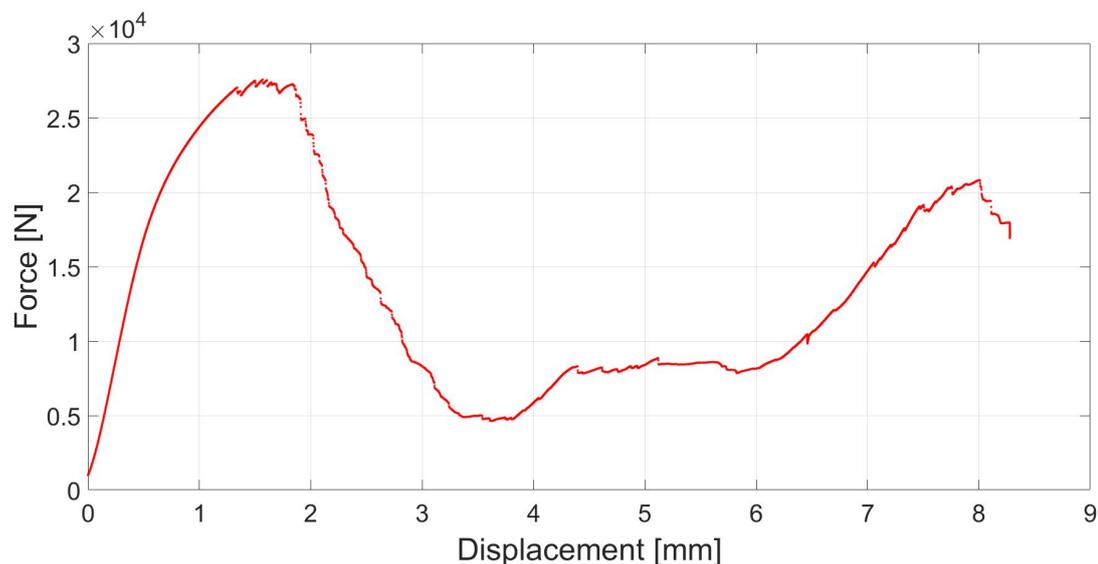


Figura 4.3. Forza-Spostamento completa del test 2 sul provino E_01_04_01 in alluminio

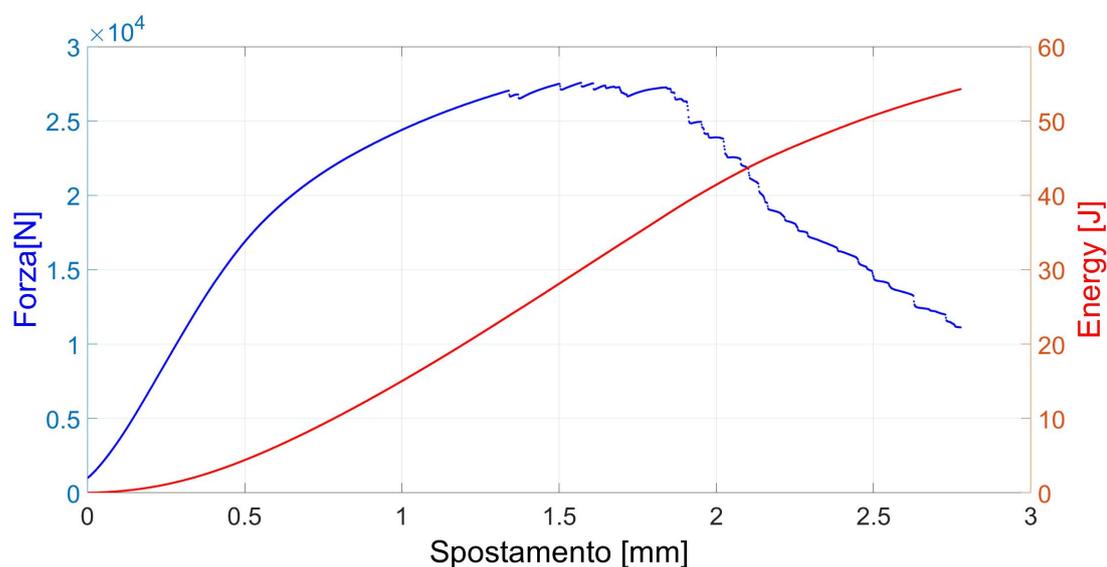


Figura 4.4. Forza-Spostamento e Energia-Spostamento del test 2 sul provino E_01_04_01 in alluminio

Dopo aver eseguito due test e verificato la ripetibilità dei risultati sperimentali si passati all'analisi dei dati come riportato nel Capitolo 3.1. Quindi, è stata calcolata l'energia assorbita e il SEA. Di seguito vengono riportati, in Tabella 4.2, i dati ottenuti.

Tabella 4.2. Risultati dei due test sul provino E_01_04_01 in alluminio

Provino E_01_04_01		Test 1	Test 2	Test 2
Spostamento massimo	[<i>mm</i>]	2.78	2.78	8.27
Forza massima	[<i>N</i>]	27254	27562	27562
Energia massima	[<i>J</i>]	54.614	54.270	112.366
SEA	[<i>J/mm³</i>]	0.1016	0.1029	0.103

In Figura 4.5 sono riportati entrambi i provini sottoposti a compressione. Il primo da sinistra è il provino relativo al test 1, e il secondo è quello utilizzato nel test 2. In quest'ultimo si nota subito che è compresso maggiormente, infatti, come spiegato in precedenza, nel secondo test la compressione è durata di più che nel primo, arrivando ad uno spostamento pari a 8.27mm. Su entrambi i provini è stata riscontrata una rottura sulla diagonale a 45°.

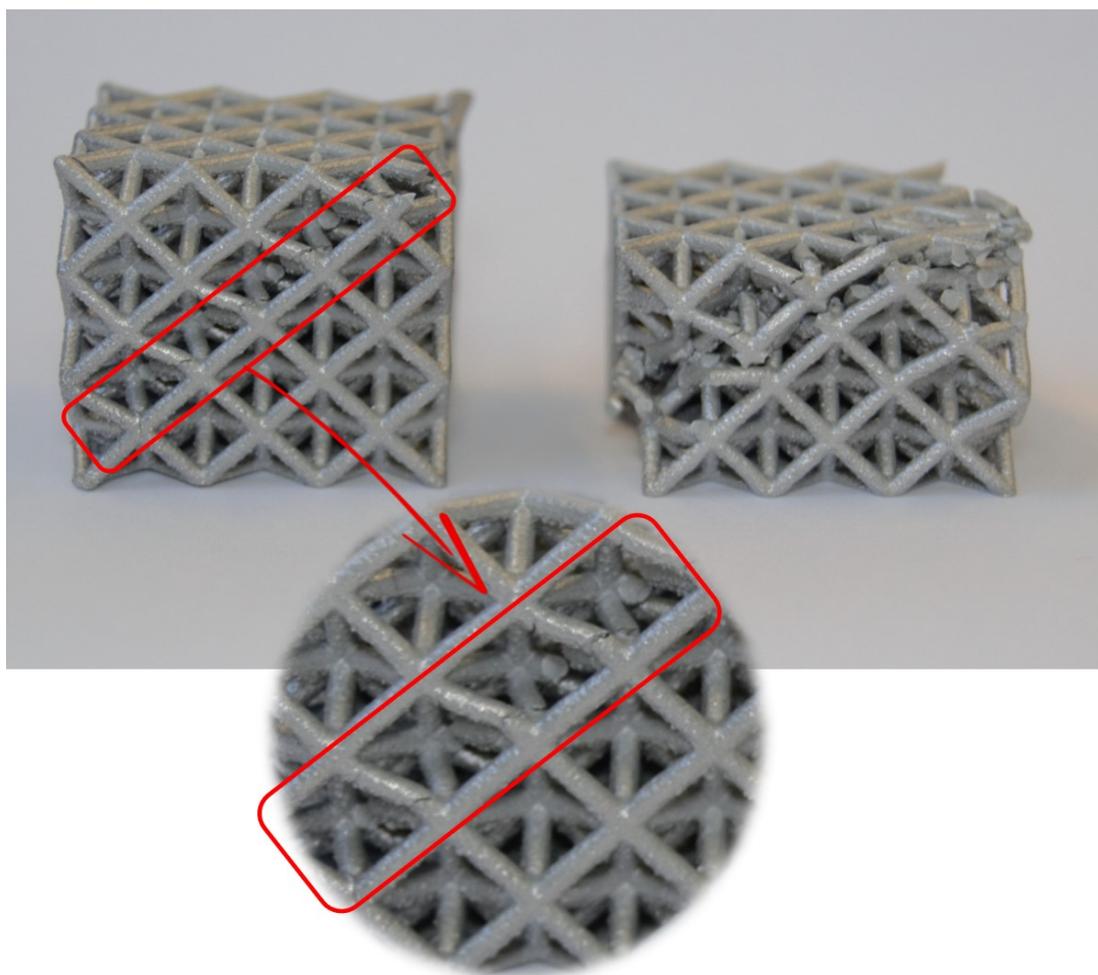


Figura 4.5. Rottura dei provini dopo i test

Questa tipologia di rottura è differente da quella riscontrata nello stesso provino realizzato in polimero. Questa differenza potrebbe dipendere dalla maggior rigidità della singola cella realizzata in alluminio. Infatti, nello studio *Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density* [5], viene studiata l'influenza della dimensione del diametro del beam sulla tipologia di cedimento, dove è stato riscontrato che con dei diametri piccoli si assisteva ad una rottura layer per layer; invece, aumentando il valore del diametro si aveva una rottura a 45°. Quindi, per poter ottenere lo stesso criterio di rottura ottenuto sui provini in Carbon-Nylon, potrebbe essere necessario realizzare i provini in alluminio diminuendo il diametro del beam. La differenza di rottura tra i provini realizzati con differenti materiali è possibile notarla anche dai diagrammi forza-spostamento, infatti, nel caso di provini in carbon-nylon si era riscontrato, a causa del cedimento layer per layer, la presenza di tre picchi di forza. Invece, nelle Figure 4.2 e 4.4, si ha solo un picco della forza seguito da un brusco decremento. I risultati ottenuti sono quindi in accordo con quelli ottenuti in letteratura nell'articolo [5].

4.2 Modello FEA

La costruzione del modello di compressione sull'alluminio è stata fatta partendo dal modello precedentemente validato per il caso di compressione su provini in carbon-nylon spiegato nel Capitolo 3.3. A questo modello sono stati modificati solamente i parametri relativi al materiale e alla proprietà. Nel dettaglio, nella sezione della proprietà è stato necessario cambiare il valore NITR relativo ai punti di integrazione, che, confrontando i risultati del modello con quelli sperimentali, è stato impostato pari a 2, ottenendo così 4 punti di integrazione, come riportato in Figura 3.23. Invece, il parametro L1, che rappresenta il raggio della sezione del beam, è stato settato a 0.6634. Quest'ultimo identifica il raggio effettivo che verrà attribuito al beam, misurato sul provino reale.

Nella Figura 4.6 vengono riportate le misurazioni effettuate tramite il microscopio elettronico a scansione sulla superficie alta del provino, piano XY, invece, nella Figura 4.7, vengono riportate le misurazioni fatte su una faccia laterale, piano XZ.

Queste misurazioni sono state molto importanti durante il processo di validazione del modello FEA, in quanto si è riscontrato che il diametro effettivo dei beam del provino, realizzato in alluminio, è inferiore al diametro del modello CAD; infatti, il valore nominale di 1.5mm non è stato trovato in nessuna misurazione. Confrontando le misurazioni effettuate sulla faccia superiore e quella laterale si è riscontrata una minore precisione sul piano laterale, infatti la media dei diametri sul piano XZ è pari a 1.309mm , invece sul piano XY si ha 1.340mm . Inoltre, dalle immagini relative alla faccia laterale, Figura 4.7, è possibile notare la presenza maggiore di difetti superficiali rispetto alle immagini catturate sulla faccia superiore.

Invece, per la definizione del materiale AlSi10Mg all'interno di Radioss è stato adottato lo stesso procedimento utilizzato per il carbon-nylon. Infatti, partendo dalla curva di trazione ingegneristica, tratta dallo studio *VHCF response of as-built SLM AlSi10Mg specimens with large loaded volume* [12], è stata ricavata la curva reale e selezionato il tratto plastico tramite le relazioni 3.7-3.8. La curva così ottenuta è riportata in Figura 4.8.

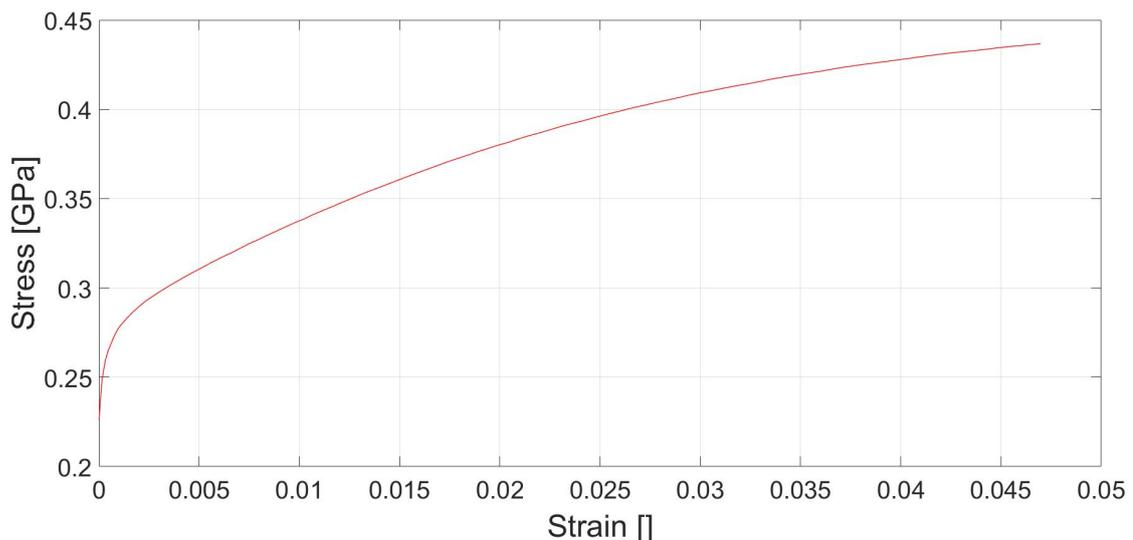


Figura 4.8. Tratto plastico della curva sforzo-deformazione reale dell'AlSi10Mg

Oltre alla curva, nella definizione dell'AlSi10Mg, sono stati inseriti i valori del modulo di Young E , la densità ρ , il coefficiente di Poisson ν e il valore di "failure plastic strain" ϵ_{p_max} . Quest'ultimo parametro indica il valore di deformazione a cui un elemento 1D si rompe. Questo parametro è stato necessario introdurlo per modellizzare al meglio il provino in alluminio. Infatti, omettendolo non si assisteva alla rottura della struttura e quindi l'andamento della forza rispetto allo spostamento non era coerente con il caso reale, come è possibile vedere dalla curva riportata in Figura 4.9. Il valore di ϵ_{p_max} è stato ottimizzato confrontando i risultati del modello con quelli dei test sperimentali. Invece, il valore del modulo di Young è stato ricavato partendo

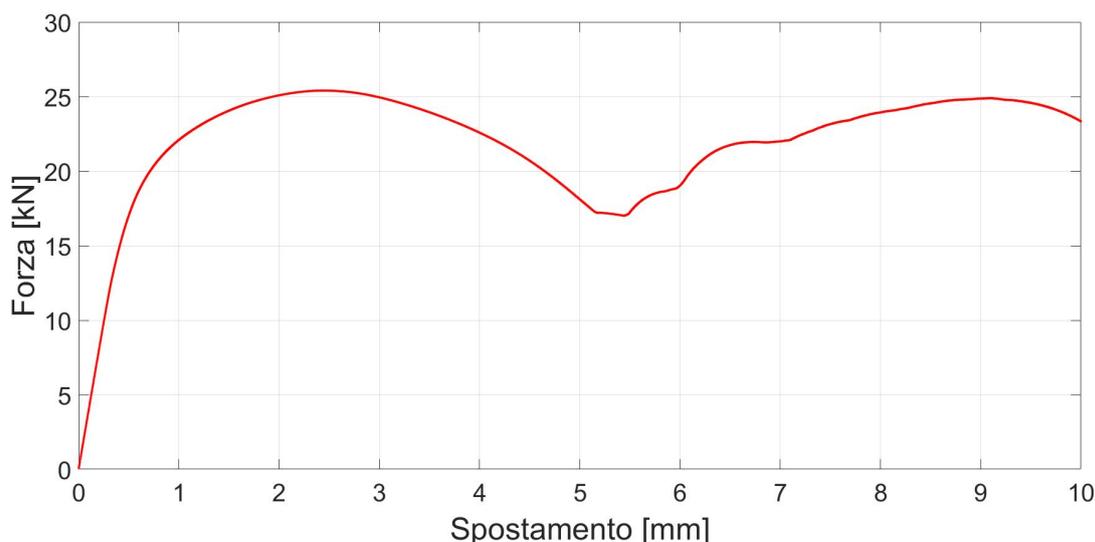


Figura 4.9. Andamento forza-spostamento del modello FEA senza un criterio di rottura

dai risultati ottenuti durante l’ottimizzazione dei parametri fatto per il modello di compressione sul carbon-nylon in accordo con l’articolo [9].

4.2.1 Validazione del modello FEA

I risultati ottenuti dal modello FEA, descritto in precedenza, sono stati confrontati con i risultati sperimentali.

In Figura 4.10 viene riportato l’andamento della forza rispetto allo spostamento sia di entrambi i test sperimentali, sia del modello FEA; tutte e tre le curve sono state tagliate allo stesso valore dello spostamento.

Per commentare dettagliatamente i risultati, si immagina di suddividere il grafico in tre parti. Nella prima parte, si può notare come i risultati del modello rispecchino molto accuratamente quelli sperimentali. Nella seconda parte, invece, uscendo dal tratto lineare, si nota una discrepanza maggiore dei risultati, in particolare sulla forza massima. Infatti, nei test sperimentali è stata misurata una forza massima di 27,25 kN e di 27.56 kN, rispettivamente nel primo e nel secondo test, invece, dal modello è stata ricavata una forza massima 24.88 kN. Questa differenza potrebbe essere dovuta all’anticipata plasticizzazione del materiale nel modello. Nell’ultimo tratto della curva, invece, si assiste al cedimento della struttura e, quindi, ad un decremento della forza resistente. In questa parte il modello rispecchia verosimilmente il decremento. I tratti di cedimento brusco sono dovuti al criterio di rottura utilizzato per la cancellazione degli elementi.

Invece, in Figura 4.11, è riportato l’andamento dell’energia assorbita rispetto allo spostamento.

In questo grafico è possibile notare un’ottima corrispondenza del modello rispetto ai dati sperimentali: infatti, l’energia assorbita, misurata nei test 1 e 2, è rispettivamente

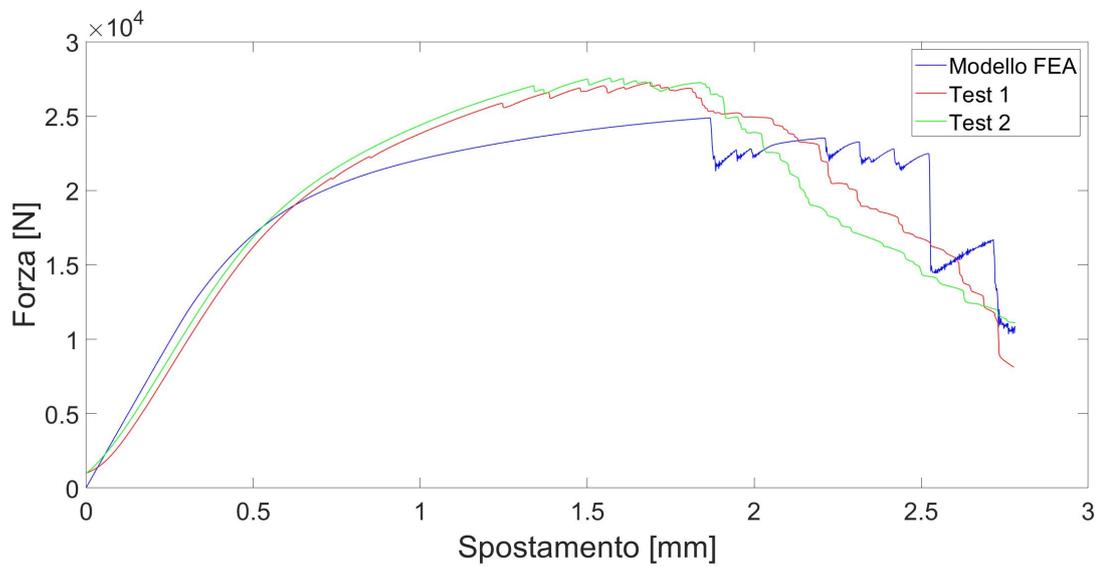


Figura 4.10. Confronto andamento Forza-Spostamento risultati FEA con test sperimentali

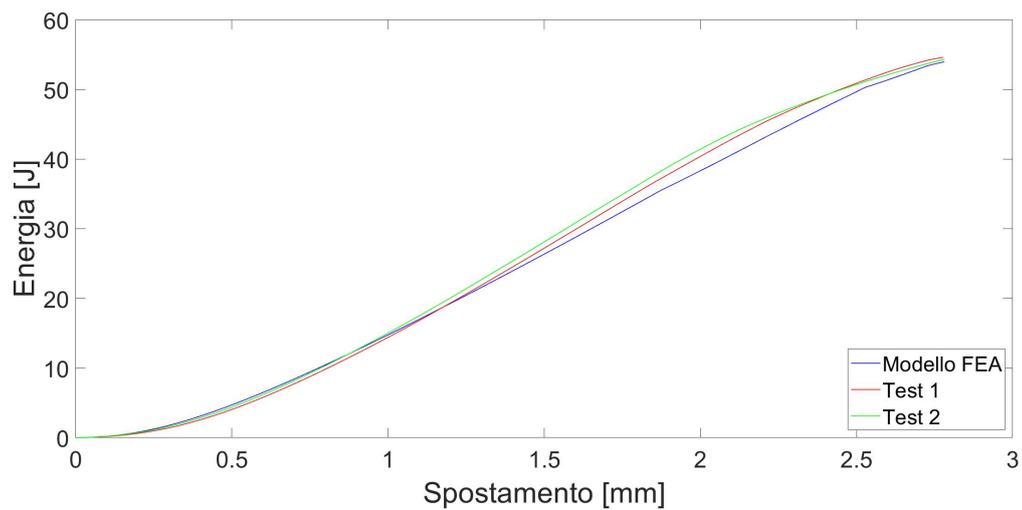


Figura 4.11. Confronto andamento Energia-Spostamento risultati FEA con test sperimentali

di 54.61 J e di 54.31 J. Invece, nel modello, si ha un valore di energia pari a 53.98 J, quindi si ha un errore inferiore al punto percentuale. Per completezza si riportato tutti i dati dei due test sperimentali e del modello in Tabella 4.3

Tabella 4.3. Risultati sperimentali e del modello sul provino E_01_04_01 in AlSi10Mg

Provino E_01_04_01				
		Test 1	Test 2	Modello FEA
Forza massima	[kN]	27.25	27.56	24.88
Energia massima	[J]	54.61	54.31	53.98

Capitolo 5

Drop-Dart Test

I test sperimentali riportati in questa sezione sono stati eseguiti con il macchinario CEAST 9350, illustrato in Figura 5.1. Questi test sono stati effettuati per valutare il comportamento della struttura in campo dinamico, in caso di impatti a bassa velocità. Quindi, eseguendo i test a diverse velocità, è stato possibile valutare il fenomeno dello strain-rate. Il macchinario, utilizzato per queste prove, è costituito da una camera



Figura 5.1. Macchinario CEAST 9350 per drop-dart test

chiusa in cui viene posizionato il provino. Sopra di essa è presente l'intero sistema che consente la caduta controllata sul provino di un impattatore. Quest'ultimo è fissato ad un sistema, guidato da due guide lineari, che permette di aggiungere massa in modo da poter caratterizzare i test in base all'esigenza. Appena sopra l'impattatore è montata una cella di carico piezoelettrica che permette di registrare l'andamento della forza durante la prova. I test si effettuano impostando al macchinario la massa totale che andrà ad impattare il provino e la velocità con cui impatta. In questo modo è già

possibile stimare l'energia che dovrà assorbire il provino tramite la relazione 5.1.

$$E_p = \frac{1}{2}Mv^2 \quad (5.1)$$

I test sono stati eseguiti sul provino E_01_04_01 realizzati in carbon-nylon e in alluminio AlSi10Mg. Per eseguire le prove sperimentali con il macchinario CEAST 9350, è stato necessario progettare un sistema di afferraggio adatto ai provini utilizzati. In Figura 5.2 viene illustrato l'intero sistema in cui viene posizionato il provino.



Figura 5.2. Sistema di afferraggio del provino nel macchinario CEAST 9350

Su quest'assieme è stato aggiunto solamente la base su cui viene poggiato il componente testato, riportata in Figura 5.3. Per evitare che la struttura lattice si muova durante il test, è stato realizzato un incavo di $5mm$ di profondità e con le stesse dimensioni del provino, in modo che quest'ultimo non si possa spostare sul piano d'appoggio. Un'altra modifica apportata al macchinario, prima di eseguire i test, è sull'impattatore. Infatti, per poter colpire il provino su tutta la sua superficie, è stato disegnato un impattatore con base quadrata di dimensioni di $50mm * 50mm$. Di conseguenza, è stato anche progettato un adattatore che permettesse di montare l'impattatore al sistema del macchinario già esistente. Sia l'impattatore che l'adattatore montati sul

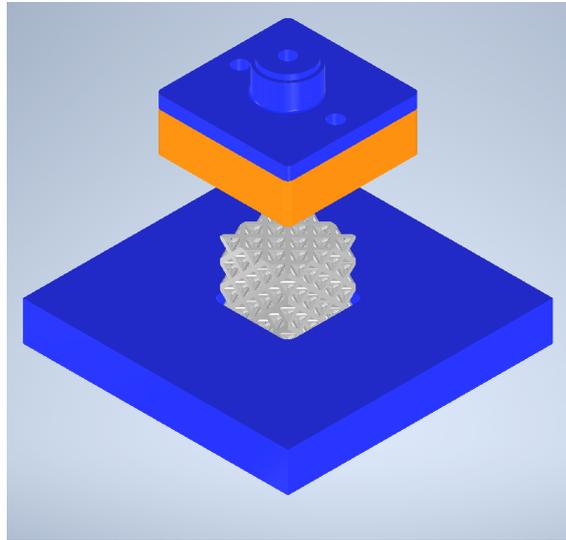


Figura 5.3. CAD base e impattore progettati per i drop-dart test

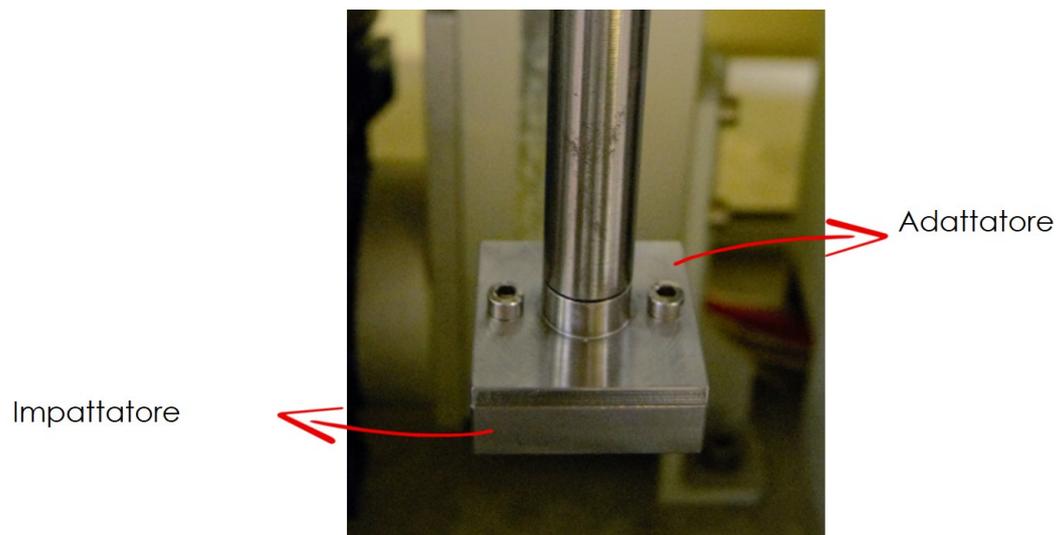


Figura 5.4. Impattore utilizzato durante i drop-dart test.

macchinario vengono riportati in Figura 5.4. Di seguito nelle Figure 5.5, 5.6 e 5.7 sono riportate le messe in tavola utilizzate per la produzione dei componenti realizzati per adattare il sistema esistente ai test eseguiti per questa tesi.

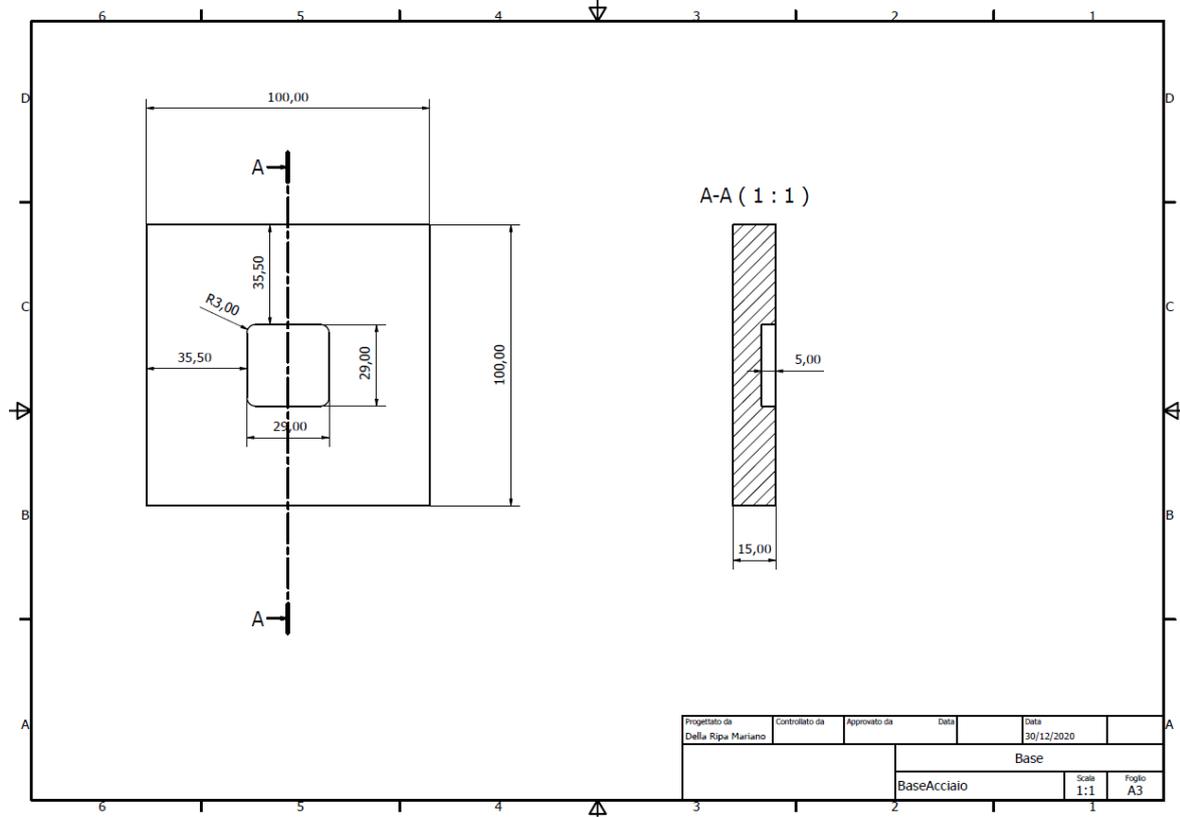


Figura 5.5. Tavola utilizzata per la realizzazione della base.

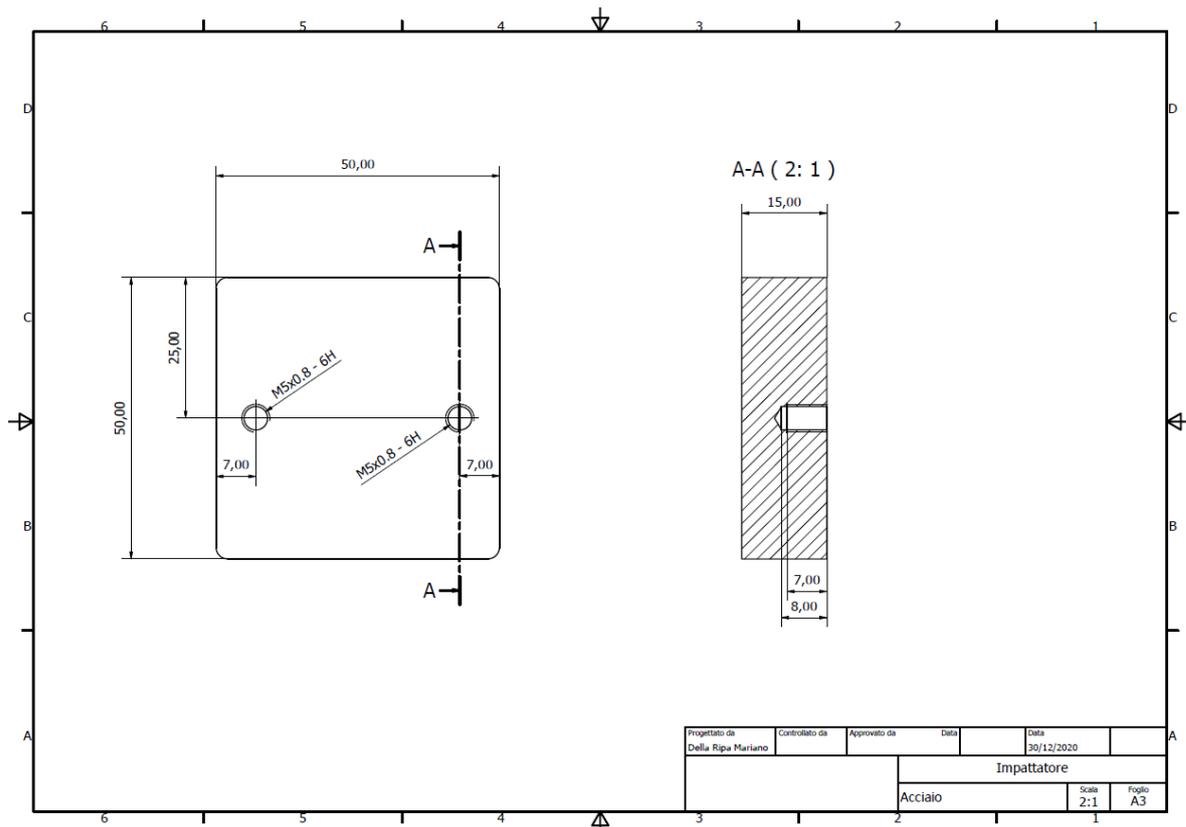


Figura 5.6. Tavola utilizzata per la realizzazione dell'impattatore.

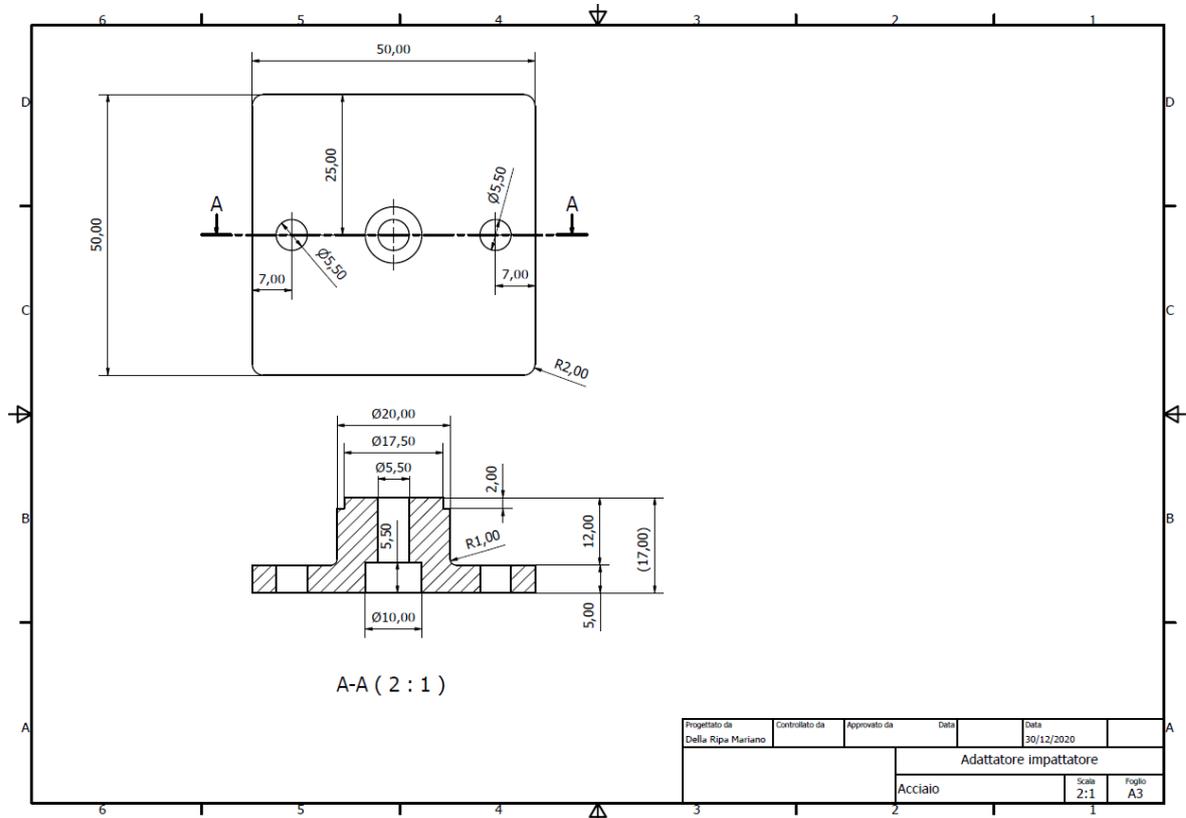


Figura 5.7. Tavola utilizzata per la realizzazione dell'adattatore.

5.1 Test sperimentali: validazione del sistema di prova

Eseguendo i test di drop-dart si ottiene come output l'andamento della forza in funzione del tempo. Quindi, per poter analizzare i risultati, è stato necessario lavorare sui dati ottenuti, in modo da ottenere la forza in funzione dello spostamento. Dopo aver traslato i dati sull'origine, conoscendo i valori della forza, è stato calcolato il valore dell'accelerazione tramite la relazione 5.2.

$$a = g - \frac{F}{M} \quad (5.2)$$

Dove:

- a accelerazione dell'impattatore;
- g accelerazione di gravità;
- F forza registrata dalla celle di carico sull'impattatore;
- M massa dell'intero sistema che impatta il provino.

Successivamente, con la relazione 5.3, è stata calcolata la velocità dell'impattatore durante la prova. La velocità v_0 è rilevata da un sensore ad effetto Hall durante i test. Questo valore è riferito all'istante prima dell'impatto, per questo, la velocità effettiva durante l'impatto, si ottiene sommando quella iniziale con quella ricavata integrando l'accelerazione rispetto al tempo.

$$v = v_0 + \int a dt \quad (5.3)$$

A questo punto, conoscendo la velocità, tramite la relazione 5.4 è stato ricavato lo spostamento (s).

$$s = \int v dt \quad (5.4)$$

Per validare il sistema sono stati fatti alcuni test sui provini realizzati in carbon-nylon. Queste prove hanno permesso di mettere a punto tutto il sistema per l'acquisizione dei dati e sono servite per verificare che il provino, durante i test, restasse nella posizione iniziale. Per questi test non è stata utilizzata una massa aggiuntiva, ma sono stati eseguiti solamente con la massa propria del sistema di caduta pari a $6.244kg$. Per verificare la corretta acquisizione della velocità v_0 sono stati eseguiti due test a velocità differenti. Nel primo test è stata impostata una velocità di $3.5m/s$ e per il secondo pari a $4.5m/s$.

Di seguito, in Figura 5.8 e in Figura 5.9, si riportano i risultati ottenuti dall'analisi dei dati dei test sui provini in carbon-nylon, in particolare si riporta l'andamento della forza in funzione dello spostamento. In entrambi i casi, nell'ultimo tratto della curva, si ha un decremento dello spostamento, questo è dovuto al rimbalzo dell'impattatore.

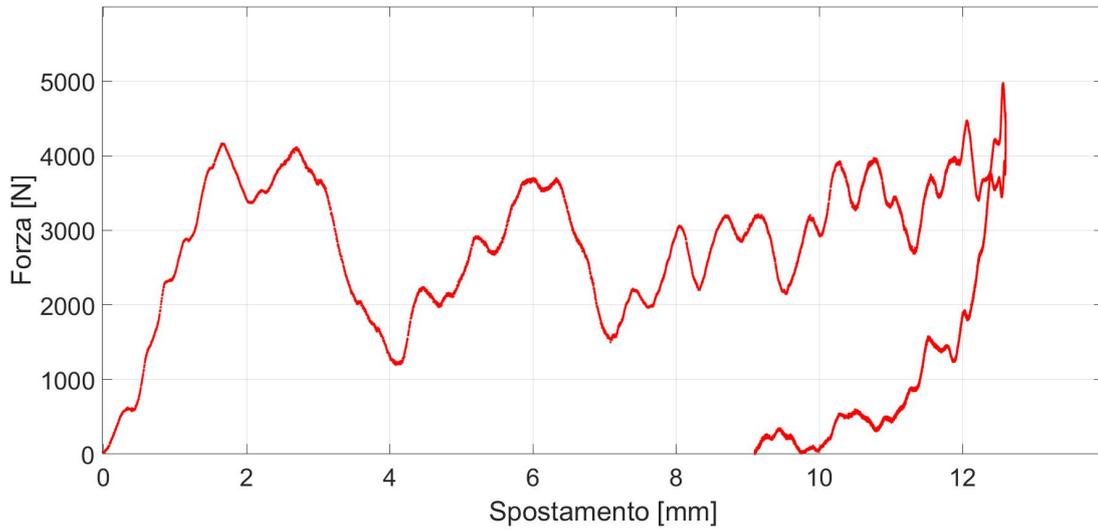


Figura 5.8. Forza-Spostamento drop-dart test 1 su carbon-nylon.

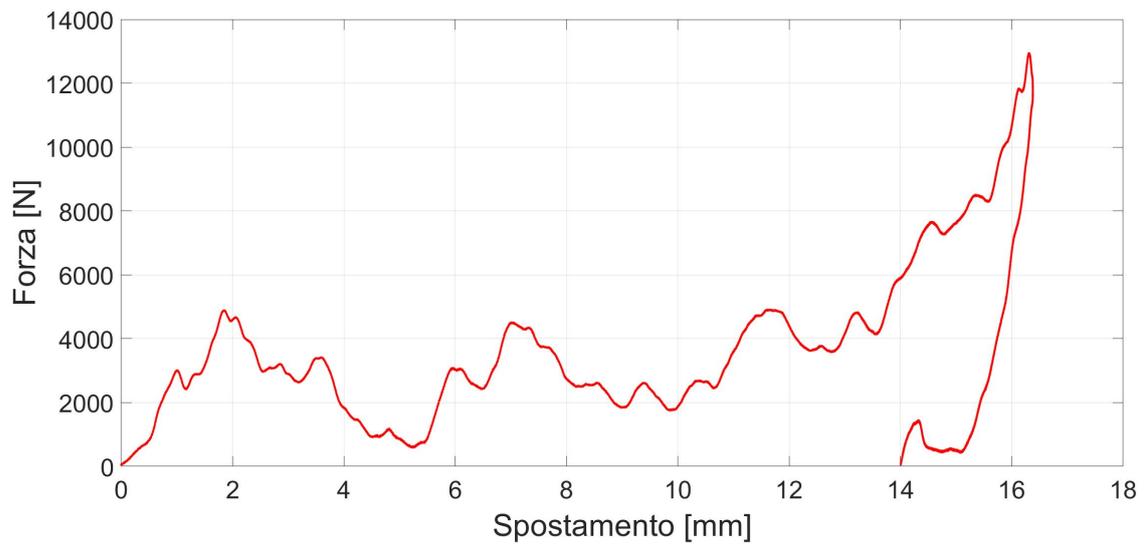


Figura 5.9. Forza-Spostamento drop-dart test 2 su carbon-nylon.

5.2 Drop Dart test su provini in AlSi10Mg

Dopo aver analizzato i dati ottenuti sui provini in carbon-nylon e controllato che il sistema funzionasse correttamente, sono stati eseguiti i test sui provini realizzati in lega di alluminio AlSi10Mg. Per poter verificare la ripetibilità dei test e allo stesso tempo valutare l'effetto dello strain-rate, sono stati effettuati in tutto quattro test, due per ogni variazione sul settaggio dei parametri. Nella Tabella si riportano tutti i valori impostati per questi test.

Tabella 5.1. Dati iniziali dei drop-dart test su provini in AlSi10Mg

Provino E_01_04_01				
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Massa [kg]	26.244	26.244	56.244	56.244
Velocità impostata [m/s]	3	3	2.2	2.2
Velocità rilevata [m/s]	2.910	2.914	2.073	2.071
Energia d'impatto [J]	111.12	111.42	120.85	120.62

Per poter confrontare i risultati dei test e per valutare il comportamento del materiale a diverse velocità, nella seconda coppia di test è stata diminuita la velocità rispetto ai primi due test ed è stata aumentata la massa del sistema di caduta, in modo da avere all'incirca la stessa energia in gioco in tutti e quattro i test. Per ogni prova vengono riportate due figure: la prima riporta quattro grafici in cui è possibile osservare l'andamento della forza, dell'accelerazione, della velocità e dello spostamento tutte in funzione del tempo; nella seconda figura, invece, viene riportato l'andamento della forza in funzione dello spostamento.

5.2.1 Drop-dart test a 3 m/s

In questo sottocapitolo vengono analizzati i dati relativi ai primi due test, in cui è stata impostata una velocità d'impatto di 3m/s e utilizzata una massa di 26.244kg . Da una prima analisi è possibile notare subito la ripetibilità dei dati. In entrambi i test il primo picco della forza è circa di 40kN ed è il più alto di tutti, questo è un tipico andamento che si ottiene in questa tipologia di test. In ottica di una progettazione di una crash-box, questo picco di forza deve essere più simile agli altri per non rendere il componente estremamente rigido. Continuando ad analizzare l'andamento della forza in funzione del tempo, si può notare la presenza, nella prima metà del grafico, di tre picchi con una media del valore della forza molto superiore al resto del test. Questi tre picchi, che vengono ritrovati in tutti i risultati analizzati, potrebbero essere la conseguenza della rottura della struttura graduale su ogni layer. Invece, nella seconda

parte del grafico, si assiste ad una netta diminuzione della forza resistente, questo è dovuto al cedimento completo della struttura: infatti, come già riscontrato nei test di compressione sui provini in alluminio, si assiste subito alla rottura sulla diagonale del provino, come è possibile vedere dalle immagini riportate nelle Figure 5.12 e 5.15, che sono rispettivamente le immagini relative ai provini del test 1 e 2 dopo la prova. Dopo questa rottura, la struttura vede un netto decremento delle proprietà meccaniche. Infine, sull'ultima parte della curva è possibile notare il rimbalzo: infatti, si assiste ad un diminuzione del valore dello spostamento. Su entrambi i provini si può notare su almeno una faccia la rottura lungo entrambe le diagonali, che ha comportato la rottura completa dell'intero angolo del provino.

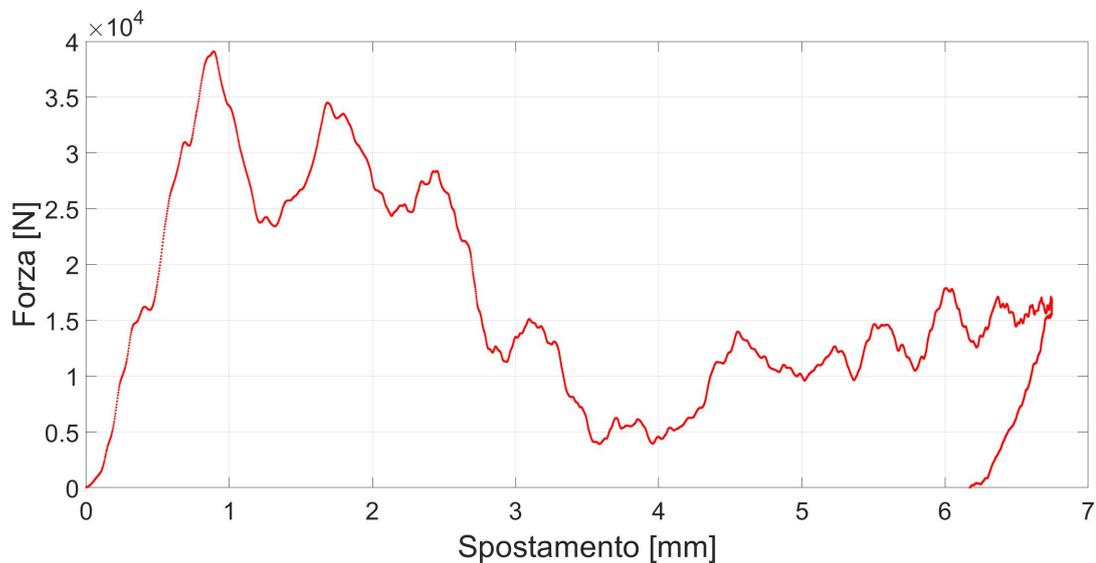


Figura 5.10. Forza-Spostamento drop-dart test 1 su AlSi10Mg.

Tabella 5.2. Risultati dei drop dart test 1 e 2

Provino E_01_04_01			
		Test 1	Test 2
Forza massima	[kN]	39.1	40.1
Energia massima	[J]	113.1	113.3

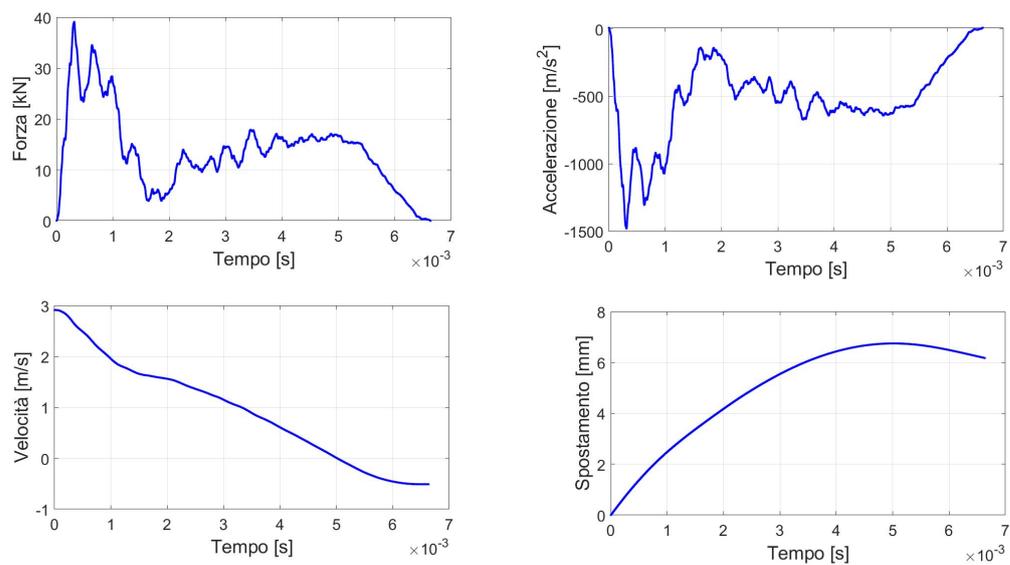


Figura 5.11. Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 1 su AISi10Mg.

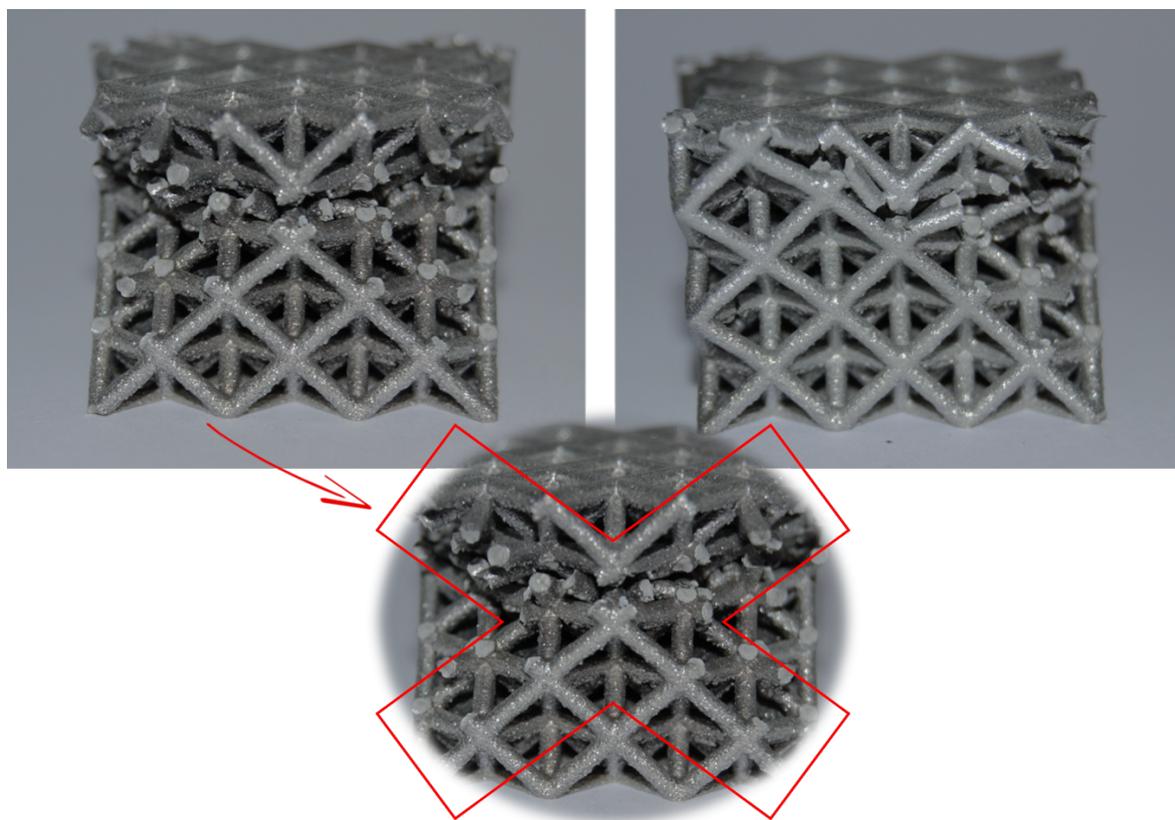


Figura 5.12. Rottura del provino utilizzato nel test 1

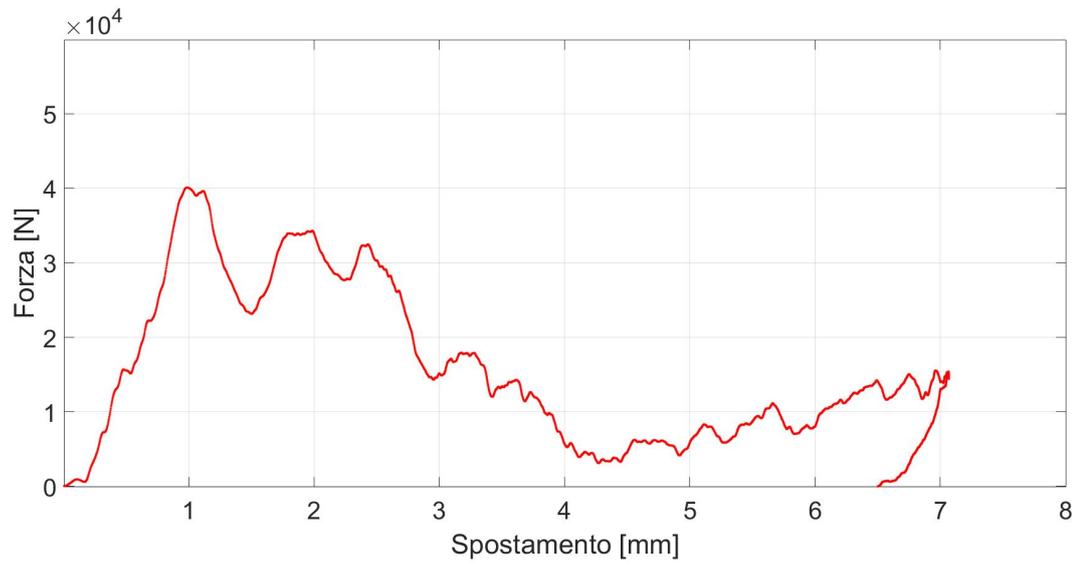


Figura 5.13. Forza-Spostamento drop-dart test 2 su AlSi10Mg.

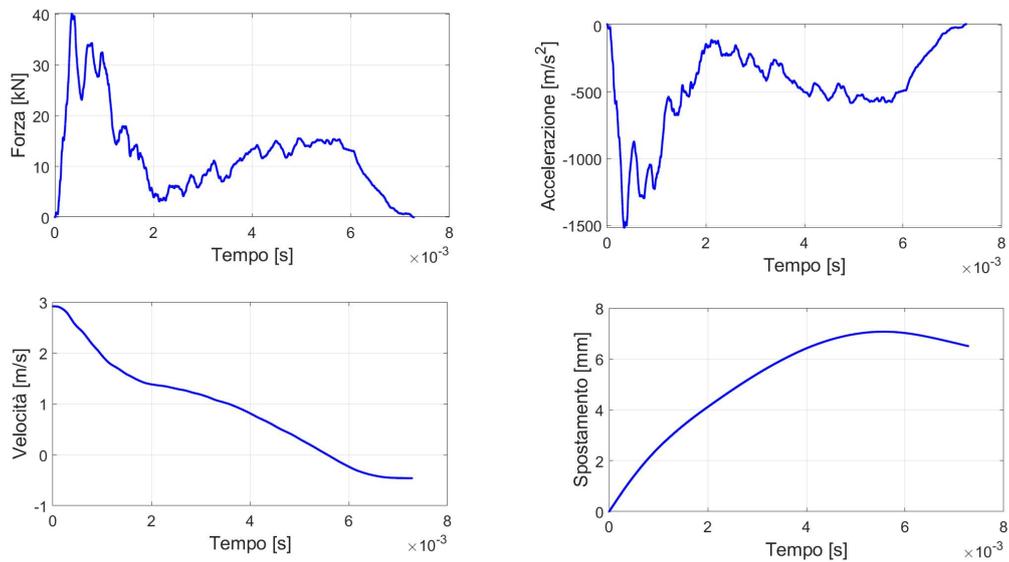


Figura 5.14. Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 2 su AlSi10Mg.

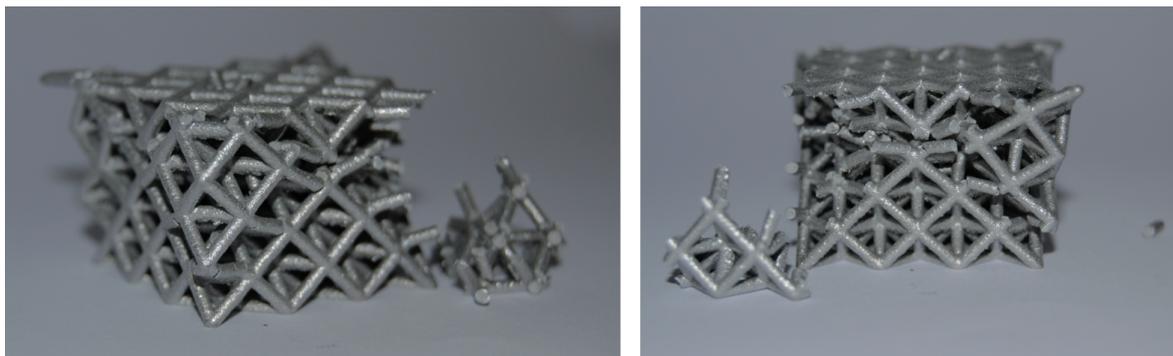


Figura 5.15. Rottura del provino utilizzato nel test 2

5.2.2 Drop-dart test a 2.2 m/s

In questa sezione vengono analizzati i dati ottenuti nel terzo e quarto test, in cui è stata utilizzata una massa di 56.244kg e impostata una velocità pari a 2.2m/s . Anche in questi test, osservando i risultati, è possibile affermare che si sono ottenuti risultati molto ripetibili. Analizzando l'andamento della forza in funzione dello spostamento è possibile subito notare un andamento molto simile ai test commentati in precedenza. Infatti, si osservano nella prima parte del grafico i tre picchi della forza. Tuttavia a differenza dai precedenti andamenti, i tre valori sono molto simili tra loro e il massimo valore registrato non è sul primo picco ma nei successivi. Nella seconda parte dei grafici, si assiste ad una netta diminuzione della forza. Inoltre, è possibile notare dall'ultimo tratto della curva, l'effetto del rimbalzo. Una peculiarità che è possibile notare su questi test, è la differente rottura avuta sui provini. Infatti, come è possibile vedere dalle immagini riportate nelle Figure 5.18 e 5.21, si ha una rottura netta su una singola diagonale. Questo comportamento è differente da quello riscontrato nei due test precedenti dove la rottura avveniva su entrambe le diagonali. Questa differenza potrebbe essere correlata alla velocità dell'impatto. Per poter comprendere le cause effettive di questa differenza è opportuno approfondire quest'aspetto facendo ulteriori analisi.

Tabella 5.3. Risultati dei drop dart test 3 e 4

Provino E_01_04_01			
		Test 1	Test 2
Forza massima	$[kN]$	34.9	33.2
Energia massima	$[J]$	125.22	124.84

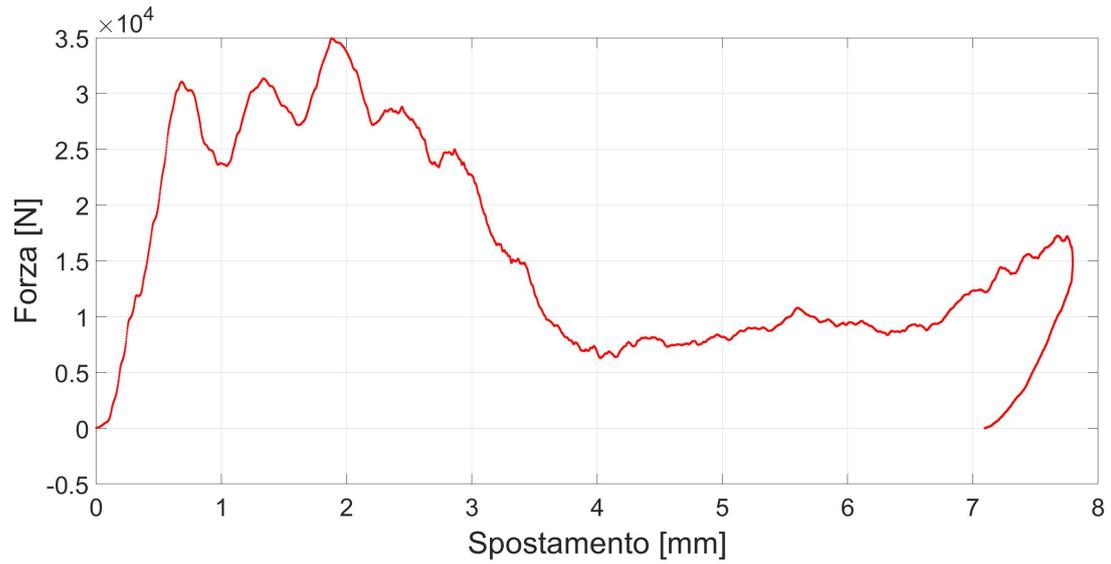


Figura 5.16. Forza-Spostamento drop-dart test 3 su AlSi10Mg.

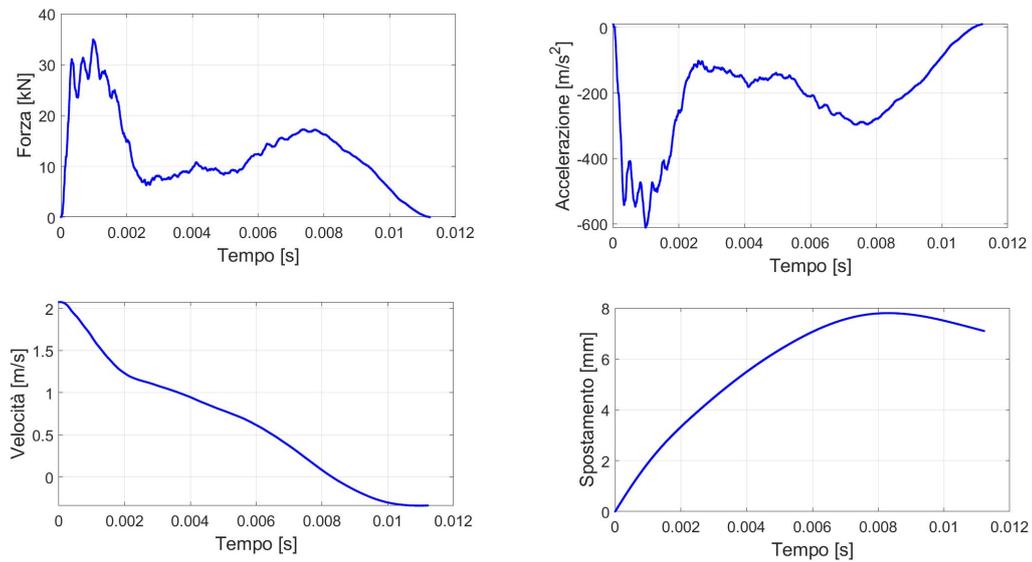


Figura 5.17. Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 3 su AlSi10Mg.

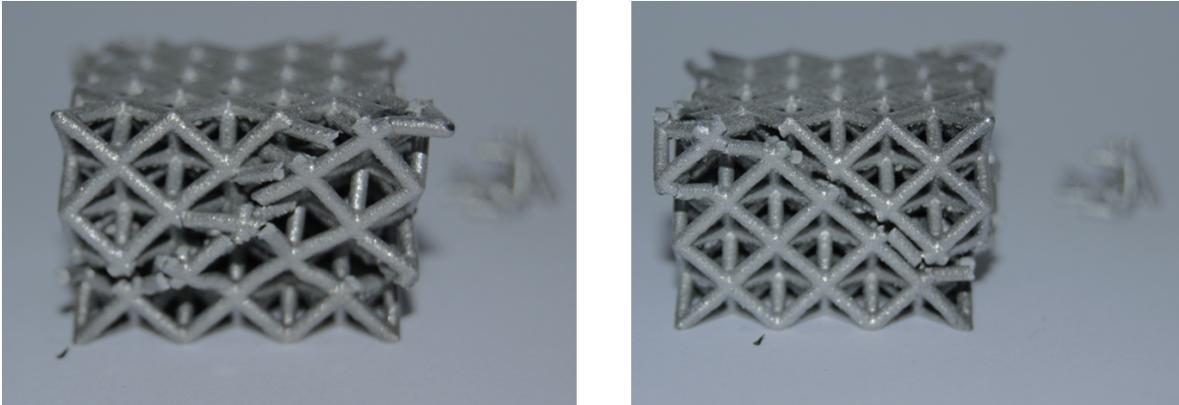


Figura 5.18. Rottura del provino utilizzato nel test 3

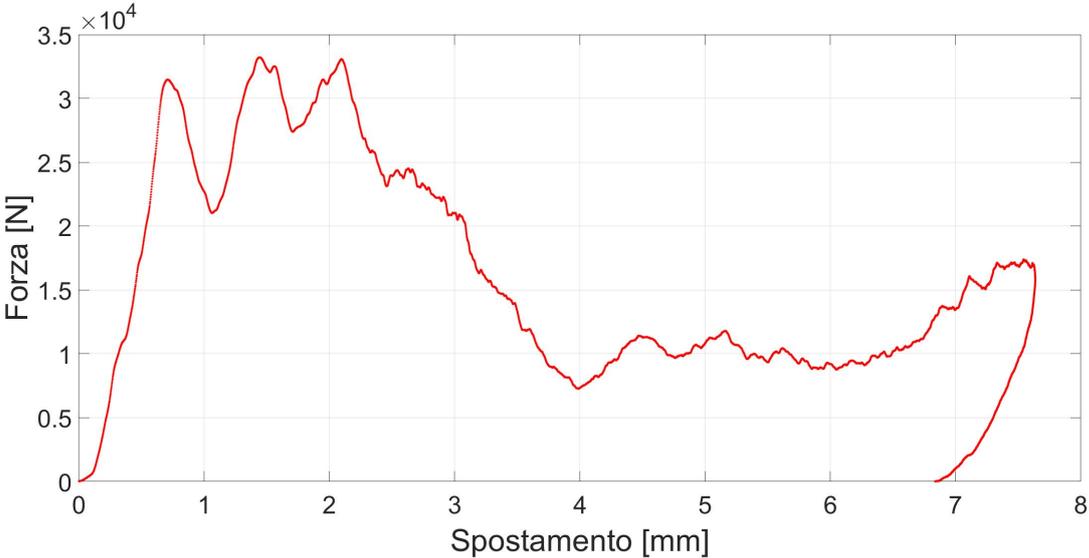


Figura 5.19. Forza-Spostamento drop-dart test 4 su AlSi10Mg.

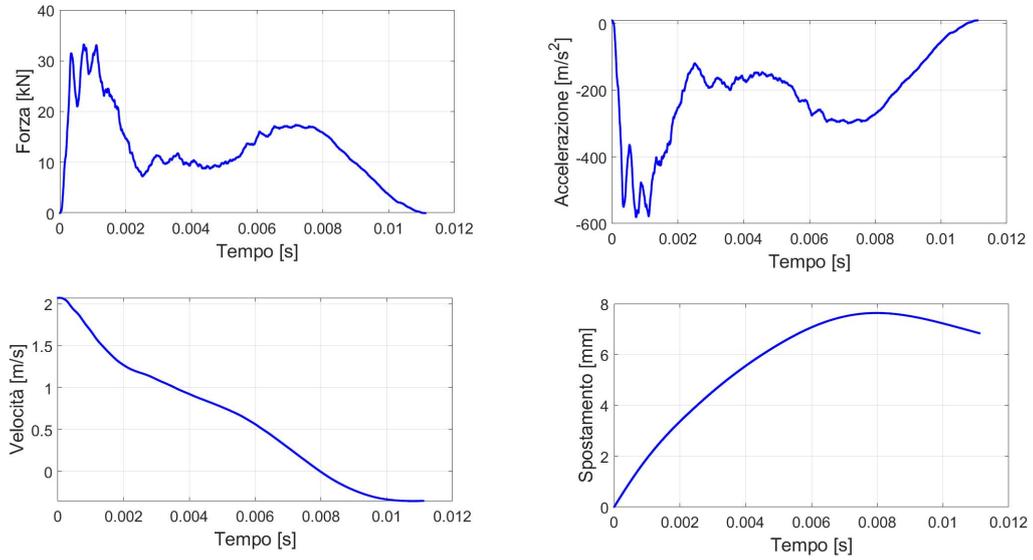


Figura 5.20. Forza, accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo nel test 4 su AlSi10Mg.

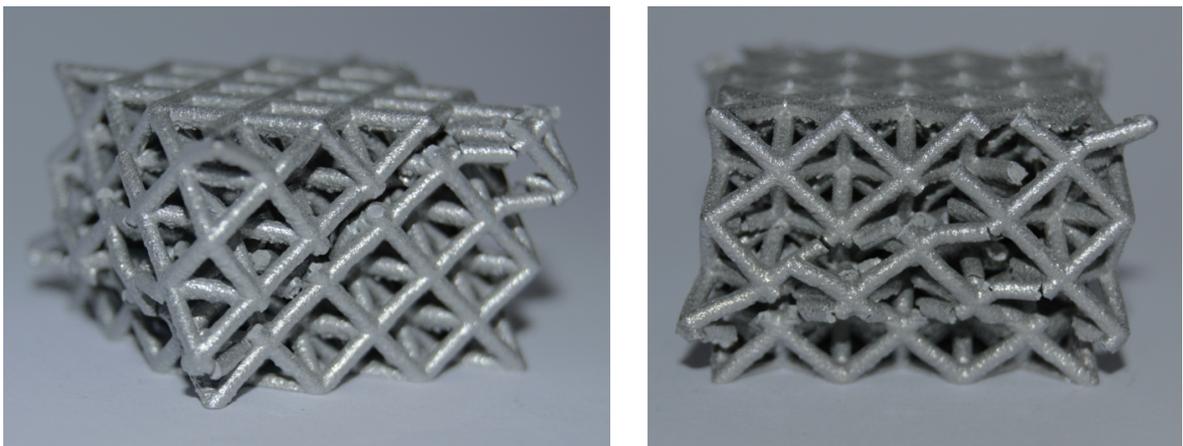


Figura 5.21. Rottura del provino utilizzato nel test 4

5.2.3 Valutazione dell'effetto di strain-rate

Confrontando l'andamento della forza in funzione dello spostamento di tutti i test eseguiti sui provini in AlSi10Mg, quindi, sia dei test di compressione sia dei drop-dart test, si può valutare la risposta del materiale in funzione della velocità di applicazione del carico. In Figura 5.22 si riportano tutte le curve forza-spostamento dei vari test eseguiti, in cui è possibile subito notare la differenza sul valore di forza massima registrata in ogni test. Questo è un primo fattore che sottolinea come il materiale e la struttura utilizzata si comportano in modo molto differente in base alla velocità di applicazione del carico. Infatti, nel caso della compressione quasi statica si è registrato un valore di forza massima di circa $27kN$, invece, nei due casi di drop-dart, a velocità differenti, si è passati a $35kN$ con velocità di $2.2m/s$ e a $40kN$ con velocità di $3m/s$. Un'altra caratteristica che si può vedere dal grafico e che evidenzia l'effetto di strain-rate dei casi analizzati, è sul primo tratto della curva dove è possibile valutare il carico in cui si esce dal tratto lineare, infatti, si passa da circa $15kN$ nel caso della compressione a $31kN$ e $39kN$ nei casi di drop-dart test.

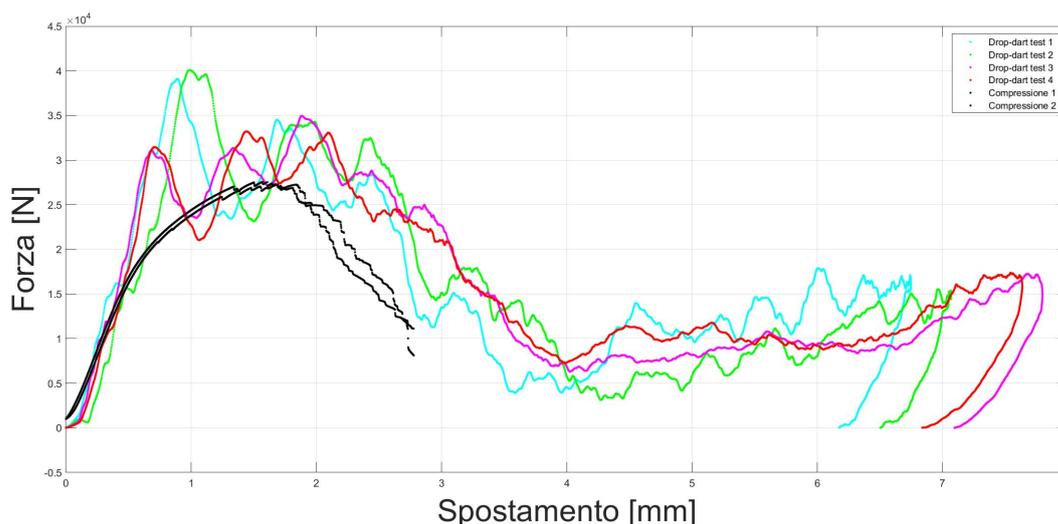


Figura 5.22. Forza-Spostamento dei 6 test: 4 dinamici e 2 quasi-statici.

5.3 Modello FEA: test d'impatto

Il modello FEA per i test di drop-dart è stato costruito partendo dal modello precedentemente utilizzato per i test di compressione, spiegato nel Capitolo 3.3. Per poter simulare l'impattatore è stato inserito un piano infinitamente rigido a cui è stata assegnata la massa e la velocità con cui iniziare ad impattare la geometria. Dopo il confronto dei primi dati del modello con quelli sperimentali, si è ritenuto opportuno modellare anche la base di appoggio del provino in modo da avere lo stesso comportamento della geometria in fase di densificazione. Per la creazione della base,

sono stati utilizzati degli elementi 2D a cui è stata assegnata la proprietà P1_SHELL, in cui è stato inserito il valore dello spessore da assegnare agli elementi. Poiché la base è stata realizzata in acciaio ed essendo molto più resistente dei provini utilizzati, realizzati in alluminio e carbon-nylon, durante i test non si sono introdotti fattori dovuti alla deformazione della base. Per questo motivo, nel modello, la base è stata modellizzata con un materiale LAW1 inserendo solamente il modulo di Young E , la densità ρ e il coefficiente di Poisson ν . Inoltre, per poter simulare il contatto tra la base e il provino, è stata utilizzata un'interfaccia di tipo 7, la quale permette di ricreare un contatto tra elementi 1D e 2D. Infatti, questa è un'interfaccia che modella il contatto tra una superficie master, in questo caso la base, e un gruppo di nodi slave, nodi della mesh 1D del provino. Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche di questa tipologia di contatto:

- Un nodo può essere allo stesso tempo un nodo slave e un nodo master;
- Ogni nodo slave può avere un impatto su ogni segmento master, tranne se è collegato a questo segmento;
- Un nodo può avere un impatto su più di un segmento;
- Un nodo può avere un impatto sui due lati, sui bordi e sugli angoli di ogni segmento.

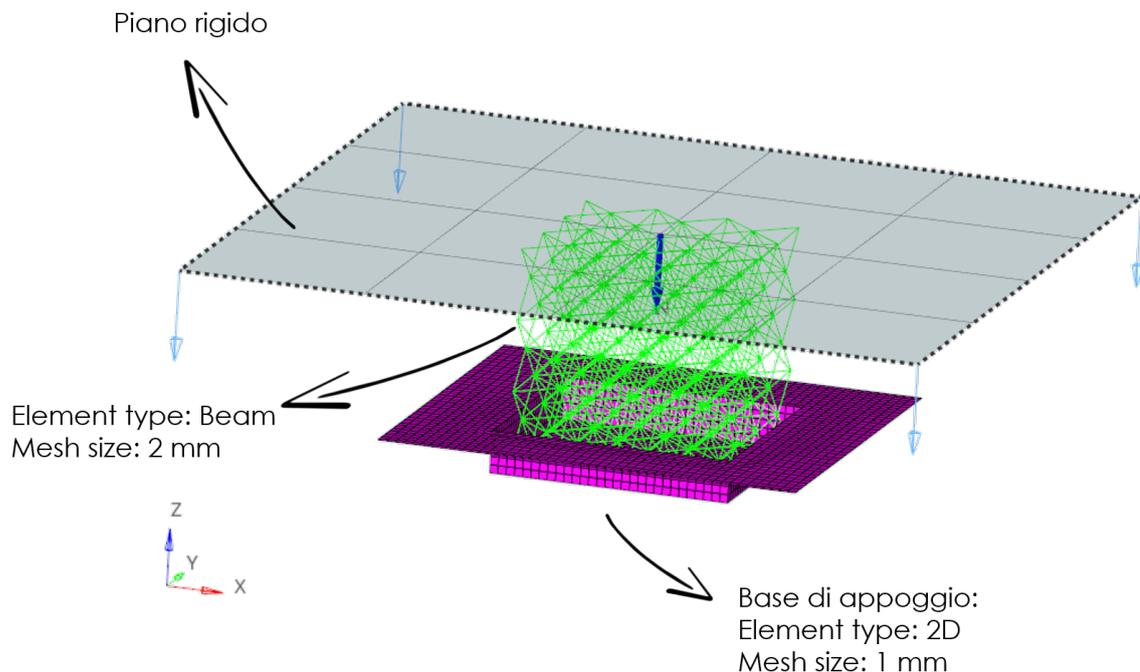


Figura 5.23. Modello FEA drop-dart test

La definizione del materiale è stata fatta partendo da quella impostata nel modello della compressione dei provini in alluminio. Oltre ai dati riportati nel Capitolo 4.2, è

stato necessario introdurre dei parametri aggiuntivi per poter tener conto dell'effetto dovuto allo strain-rate. Questo è stato fatto, in prima approssimazione, inserendo un fattore moltiplicativo che va a modificare la curva sforzo-deformazione già inserita e il valore di $\dot{\epsilon}$. Quest'ultimo parametro è possibile calcolarlo dividendo la velocità iniziale v_0 , misurata in ogni test, per l'altezza del provino. Questo parametro così ottenuto è il valore, in prima approssimazione, che è possibile utilizzare per poter modellizzare l'effetto dello strain-rate. Per comprendere meglio come vengono utilizzati questi parametri inseriti sul software, si riporta in Figura 5.24 un esempio di come i parametri inseriti vengono utilizzati da Radioss.

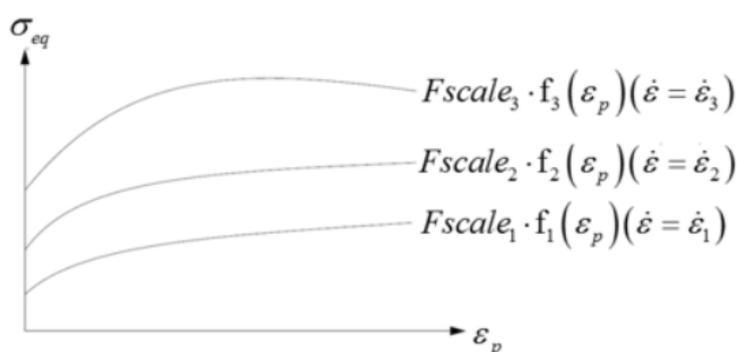


Figura 5.24. Esempio di modellizzazione dello strain-rate in radioss

In Figura 5.25 viene riportata la tabella dei dati inseriti in Radioss. Nella prima colonna vengono elencate le curve sforzo deformazioni caricate, nella seconda colonna si trovano i valori moltiplicativi che andranno a scalare i singoli valori delle rispettive curve e nell'ultima colonna sono riportati i valori del $\dot{\epsilon}$. Nel caso riportato è stata inserita in tutte e quattro le righe la curva sforzo-deformazione statica e moltiplicata caso per caso. Nella prima riga della tabella non è stato inserito nessun valore poiché rappresenta la modellizzazione del caso statico; nella seconda riga, invece, è stato inserito il valore di $\dot{\epsilon}$ calcolato con i dati del test 3; infine, nella terza riga è stato inserito il valore di $\dot{\epsilon}$ ricavato con i dati relativi al test 1. Mentre, i fattori moltiplicativi, sia della seconda che della terza riga, sono stati ottenuti confrontando i risultati del modello con quelli sperimentali. Infine, i valori inseriti nella quarta riga sono stati impostati in modo da non lasciare al software la completa libertà di estrapolazione dei dati a velocità elevate.

ftc_ID	Fscale	Eps_dot
1 (2) AISi10Mg	0.0	0.0
2 (2) AISi10Mg	1.5	0.0767
3 (2) AISi10Mg	1.6	0.1077
4 (2) AISi10Mg	1.6	10000.0

Figura 5.25. Parametri inseriti per modellizzare l'effetto dello strain-rate

Tutti i parametri ottimizzati sono stati ottenuti confrontando ad ogni variazione i risultati del modello con quelli sperimentali dei test 1 e 2. Dopo aver trovato una risposta accettabile in questi due casi, cambiando solo la velocità d'impatto e la massa del piano rigido, è stata eseguita l'analisi nel caso dei test 3 e 4. In questo modo è stato possibile capire il corretto comportamento del modello al variare della velocità. In Figura 5.26 e in Figura 5.27 è possibile confrontare l'andamento della forza in funzione dello spostamento tra il modello FEA e i primi due test sperimentali.

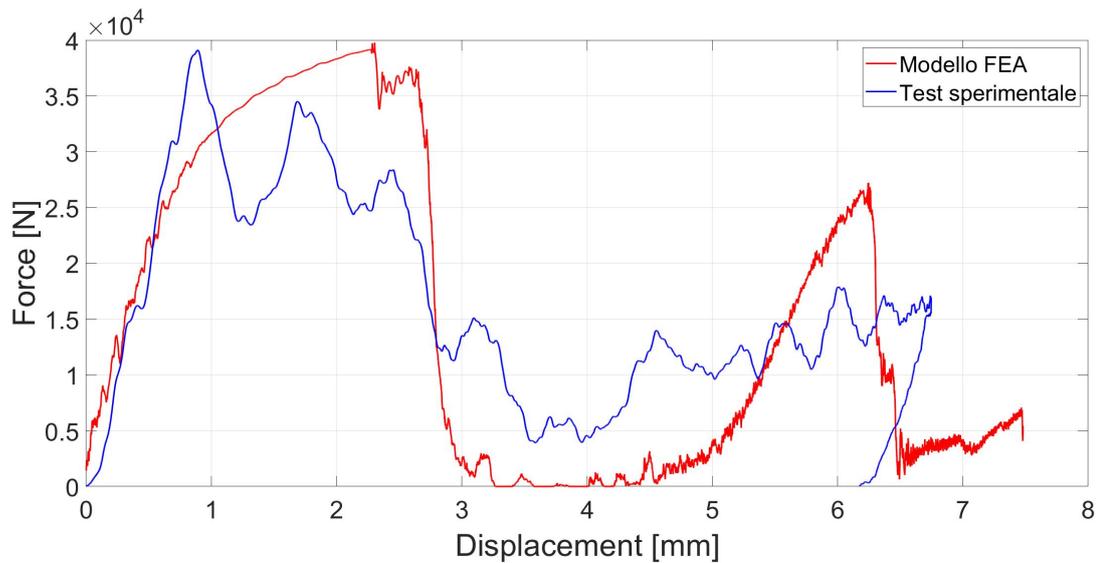


Figura 5.26. Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 1

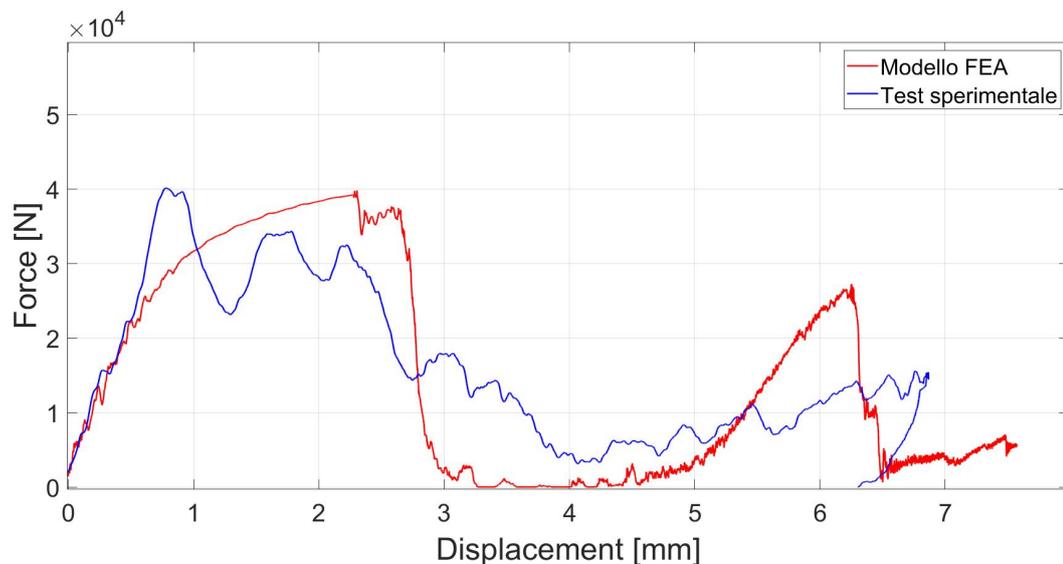


Figura 5.27. Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 2

Il modello permette di descrivere in modo abbastanza accurato il comportamento

trovato sperimentalmente, anche se con alcune differenze più accentuate in alcune regioni. Nel primo tratto, relativo alla rigidità del provino, la curva del modello FEA è molto vicina alla curva reale. Inoltre il modello permette di determinare in modo accurato la forza massima, con una differenza inferiore al 2%. Al contrario, utilizzando un modello con dei criteri di rottura che comportano la cancellazione dell'elemento, la differenza tra il modello numerico e la curva sperimentale è più accentuata a partire da deformazioni superiori a 3 mm, dove gli effetti della densificazione prevalgono. L'ultimo parametro che possiamo confrontare, il più importante studiando prove d'impatto, è l'energia assorbita. Infatti, in Figura 5.28 e in Figura 5.29, è possibile confrontare gli andamenti dell'energia in funzione dello spostamento. Il parametro più interessante da osservare è sicuramente l'energia assorbita alla fine del test, dove per il modello l'energia assorbita è pari a $112.79J$, invece, nel test sperimentale è $113.09J$. Quindi, su quest'ultimo parametro si ha un errore dello 0.2%, questo conferma che il modello rispecchia i test sperimentali nei punti principali del test.

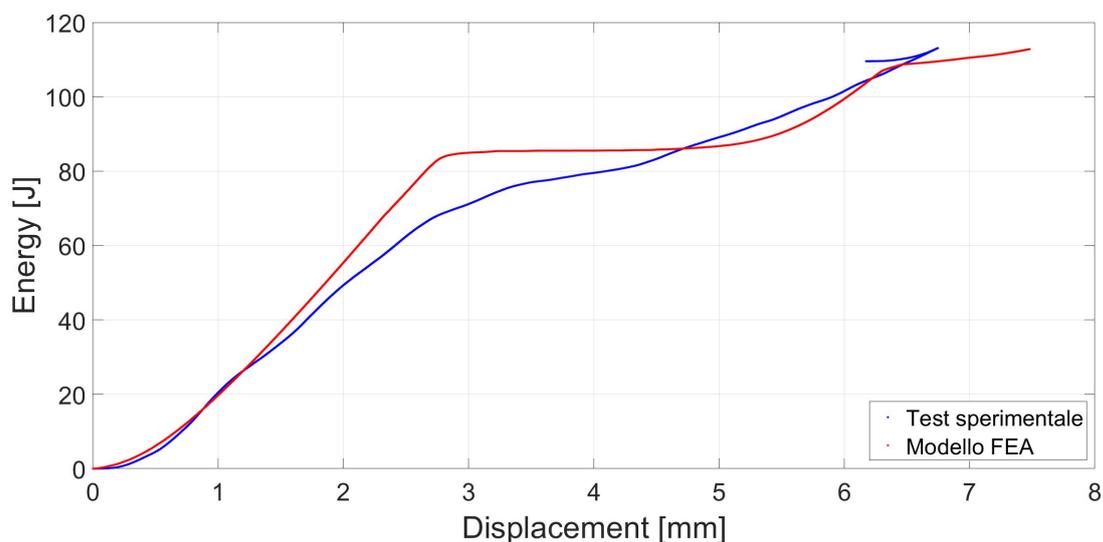


Figura 5.28. Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 1

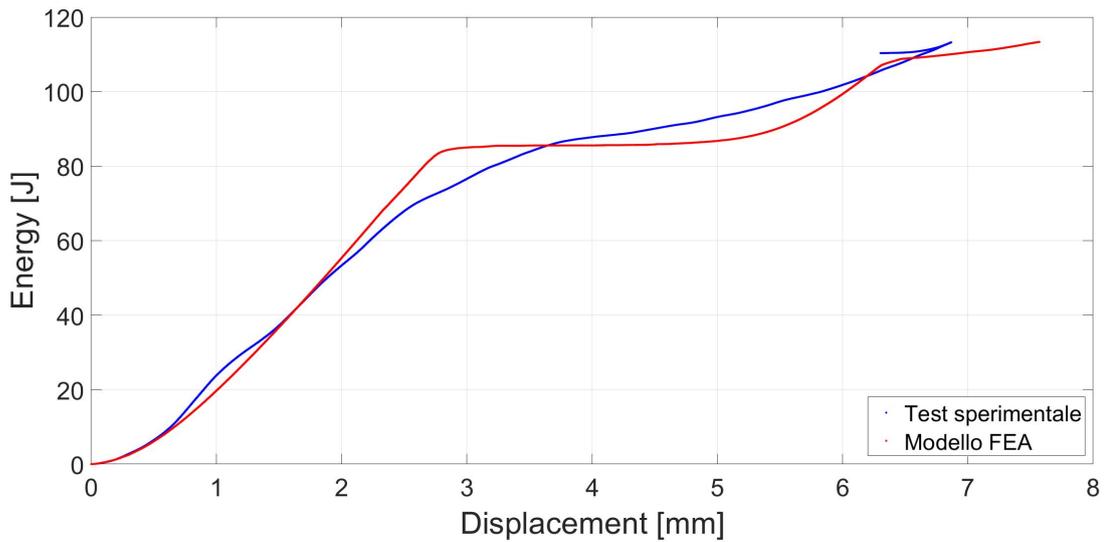


Figura 5.29. Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 2

5.3.1 Validazione modello FEA: test d'impatto

Per completare il confronto dei risultati tra il modello FEA e quelli sperimentali è stato eseguita l'analisi con lo stesso modello fin qui utilizzato, ma cambiando solo la massa e la velocità d'impatto al piano rigido. Nei grafici nelle Figure 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33 è possibile confrontare l'andamento forza-spostamento e energia-spostamento tra il modello FEA e gli ultimi due test, eseguiti a velocità più bassa rispetto ai primi due.

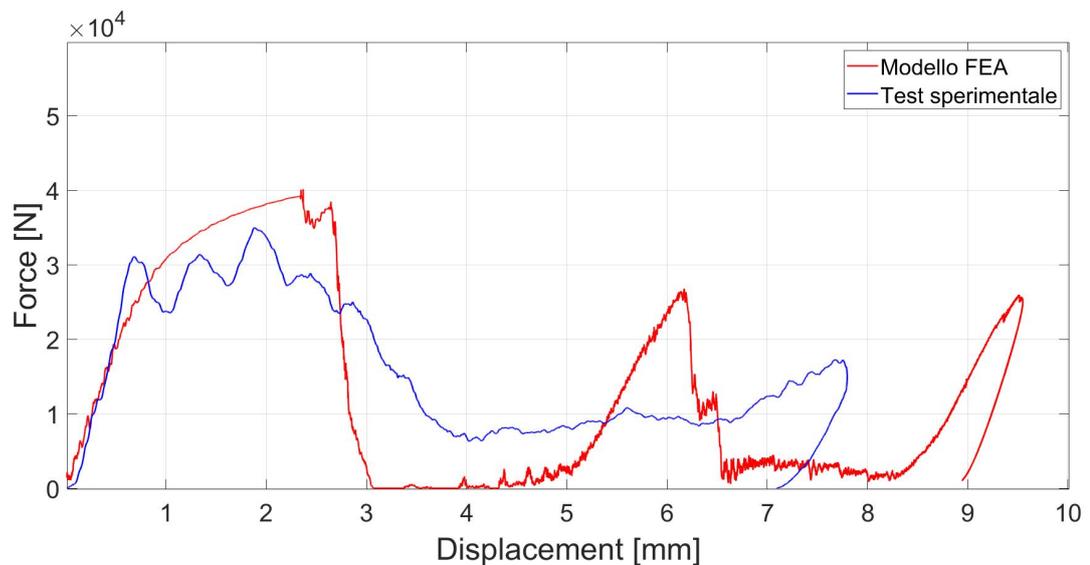


Figura 5.30. Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 3

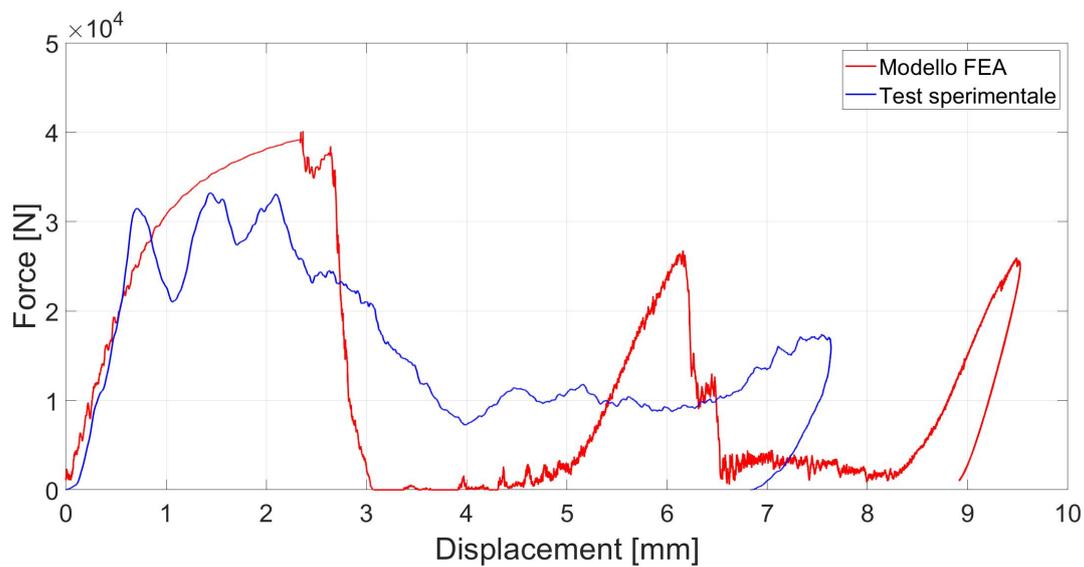


Figura 5.31. Confronto andamento forza-spostamento tra modello FEA e test 4

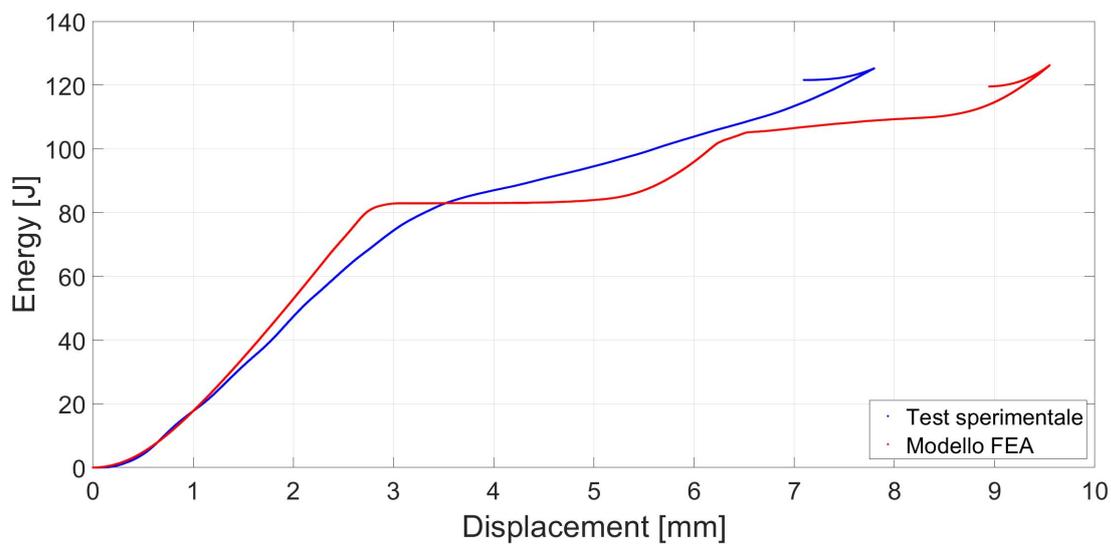


Figura 5.32. Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 3

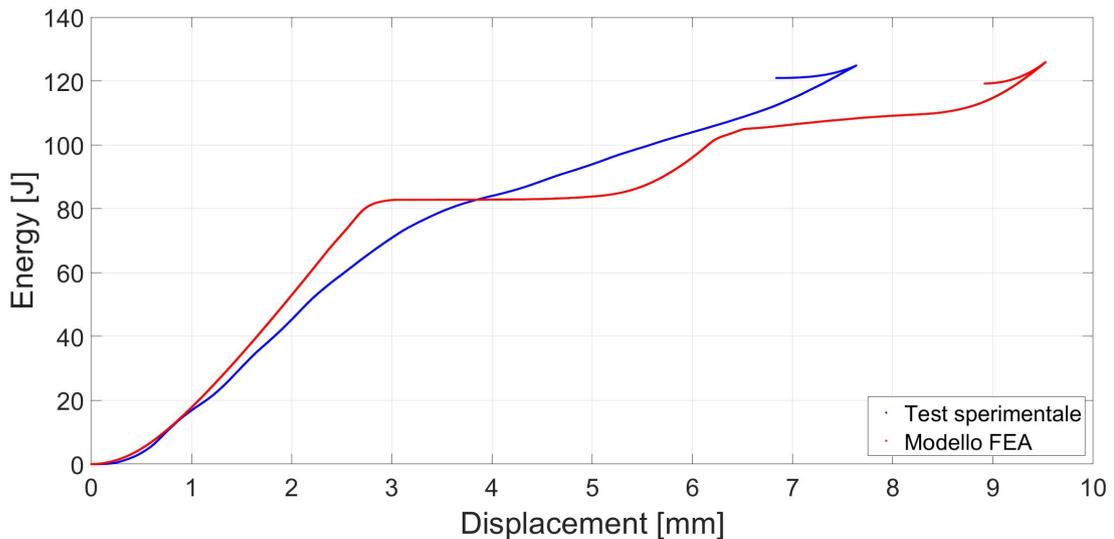


Figura 5.33. Confronto andamento energia-spostamento tra modello FEA e test 4

Il modello è in grado di predire in modo abbastanza accurato la pendenza nel primo tratto. Al contrario la il modello numerico presenta un picco di forza maggiore, con una differenza di 14%. Passando ad analizzare l'andamento dell'energia, è possibile vedere che qui il modello rispecchia la realtà: infatti, nel test sperimentale è stata misurata un energia di $125.22J$ invece con il modello è stato registrato un valore paria a $126.19J$, quindi avendo un errore del 0.77%. Anche in questo caso, a causa dell'approssimazione con elementi 1D, la zona di densificazione non viene modellata in modo corretto.

5.4 Considerazioni conclusive sul modello FEA

Durante lo studio sono stati realizzati due modelli FEA, uno sulle prove di compressione e uno sulle prove d'impatto. In entrambi, per la modellazione del provino sono stati utilizzati gli elementi 1D. Questa scelta è stata fatta per poter ottenere dei risultati realistici in tempi di calcolo brevi. Infatti, entrambi i modelli richiedono tempi di risoluzione inferiore ai 10 minuti. Per poter valutare il guadagno a livello di tempo, è stata fatta una simulazione di compressione sui provini in AlSi10Mg, utilizzando un modello con elementi 3D, in cui il calcolo ha richiesto circa 80 ore.

Nel modello delle prove di compressione, si sono ottenuti risultati molto realistici. Le simulazioni rispecchiano i risultati sperimentali, sia negli andamenti di forza ed energia in funzione dello spostamento, sia nei modi di rottura dei provini. Per i test d'impatto il modello è stato modificato introducendo dei parametri in modo da ottenere dei risultati accettabili. In questo modello, avendo utilizzato dei criteri di rottura che prevedono la cancellazione degli elementi, alcuni aspetti non possono essere tenuti in

considerazione. Uno di questi è il fenomeno della densificazione; infatti, in Figura 5.34, nel tratto indicato, non viene registrata alcuna forza resistente in quanto gli elementi arrivati a rottura sono stati eliminati dal software, quindi, non danno più il loro contributo.

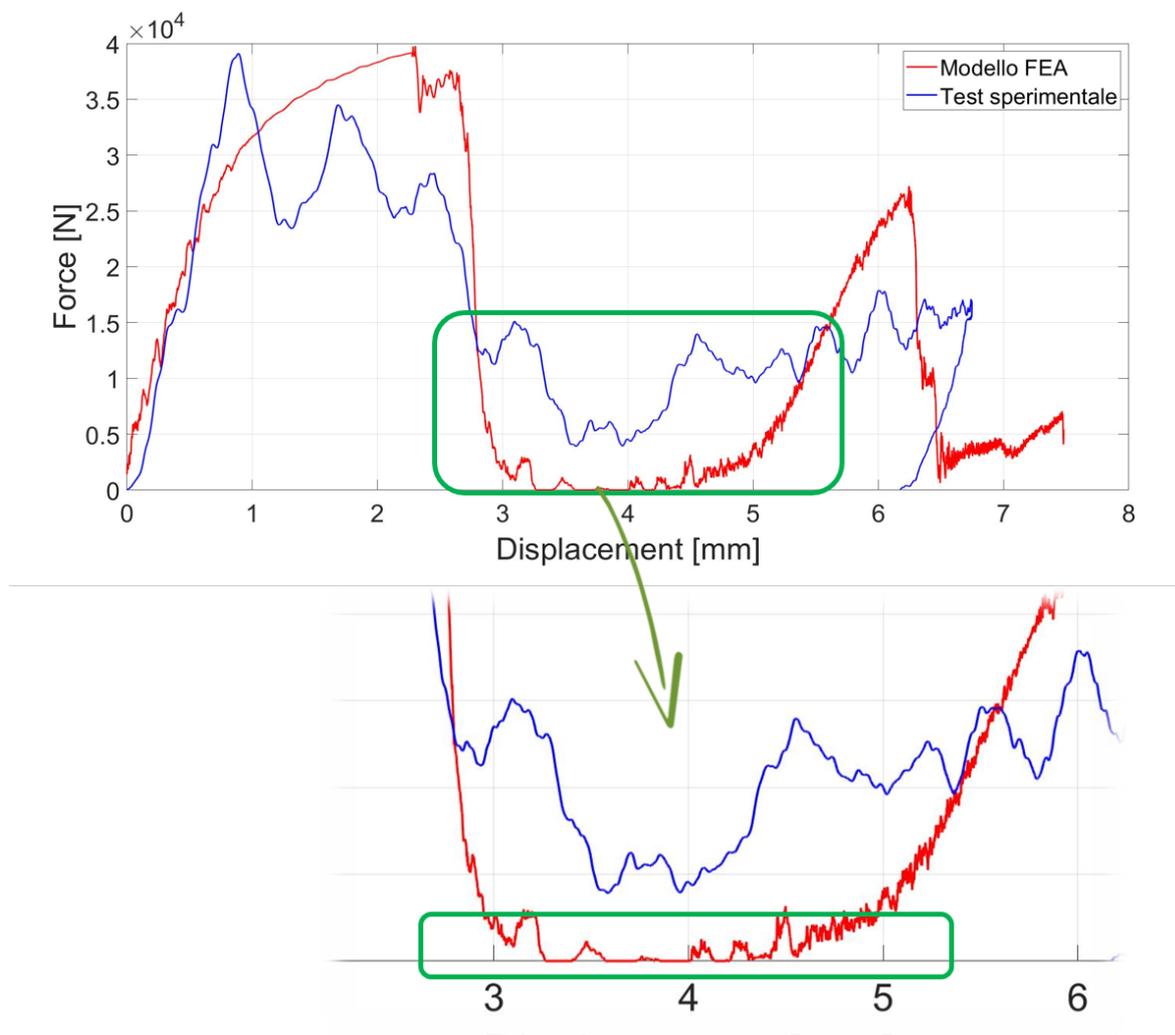


Figura 5.34. Dettaglio della mancanza dell'effetto della densificazione

Un'altra conseguenza della cancellazione degli elementi è il ritardo della fine del test, Figura 5.35. Infatti, i test sperimentali si concludono con uno spostamento massimo inferiore allo spostamento finale registrato nel modello. Anche questa differenza è data dal fatto che gli elementi, arrivati a rottura, sono stati eliminati e quindi, non dando più il loro contributo, l'impattatore comprime maggiormente il provino.

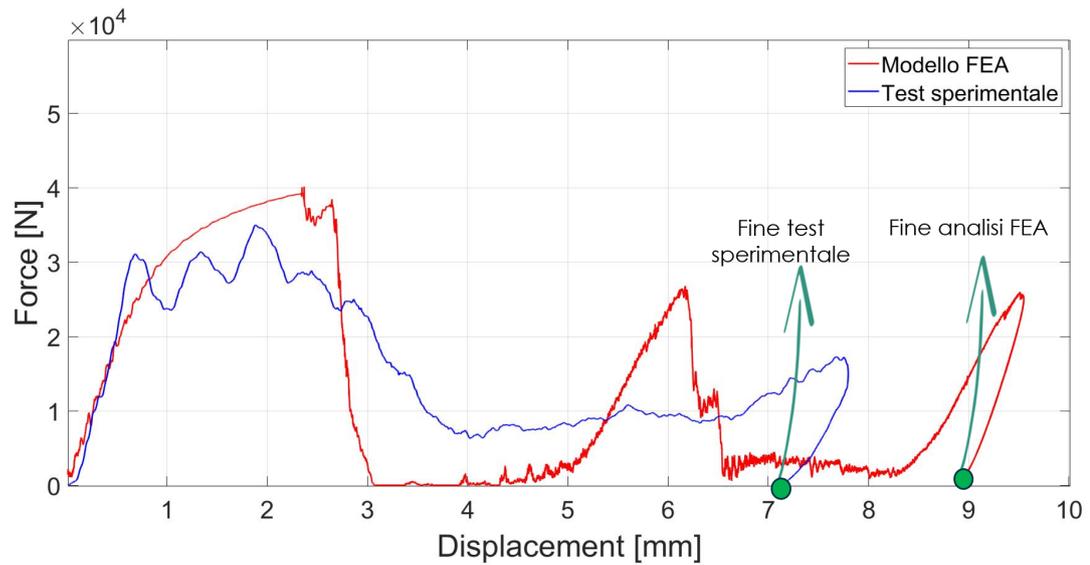


Figura 5.35. Dettaglio sulla differenza dello spostamento a fine test

Un altro aspetto che potrebbe essere migliorato, per poter tener conto in maniera più accurata dell'effetto dello strain-rate, è l'introduzione delle curve sperimentali di trazione ricavate a diverse velocità. Questo andrebbe a sostituire il metodo attualmente utilizzato che prevede l'uso di una sola curva di trazione moltiplicata per dei fattori correttivi per ogni differente velocità. In questo modo è possibile ottenere, dal modello FEA per prove d'impatto, dei risultati più accurati.

Conclusioni

Nella presente tesi si è analizzato il comportamento sperimentale di strutture lattice. I risultati ottenuti sono stati utilizzati per validare dei modelli agli elementi finiti per la simulazione del comportamento ad impatto di strutture lattice. Questi modelli verranno utilizzati per riprogettare una crashbox mediante struttura lattice.

I primi test effettuati in questo studio sono serviti per definire la cella migliore da poter utilizzare in quelli successivi. In questa fase preliminare, sono state svolte prove di compressione quasi-statiche su provini in Carbon Nylon. Durante questi test, si è assistito ad una rottura layer per layer. I parametri considerati per l'analisi sono: la forza massima, l'energia assorbita e l'energia assorbita per unità di volume. Da questa prima analisi è stata scelta la cella migliore che poi è stata utilizzata in tutti gli altri test.

In questa tesi, per i modelli FEA, sono stati utilizzati elementi 1D. Questa scelta è stata fatta per poter ottenere dei dati vicini alla realtà, ma con dei tempi di calcolo ridotti. Indicativamente le analisi effettuate in questo studio hanno un tempo di calcolo inferiore ai 10 minuti. Per poter valutare il guadagno a livello di tempo, è stata fatta una simulazione della compressione sui provini in AlSi10Mg utilizzando un modello con elementi 3D, in cui il calcolo ha richiesto circa 80 ore.

Dopo la definizione della cella migliore, si è passati alla modellizzazione del test di compressione sul software Radioss. Questo primo modello FEA è stato validato sui dati sperimentali ottenuti precedentemente. I risultati ottenuti da questo modello FEA sono molto vicini alla realtà, confrontando sia la curva forza-spostamento sia la modalità di rottura del provino.

Successivamente, sono stati realizzati i provini in lega di alluminio AlSi10Mg tramite la tecnologia SLM. Su questi provini sono stati effettuati i test di compressione. Analizzando i risultati di quest'ultimi è stata riscontrata una rottura differente rispetto allo stesso provino realizzato in carbon-nylon. Infatti, su entrambi i test effettuati è stata riscontrata una rottura lungo la diagonale a 45° . Questo potrebbe essere causato dalla maggiore rigidità della struttura data dal materiale. Per poter ottenere una rottura layer per layer, simile a quella riscontrata sui provini in carbon-nylon, si dovrebbero effettuare altri test andando a variare i parametri geometrici della cella. Un primo test potrebbe essere fatto diminuendo il diametro del beam. Con i dati ottenuti dai test di compressione sui provini in alluminio, è stato possibile validare il modello FEA. Con questo modello è possibile approfondire lo studio per capire quali parametri variare sulla geometria per poter ottenere una rottura layer per layer o per

modificare le proprietà meccaniche a seconda dell'applicazione.

Gli ultimi test effettuati sono quelli che hanno permesso di valutare la risposta della struttura studiata, realizzata in AlSi10Mg, in campo dinamico. In tutto sono stati effettuati quattro test a due velocità differenti, in modo da poter valutare la risposta della struttura in base alla velocità di applicazione del carico. Nei test a velocità più elevate, si è riscontrata una rottura su entrambe le diagonali del provino; invece, nei test effettuati a velocità inferiori, si è avuta la rottura solo lungo la diagonale, simile a quella ottenuta durante i test di compressione. Inoltre, analizzando questi dati è stata riscontrata una forte influenza dell'effetto dello strain-rate; infatti, aumentando la velocità dell'impatto è stata misurata una forza massima maggiore.

Infine, è stato possibile calibrare il modello FEA per i test d'impatto confrontando i risultati con quelli ottenuti nei primi due drop-dart test eseguiti a velocità maggiori. Per poter validare il modello FEA dei test d'impatto sono stati utilizzati i risultati degli ultimi due test sperimentali, eseguiti a velocità inferiori. In questo caso gli unici parametri variati all'interno del modello sono stati: la massa del piano rigido e la velocità d'impatto.

In futuro, con i dati sperimentali acquisiti e con i modelli FEA validati, è possibile continuare a studiare questa cella in modo da poter arrivare alla definizione di una crash-box con dimensione e geometrie applicabili in campo automotive. Infatti, dopo aver ottimizzato il modello sulla base dei dati sperimentali, è possibile simulare una geometria completa di una crash-box e ottenere dei risultati per poter valutare e migliorare l'assorbimento di energia dell'intera struttura.

Bibliografia

- [1] C. PAN, Y HAN, J. LU, *Design and Optimization of Lattice Structures*, (2020)
- [2] G. DONG, Y. TANG, Y.F. ZHAO, *A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing*, Journal of Mechanical Design (2017)
- [3] A.I.H. NASRULLAHA, S.P. SANTOSA, T. DIRGANTARAA, *Design and optimization of crashworthy components based on lattice structure configuration*, Structures 26 (2020) 969-981.
- [4] H. LEI, C. LI, J. MENG, H. ZHOU, Y. LIU, X. ZHANG, P. WANG, D. FANG, *Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis*, Materials and Design 169 (2019) 107685.
- [5] S.Y. CHOYA, C. SUNA, K.F. LEONGA, J. WEIA, *Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density*, Additive Manufacturing 16 (2017) 213-224.
- [6] F.N. HABIB, P. IOVENITTI, S.H. MASOOD, M. NIKZAD, *Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology*, Materials and Design 155 (2018) 86-98.
- [7] C. LI, H. LEI, Y. LIU, X. ZHANG, J. XIONG, H. ZHOU, D. FANG, *Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting*, International Journal of Mechanical Sciences 145 (2018) 389-399.
- [8] F. CALIGNANO, M. LORUSSO, I. ROPPOLO, P. MINETOLA, *Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing*, Machines (2020).
- [9] H. GUO, A. TAKEZAWA, M. HONDA, C. KAWAMURA, M. KITAMURA, *Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured lattice structures with large diameters*, Computational Materials Science 175 (2020) 109610.
- [10] R. GUMRUK, R.A.W.MINES, *Compressive behaviour of stain less steel micro-lattice structures*, International Journal of Mechanical Sciences 68 (2013) 125-139.

- [11] S. TSOPANOS, ET AL., *The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel microlattice structures*, J. Manuf. Sci. Eng. 132 (4) (2010) 041011.
- [12] A. TRIDELLO, C.A. BIFFI, J. FIOCCHI, P. BASSANI, G. CHIANDUSSI, M. ROSSETTO, A. TUISSI, D.S. PAOLINO, *VHCF response of as-built SLM AlSi10Mg specimens with large loaded volume*, Fatigue e fracture of engineering materials e structures (2018) 8756-758