



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS)

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Effetto di trattamenti termici sulle proprietà a  
compressione di provini in struttura lattice  
prodotti mediante fabbricazione additiva**

**Relatore:**

Prof. Andrea Tridello

**Candidato:**

Felicia Michela Guerriero

Matricola s320257

**Co-relatori:**

Prof. Carlo Boursier Niutta

Prof. Davide Salvatore Paolino

**Marzo - Aprile 2025**

# Abstract

La tecnologia di produzione Additive Manufacturing sta ridefinendo i confini dell'innovazione, rivoluzionando i sistemi legati alla progettazione e alla produzione dei componenti e prodotti, grazie anche alla possibilità di realizzare geometrie complesse e personalizzate. Un esempio sono le strutture lattice, difficilmente realizzabili con tecnologie di produzione diverse. Nelle strutture lattice celle elementari si ripetono nello spazio fornendo al componente proprietà meccaniche modulabili e paragonabili a quelle componenti realizzate come pieno.

In questa tesi viene studiata l'influenza dei trattamenti termici sulle proprietà a compressione di provini in AlSi10Mg con strutture lattice octet-truss. Sono state anche svolte analisi agli elementi finiti per replicare le prove di compressione quasi-statiche e ad impatto svolte sperimentalmente sui provini sottoposti ai diversi trattamenti termici analizzati. Inoltre, la produzione in L-PBF delle strutture lattice porta alla formazione di numerosi difetti con dimensioni variabili. Per questo motivo, sono state svolte scansioni Micro Computed Tomography, per analizzare la difettosità interna e valutare l'influenza dei trattamenti termici sulla dimensione dei difetti. In un primo momento, infatti, sono stati creati modelli agli elementi finiti dei provini trascurando i difetti e utilizzando elementi beam monodimensionali. Successivamente si è simulato il comportamento a compressione tenendo conto anche dei difetti, con l'obiettivo di valutare l'influenza dei trattamenti termici e dei relativi difetti sul comportamento a compressione.

# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>5</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>9</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>10</b>
1.1 Additive Manufacturing . . . . .	10
1.1.1 Dal CAD al componente finale . . . . .	11
1.1.2 Vantaggi e limiti dell'Additive Manufacturing . . . . .	12
1.1.3 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) . . . . .	14
1.2 Struttura Lattice . . . . .	15
1.3 Obiettivi della tesi . . . . .	17
<b>2 Materiale e Geometria del provino</b>	<b>19</b>
2.1 Materiale AlSi10Mg . . . . .	19
2.2 Struttura lattice dei provini in esame . . . . .	21
2.3 Effetti del trattamento termico sulle proprietà di assorbimento di energia . . . . .	22
<b>3 Analisi dei difetti</b>	<b>23</b>
3.1 Scansioni Micro-CT per difetti interni . . . . .	26
3.2 Geometria e Analisi FEM della singola beam . . . . .	30
<b>4 Analisi della microstruttura</b>	<b>34</b>
4.1 Stato dell'arte sugli effetti del trattamento termico sulla microstrut- tura della lega . . . . .	36
4.2 Risultati EBSD dei provini . . . . .	37
4.2.1 As-Built . . . . .	39
4.2.2 Trattamento termico a 200°C . . . . .	40
4.2.3 Trattamento termico a 300°C . . . . .	41
<b>5 Prove di compressione quasi-statica</b>	<b>44</b>
5.1 Test sperimentali . . . . .	44
5.2 Modello FE senza difetti . . . . .	49

5.2.1	Definizione del modello FEM del provino in esame senza difetti	50
5.2.2	Risultati simulazioni e Validazione del modello FE . . . . .	53
5.3	Modello FE con difetti . . . . .	61
5.3.1	Definizione del modello FEM del provino in esame con difetti	63
<b>6</b>	<b>Prove d’impatto</b>	<b>67</b>
6.1	Test Sperimentali . . . . .	68
6.1.1	Test d’impatto per As-Built . . . . .	69
6.1.2	Test d’impatto per HT200°C . . . . .	72
6.1.3	Test d’impatto per HT300°C . . . . .	76
6.2	Effetto dello strain-rate . . . . .	79
6.3	Modello FE senza difetti . . . . .	82
6.3.1	Risultati simulazioni e Validazione del modello FE . . . . .	83
6.3.2	Risultati simulazioni test d’impatto As-Built . . . . .	83
6.3.3	Risultati Simulazioni test d’impatto HT200 . . . . .	86
6.3.4	Risultati simulazioni test d’impatto HT300 . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>95</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>99</b>

# Elenco delle figure

1.1	Ciclo di produzione di un componente AM [1] . . . . .	11
1.2	Costo per singolo componente [1] . . . . .	14
1.3	Sistema L-PBF . . . . .	15
1.4	Classificazione delle strutture lattice in funzione della struttura e della superficie [2] . . . . .	16
1.5	Modalità di cedimento delle strutture lattice [3] . . . . .	17
2.1	Curva sforzo-deformazione AlSi10Mg: confronto dei materiali . . . .	21
2.2	Esempio di struttura lattice 3x3x3 . . . . .	22
3.1	Immagine CT di una cella octet (a), Raffinamento della mesh multilivello (b) [7] . . . . .	24
3.2	Beam di supporto primario estratti dalle celle [7] . . . . .	25
3.3	Curve forza spostamento con difetti sia esterni che interni, (b) con solo difetti esterni e (c) con solo vuoti interni [7] . . . . .	25
3.4	Scansione Micro-CT per difetti interni - Esempio trattamento 300°C	26
3.5	Frequenza delle dimensioni dei difetti nel provino 2x2x2 . . . . .	28
3.6	Frequenza delle dimensioni dei difetti nel provino 3x3x3 . . . . .	28
3.7	Mesh della singola beam . . . . .	30
3.8	Esempio dei risultati della simulazione per beam in AlSi10Mg trattata a 200°C con diametro del difetto interno pari a 282 $\mu\text{m}$ , da sx simulazione a $t = 0,0005$ s, $t = 0.0006$ s e $t = 0.001$ s . . . . .	31
3.9	Curve al variare del difetto interno nella beam - As-Built . . . . .	32
3.10	Curve al variare del difetto interno nella beam - Trattamento termico 200°C . . . . .	32
3.11	Curve al variare del difetto interno nella beam - Trattamento termico 300°C . . . . .	33
3.12	Relazione deformazione massima e dimensione del difetto . . . . .	33
4.1	Rappresentazione schematica di una geometria ottimale del sistema integrato EBSD e EDS [12] . . . . .	35

4.2	Immagini EBSD della lega AlSi10Mg: a) AB, b)diagramma di distribuzione della dimensione dei grani, c) HT 200°C, d) HT 520°C [4] . . . . .	37
4.3	Lucidatrice Mecatech 250 . . . . .	38
4.4	Immagine EBSD della lega AlSi10Mg As-Built . . . . .	39
4.5	Immagine EBSD della lega AlSi10Mg 200°C . . . . .	40
4.6	Immagine EBSD della lega AlSi10Mg 300°C . . . . .	41
4.7	Diagramma di distribuzione della dimensione dei grani: confronto tra AB, HT200°C e HT300°C . . . . .	42
5.1	Test sperimentali di Compressione quasi-statica: confronto tra As-Built, HT200, HT300 per struttura lattice 2x2x2 . . . . .	46
5.2	Test sperimentali di Compressione quasi-statica: confronto tra As-Built, HT200, HT300 per struttura lattice 3x3x3 . . . . .	46
5.3	Sequenza di rottura provino As-Built cella 2x2x2 Test 1 . . . . .	47
5.4	Sequenza di rottura provino As-Built cella 3x3x3 Test 1 . . . . .	47
5.5	Sequenza di rottura provino HT200 cella 2x2x2 Test 1 . . . . .	47
5.6	Sequenza di rottura provino HT300 cella 2x2x2 Test 1 . . . . .	48
5.7	Sequenza di rottura provino HT300 cella 3x3x3 Test 1 . . . . .	48
5.8	Geometria 1D (sx) e 3D (dx) del modello numerico di struttura lattice 3x3x3 . . . . .	50
5.9	Modello FE 3D: struttura lattice 3x3x3 e piani rigidi . . . . .	53
5.10	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D As-Built . . . . .	54
5.11	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 3D As-Built . . . . .	55
5.12	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D vs 3D As-Built . . . . .	55
5.13	Sequenza di rottura FEA 3D (in alto) vs 1D (in basso) As-Built cella 2x2x2 . . . . .	56
5.14	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D HT200 . . . . .	57
5.15	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 3D HT200 . . . . .	57
5.16	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D vs 3D HT200 . . . . .	58
5.17	Sequenza di rottura FEA 3D (in alto) vs 1D (in basso) HT200 cella 2x2x2 . . . . .	58
5.18	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D HT300 . . . . .	59
5.19	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 3D HT300 . . . . .	60
5.20	Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D vs 3D HT300 . . . . .	60
5.21	Sequenza di rottura FEA 3D (in alto) vs 1D (in basso) HT300 cella 2x2x2 . . . . .	61
5.22	Modello FE 1D con difetti: struttura lattice 3x3x3 e piani rigidi . . . . .	62
5.23	Estratto del file <i>element_beam.k</i> . . . . .	64
5.24	Estratto del file <i>part.k</i> . . . . .	65
5.25	Risultati compressione quasi-statica FEA con difetto As-Built . . . . .	65
5.26	Risultati compressione quasi-statica FEA con difetto HT200 . . . . .	66

5.27	Risultati compressione quasi-statica FEA con difetto HT300 . . . . .	66
6.1	Macchina INSTRON CEAST 9350 per test d’impatto . . . . .	67
6.2	Test d’impatto AB_1 . . . . .	70
6.3	Confronto prova d’impatto As-Built a velocità 4 m/s . . . . .	70
6.4	Sequenza immagini impatto As-Built a velocità 4 m/s . . . . .	71
6.5	Test d’impatto AB_3 . . . . .	71
6.6	Prova d’impatto As-Built a velocità 8 m/s . . . . .	72
6.7	Immagini impatto As-Built a velocità 8 m/s . . . . .	72
6.8	Test d’impatto HT200_1 . . . . .	73
6.9	Confronto prova d’impatto HT200 a velocità 4 m/s . . . . .	73
6.10	Sequenza immagini impatto HT200_1 a velocità 4 m/s . . . . .	74
6.11	Sequenza immagini impatto HT200_2 a velocità 4 m/s . . . . .	74
6.12	Confronto schema impatto HT200_1 (sx) e HT200_2 (dx) a velocità 4 m/s . . . . .	74
6.13	Test d’impatto HT200_4 . . . . .	75
6.14	Confronto prova d’impatto HT200 a velocità 8 m/s . . . . .	75
6.15	Immagini impatto HT200 a velocità 8 m/s . . . . .	75
6.16	Test d’impatto HT300_1 . . . . .	77
6.17	Confronto prova d’impatto HT300 a velocità 4 m/s . . . . .	77
6.18	Sequenza immagini impatto HT300 a velocità 4 m/s . . . . .	77
6.19	Test d’impatto HT300_4 . . . . .	78
6.20	Confronto prova d’impatto HT300 a velocità 8 m/s . . . . .	78
6.21	Sequenza immagini impatto HT300 a velocità 8 m/s . . . . .	78
6.22	Confronto effetto strain-rate As-Built . . . . .	79
6.23	Confronto effetto strain-rate HT200 . . . . .	80
6.24	Confronto effetto strain-rate HT300 . . . . .	81
6.25	Confronto forza-spostamento prova d’impatto As-Built a velocità 4 m/s . . . . .	84
6.26	Confronto energia-spostamento prova d’impatto As-Built a velocità 4 m/s . . . . .	84
6.27	Sequenza immagini impatto FEA 3D (in alto) e 1D (in basso) As- Built a velocità 4 m/s . . . . .	85
6.28	Confronto forza-spostamento prova d’impatto As-Built a velocità 8 m/s . . . . .	85
6.29	Confronto energia-spostamento prova d’impatto As-Built a velocità 8 m/s . . . . .	86
6.30	Sequenza immagini impatto FEA 3D (in alto) e 1D (in basso) As- Built a velocità 8 m/s . . . . .	86
6.31	Confronto forza-spostamento prova d’impatto HT200 a velocità 4 m/s . . . . .	87

6.32	Confronto energia-spostamento prova d'impatto HT200 a velocità 4 m/s . . . . .	88
6.33	Sequenza immagini impatto FEA HT200 3D (in alto) e 1D (in alto) a velocità 4 m/s . . . . .	88
6.34	Confronto forza-spostamento prova d'impatto HT200 a velocità 8 m/s	89
6.35	Confronto energia-spostamento prova d'impatto HT200 a velocità 8 m/s . . . . .	89
6.36	Sequenza immagini impatto FEA HT200 3D (in alto) e 1D (in basso) a velocità 8 m/s . . . . .	90
6.37	Confronto forza-spostamento prova d'impatto HT300 a velocità 4 m/s	91
6.38	Confronto energia-spostamento prova d'impatto HT300 a velocità 4 m/s . . . . .	91
6.39	Sequenza immagini impatto FEA 3D (in alto) e 1D (in basso) HT300 a velocità 4 m/s . . . . .	92
6.40	Confronto forza-spostamento prova d'impatto HT300 a velocità 8 m/s	92
6.41	Confronto energia-spostamento prova d'impatto HT300 a velocità 8 m/s . . . . .	93
6.42	Sequenza immagini impatto FEA 3D(in alto) e 1D (in basso) HT300 a velocità 8 m/s . . . . .	93



# Elenco delle tabelle

2.1	Proprietà meccaniche dell'AlSi10Mg As-Built, trattamento a 200°C e 300°C . . . . .	20
3.1	Classi di difetto interno per struttura 2x2x2 per As-Built, trattamento a 200°C e 300°C . . . . .	29
5.1	Risultati sperimentali Prova di Compressione quasi-statica struttura 2x2x2 . . . . .	49
5.2	Risultati sperimentali Prova di Compressione quasi-statica struttura 3x3x3 . . . . .	49
6.1	Dati prova sperimentale d'impatto . . . . .	69
6.2	Risultati confronto strain-rate As-Built . . . . .	80
6.3	Risultati confronto strain-rate HT200 . . . . .	80
6.4	Risultati confronto strain-rate HT300 . . . . .	81
6.5	Parametri C e p per la definizione del materiale nei test d'impatto . . . . .	82

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing sta ridefinendo i confini dell'innovazione, rivoluzionando i sistemi legati alla progettazione e alla produzione dei componenti e prodotti. La Fabbricazione Additiva permette di produrre oggetti tridimensionali attraverso la sovrapposizione di materiale strato per strato; si tratta quindi di un sistema produttivo affiancabile alle tecniche tradizionali, nelle quali invece si procede per sottrazione (asportazione) del materiale dal pieno. L'innovazione consiste nel poter realizzare geometrie complesse e personalizzate in poche ore e con l'utilizzo di una singola macchina, passando rapidamente dal modello matematico dell'oggetto, realizzato su un sistema CAD 3D, al componente reale. L'AM si impone come uno dei pilastri fondamentali dell'Industria 4.0, trovando applicazione in una vasta gamma di settori, dall'aerospazio e automotive, al medicale e al dentale, e ancora alla gioielleria.

La fabbricazione additiva si sviluppa a partire dagli anni '80 con le prime tecnologie sperimentali di Stereolitografia (SLA), il cui brevetto viene depositato nel 1984. Si tratta di una tecnica che con l'utilizzo del laser permette di solidificare strati successivi di polimero liquido fotosensibile. Questa tecnologia si sviluppa per rispondere alla richiesta di diminuire i tempi di preparazione dei prototipi, considerato uno dei maggiori freni della produzione dei componenti. Nel corso degli anni ci sono stati notevoli miglioramenti sia nello sviluppo di nuove tecnologie sia attraverso la ricerca di materie prime che possano rispondere sempre più alle esigenze del mercato in continua evoluzione.

### 1.1.1 Dal CAD al componente finale

Lo standard universale nella Fabbricazione Additiva per i modelli matematici è il formato .stl (Standard Triangulation Language). Si converte il modello CAD di tipo solido (3D) in un modello tipo “Shell” in cui la superficie esterna è approssimata attraverso una mesh composta da triangoli di diverse dimensioni, a seconda della risoluzione richiesta, in maniera tale da seguire il profilo e la geometria del modello 3D. Ogni triangolo è descritto attraverso le coordinate dei tre vertici e un vettore normale uscente alla faccia esterna del triangolo. Questa discretizzazione comporta un errore, detto *facetting*, che non può essere eliminato ma solo minimizzato imponendo un errore cordale massimo da non violare tra la superficie curva del modello CAD e la superficie approssimata dai lati dei triangoli. L’utilizzo di questo formato implica molti altri problemi, come ad esempio la presenza di intersezioni o spazi vuoti tra i triangoli, che devono essere revisionati con software di correzione prima di essere pronti per la stampa.



Figura 1.1: Ciclo di produzione di un componente AM [1]

In *Figura 1.1* viene schematizzato il ciclo di produzione di un componente realizzato in AM. Si parte quindi dal modello CAD e si procede con l’ottimizzazione topologica della parte, ovvero un processo che, utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM) come metodo di risoluzione, suddivide l’oggetto di studio in un certo numero di elementi di forma definita ed elementare di dimensioni contenute. Viene creata una griglia composta da nodi nei quali sono assegnati i gradi di libertà del corpo e a cui vengono anche applicati i carichi e i vincoli. Si andrà quindi a stabilire una funzione obiettivo da perseguire attraverso l’imposizione di determinati vincoli da rispettare, ad esempio è di uso comune un’ottimizzazione che porta alla massimizzazione della rigidità con diminuzione massima fissata del volume iniziale del corpo. Ogni elemento, in seguito ad un’analisi FEM, riporta il livello

di sollecitazione a cui è sottoposto; in questo modo l'ottimizzatore procederà eliminando dalla griglia gli elementi meno sollecitati e con energia di deformazione bassa, cioè gli elementi che contribuiscono meno alla robustezza della struttura. In vista della produzione è spesso utile dover progettare dei supporti, che permettono di ancorare il modello in costruzione e facilitare la successiva rimozione del pezzo dal piatto di stampa, di proteggere le pareti laterali da azioni che ne possono compromettere la costruzione, di supportare le parti sporgenti e di condurre il calore in eccesso lontano dalla parte, quando necessario. Dopo aver generato il file .stl segue lo *slicing*, cioè la suddivisione virtuale in sottili strati orizzontali, trasformando il modello tridimensionale in una sequenza di sezioni bidimensionali, ottenuti dall'intersezione del solido con dei piani orizzontali. Ciò permette la stampa strato per strato della geometria solida di partenza. Si otterranno così una o più aree su cui si dovrà depositare il materiale di stampa. È in questa fase che si definisce lo spessore dei diversi strati, che influisce sulla finitura della superficie esterna: se lo spessore è troppo grande, la superficie apparirà come una serie di scalini, se troppo piccolo, i tempi di stampa saranno eccessivi. È dunque importante definire il giusto spessore tramite un compromesso fra l'esigenza di accuratezza di stampa e l'esigenza del contenere i tempi di stampa. Sono inoltre disponibili tecniche evolute di slicing adattativo, che consentono di variare opportunamente lo spessore dei layer a seconda della curvatura della superficie. A questo punto, il file è pronto per la messa in macchina. Una volta completata la costruzione, si procede con il post processo e la finitura del componente.

### 1.1.2 Vantaggi e limiti dell'Additive Manufacturing

Come qualsiasi altra tecnica produttiva, la fabbricazione additiva offre vantaggi importanti ma anche alcuni limiti da superare. I principali vantaggi sono:

- *Assenza di attrezzature e utilizzo di una sola macchina per forme illimitate;*
- *Assenza di dispositivi di bloccaggio;*
- *Un solo step produttivo;*
- *Sottosquadri ammessi;*
- *Minimo intervento dell'operatore;*
- *Tempi e costi legati solo alle dimensioni e non alla complessità geometrica;*
- *Libertà di progettazione;*
- *Strutture leggere e forme cave complesse, grazie alla possibilità di mettere il "materiale solo dove serve";*

- *Parti integrate*, con la riduzione dei tempi di montaggio e una minore complessità della distinta base;
- *Personalizzazione del componente*;
- *Riduzione degli scarti*;

I limiti della fabbricazione additiva derivano dalla sua origine come tecnologia destinata principalmente alla prototipazione rapida, piuttosto che alla produzione di pezzi definitivi. Di conseguenza, i sistemi pensati inizialmente non si adattano facilmente alla produzione estesa. Tra i principali limiti si hanno:

- *Volumi di lavoro e dimensione dei pezzi limitati*;
- *Velocità di costruzione limitate*;
- *Numero limitato di materiali per una singola macchina*;
- *Necessità di strutture di supporto* per il sostentamento del pezzo e la dissipazione del calore;
- *Finitura superficiale scarsa*;
- *Costo dei materiali elevato e numero limitato di materiali commerciali*;

In *Figura 1.2* si riporta un grafico che sottolinea le differenze di costo tra lavorazioni convenzionali e tecniche additive in funzione della complessità della geometria. In particolare si pone in ascissa la complessità geometrica del componente da produrre e in ordinata il costo per ogni singolo componente. Risulta ben evidente che l'Additive Manufacturing diventa la tecnologia da prediligere in termini di costi quando il componente ha una geometria molto complessa; la curva dell'AM risulta essere una retta con inclinazione molto bassa, non nulla perché aumentando la complessità aumenta la necessità di inserire supporti alla struttura e quindi aumenta il materiale di scarto, che ha un costo elevato. Il processo tradizionale ha un costo molto basso con basse complessità geometriche, ma il costo aumenta esponenzialmente con la complessità, in quanto bisogna predisporre stampi e macchinari specifici per ogni componente complesso. In questo grafico si intuisce bene perché spesso si associa il concetto di "*complexity for free*" all'Additive Manufacturing, in quanto la complessità del componente non ne influenza eccessivamente il costo.

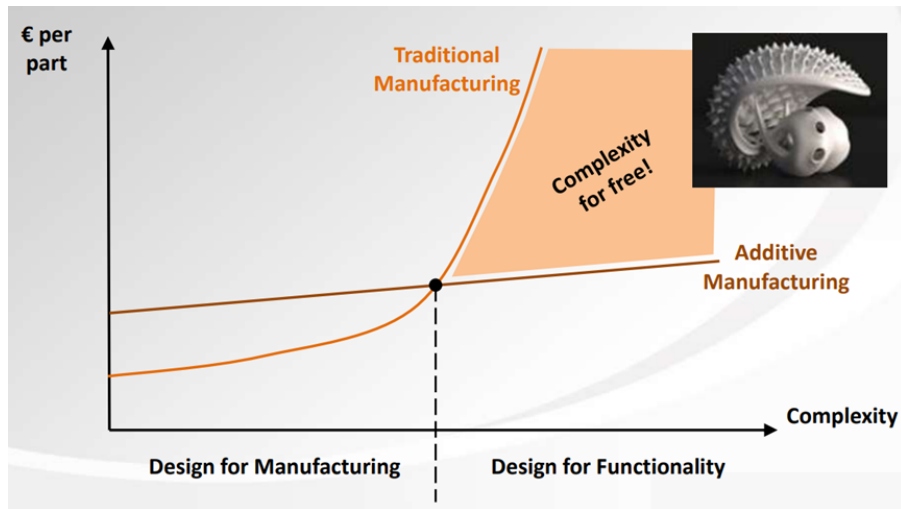


Figura 1.2: Costo per singolo componente [1]

### 1.1.3 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

Tra le diverse tecniche esistenti di Fabbricazione Additiva per metalli e polimeri verrà trattata in questa sede la tecnica Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), in quanto è stata utilizzata per realizzare i provini sui quali sono state condotte le analisi sperimentali.

È una tecnica a letto di polvere di metallo nella quale i pezzi vengono costruiti strato dopo strato. In *Figura 1.3* viene fornito una rappresentazione schematica del sistema produttivo L-PBF. Durante il processo costruttivo i pezzi formano le caratteristiche fisiche e meccaniche. La sezione dei pezzi viene esposta al raggio laser su ogni nuovo strato. La piattaforma di stampa (piattaforma modulare) si abbassa dello spessore di uno strato per la successiva stratificazione. Anche la piattaforma del serbatoio (piattaforma di dosaggio) si abbassa in maniera tale che la lama dell'applicatore possa rientrare nella posizione di destra senza scontri. La piattaforma di dosaggio si solleva e mette a disposizione una quantità prestabilita di polveri metalliche per la stratificazione successiva. L'applicatore si sposta verso sinistra, distribuendo nel vano di stampa le polveri metalliche, applicando quindi un nuovo strato sottile di polvere; la polvere metallica in eccesso cade nel vano di trabocco. Durante l'esposizione, lo scanner guida il raggio laser con traiettorie prestabilite, attivandosi nelle aree dove si vuole solidificare e fornendo energia alla polvere grazie all'assorbimento della radiazione. La polvere metallica solidifica e si lega alle aree sottostanti del pezzo, già solidificate. L'energia termica necessaria alla fusione è fornita da una sorgente laser con potenza che varia da qualche centinaia di Watt fino a circa 3 kW nei sistemi industriali avanzati, arrivando a temperature di fusione di oltre 2000°C e fondendo non solo lo strato su cui si sta lavorando ma

anche gli strati sottostanti. Il processo si svolge con camera di fusione saturata di gas inerte, evitando così l'ossidazione delle polveri metalliche a contatto con l'aria.

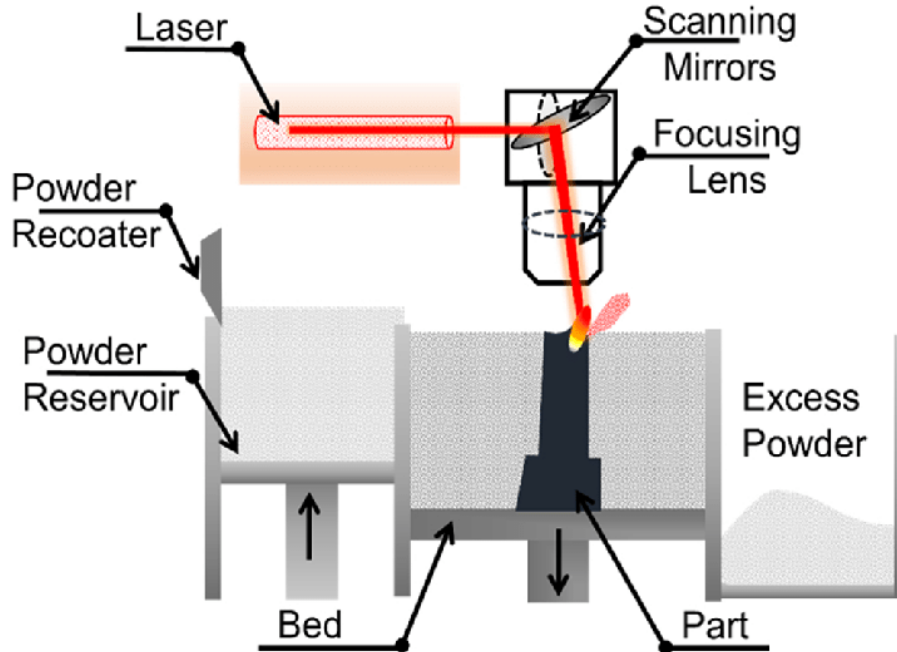


Figura 1.3: Sistema L-PBF

## 1.2 Struttura Lattice

Durante il processo di ottimizzazione topologica è possibile giungere a strutture reticolate, impossibili da realizzare con tecnologie diverse da quelle proposte dall'Additive Manufacturing. Le strutture lattice sono un esempio di strutture articolate prodotte con tecnica L-PBF, dove celle elementari si ripetono nello spazio fornendo al componente proprietà meccaniche paragonabili al componente realizzato come pieno.

Le celle possono ripetersi nello spazio con una certa periodicità (le celle sono tutte di una certa tipologia e dimensione), con una certa pseudo-periodicità (le celle unitarie sono della stessa tipologia ma con dimensioni diverse) oppure possono essere disposte in modo casuale nello spazio (le celle sono di diverse tipologie e dimensioni). La configurazione della cella può essere diversa a seconda di come gli elementi sono connessi tra loro e di come si dispongono all'interno della cella unitaria. In base alle esigenze di carichi e vincoli, e quindi alle proprietà meccaniche richieste, si sceglie una configurazione piuttosto che un'altra; la risposta della struttura lattice per lo stesso materiale, infatti, cambia significativamente modificando la tipologia di cella, la dimensione delle celle e le dimensioni degli elementi che costituiscono la

cella unitaria. Capire attraverso quale meccanismo si arriva al cedimento di una determinata cella è utile nella scelta della configurazione della cella per una specifica applicazione; in generale si preferisce analizzare il comportamento in compressione delle strutture reticolari. In *Figura 1.4* sono riportate alcune tipologie di celle unitarie realizzabili:

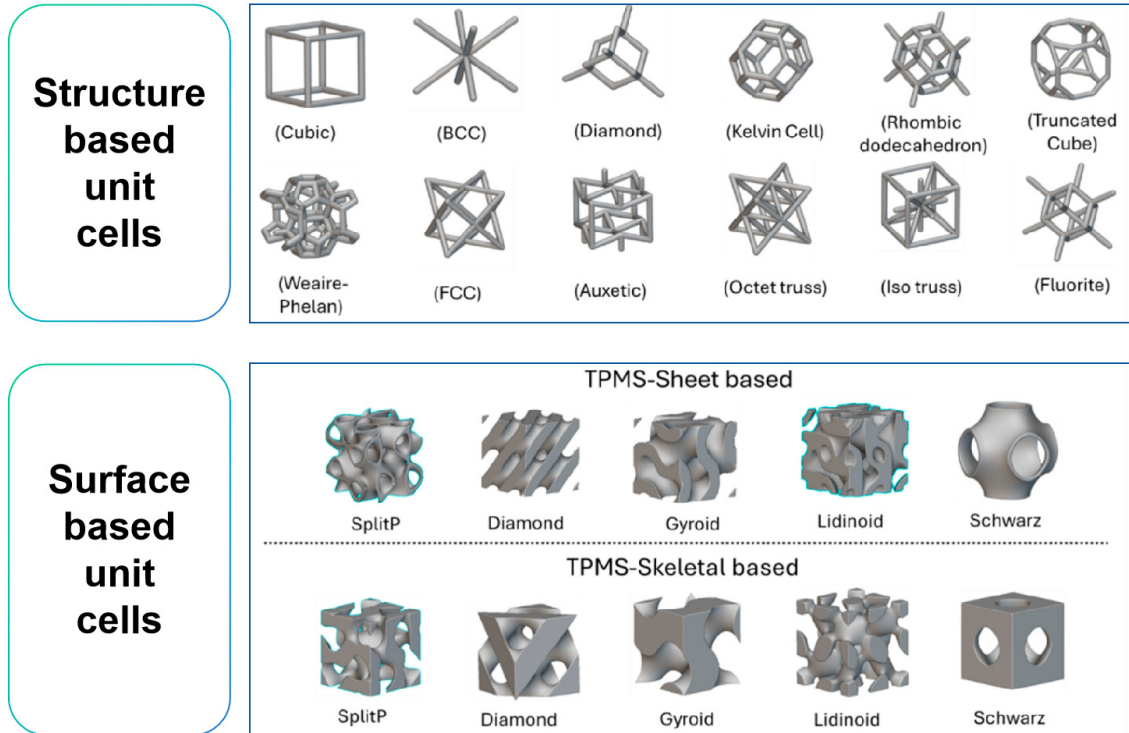


Figura 1.4: Classificazione delle strutture lattice in funzione della struttura e della superficie [2]

Nello studio *"Structure-property relationship in high strength and lightweight AlSi10Mg microlattices fabricated by selective laser melting"* [3] sono state esaminate la stampabilità, il comportamento a compressione e le modalità di cedimento delle microstrutture lattice in AlSi10Mg, giungendo alla formulazione delle relazioni tra struttura reticolare, comportamento meccanico e caratteristiche microstrutturali del provino. I provini con le diverse strutture lattice a confronto sono stati realizzati variando tre parametri di progettazione: struttura delle celle unitarie, numero di celle unitarie in ciascuna direzione e diametro del montante, ovvero diametro della singola beam.

Durante i test di compressione sono state osservate quattro diverse modalità di cedimento per le strutture lattice, riportate in *Figura 1.5*: (a) schiacciamento della regione di contatto; (b) più cricche consecutive a  $45^\circ$  rispetto alla direzione di



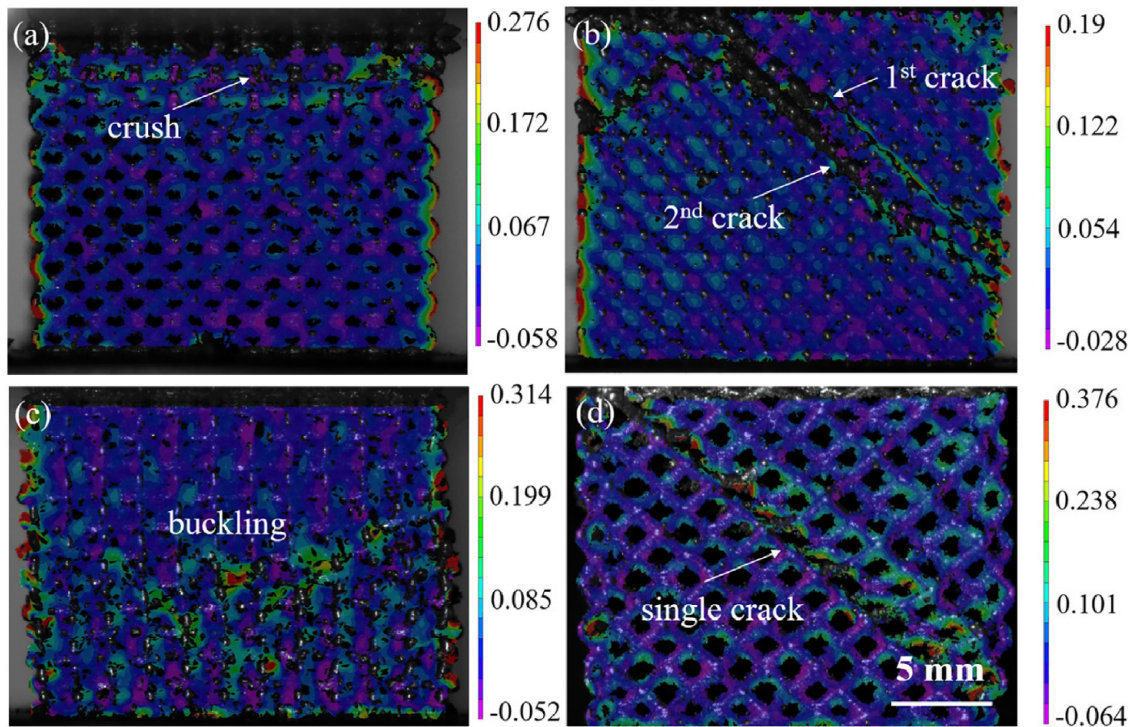


Figura 1.5: Modalità di cedimento delle strutture lattice [3]

carico; (c) deformazione plastica seguita da instabilità locale; e (d) singola cricca diagonale a  $45^\circ$  rispetto alla direzione di carico. La dissipazione di energia durante la compressione include l'instabilità elasto-plastica delle beam, la deformazione plastica delle beam, l'energia di propagazione della frattura e l'attrito tra frammenti rotti dei singoli montanti. Lo studio ha condotto a relazioni differenti tra tensione di snervamento e densità in base alle diverse configurazioni della cella, dimostrando come il comportamento meccanico del componente sia legato ad un numero elevato di parametri e come una minima variazione di quest'ultimi porti ad una notevole differenza delle proprietà meccaniche.

### 1.3 Obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo quello di studiare l'influenza dei diversi trattamenti termici sulle proprietà a compressione di provini in AlSi10Mg con strutture lattice-octet. All'introduzione sull'Additive Manufacturing e sulle strutture lattice, segue un capitolo in cui viene descritto il materiale utilizzato per la produzione dei provini e la struttura della geometria analizzata. Nel terzo capitolo saranno presentati i risultati delle scansioni tomografiche Micro-CT mostrando la

numerosità e le dimensioni dei difetti presenti nei provini analizzati, effettuando quindi un confronto tra i diversi trattamenti termici subiti dal materiale. A partire da questi dati verranno creati dei modelli agli elementi finiti che permettono di simulare il comportamento delle singole beam che compongono la struttura lattice. Nel quarto capitolo sarà descritta la microstruttura che caratterizza la struttura lattice al seguito dei diversi trattamenti termici, ottenuta con la tecnica di diffrazione di elettroni retrodiffusi EBSD. Nel quinto e nel sesto capitolo saranno presentate rispettivamente le prove di compressione quasi-statica e d'impatto. Ad una prima esposizione sui risultati sperimentali ottenuti nei diversi test seguirà una trattazione sul modello FE utilizzato per riprodurre tali prove. Si effettuerà quindi un confronto tra risultati numerici e risultati sperimentali, focalizzando l'attenzione sui risultati conseguiti dai provini sottoposti a diversi trattamenti termici. L'ultimo capitolo ripercorre infine tutto il lavoro effettuato, sintetizzando i principali risultati emersi nei capitoli precedenti e traendo le conclusioni finali dello studio.

## Capitolo 2

# Materiale e Geometria del provino

La Fabbricazione Additiva, come detto in precedenza, nasce come tecnica per velocizzare il processo di prototipazione con l'utilizzo di materiali polimerici. Nel corso degli anni la tecnologia si è evoluta e la ricerca si è aperta verso un numero sempre maggiore di materiali stampabili, siano essi polimerici, metallici, ceramici o organici, rispondendo così alle diverse esigenze di mercato. Ad oggi si può affermare che i materiali polimerici e metallici dominano il mercato dei materiali per Additive, in particolare tra i materiali metallici hanno una notevole importanza in termini di prestazioni le leghe di Nichel, Titanio e Alluminio. Nel paragrafo successivo, si pone attenzione sulla lega di Alluminio AlSi10Mg con cui sono stati realizzati i provini oggetto di studio. Segue un'analisi dell'influenza dei trattamenti termici sulle proprietà di assorbimento energetico dei provini in struttura lattice e una breve descrizione della geometria dei provini analizzati.

### 2.1 Materiale AlSi10Mg

Le leghe di alluminio svolgono un ruolo centrale nella produzione additiva grazie alle notevoli proprietà meccaniche, che si traducono in un'elevata resistenza specifica, una conducibilità termica ed elettrica considerevole e resistenza alla corrosione, pur conservando la leggerezza, quindi una bassa densità, come qualità principale. Questa lega si presta bene alla produzione di componenti con tecnica L-PBF, anche se spesso i componenti finali presentano diverse problematiche come la presenza di uno stato di tensione residua e fenomeni di sferificazione, a causa del basso assorbimento e dell'elevata riflettività della lega alla luce laser [4]. Il numero di microstrutture diverse può variare di molto in funzione della strategia di fusione e solidificazione utilizzata: un laser più potente altera maggiormente la microstruttura nell'intorno del punto di fusione che porta quindi ad una eterogeneità della struttura, con conseguente variazione delle proprietà meccaniche nelle varie direzioni e quindi differenti in funzione di come viene orientato il pezzo in macchina. Con i trattamenti

termici si potrà andare ad agire sulla dimensione del grano, quindi sulle proprietà meccaniche, facendo però attenzione ad eventuali segregazioni di seconde fasi non desiderate.

La lega AlSi10Mg è una lega appositamente creata per l'Additive Manufacturing e presenta una composizione chimica con 9-11% di Si, 0.2-0.45% di Mg, <0.55 % di Fe, Zn e Ti in tracce (circa 0.1%), il restante Al. Il Silicio migliora la colabilità della lega, con una maggiore fluidità e una minore contrazione dell'Al fuso, contribuendo ad aumentare la resistenza meccanica e la resistenza all'usura e, in combinazione con il Magnesio, contribuisce a rafforzare le leghe in seguito a un trattamento di indurimento per precipitazione. Il Magnesio rinforza e indurisce le leghe presentandosi in soluzione solida nella lega, influenzando di poco la duttilità. Il Ferro aumenta la resistenza meccanica della lega grazie alla formazione di intermetallici Al-Fe ma ne riduce la duttilità, costituendo così un'impurità indesiderata. Le particelle di polvere di questo materiale non presentano molti difetti e la presenza elevata di silicio permette di ottenere delle polveri con geometrie particolarmente regolari ed efficaci per il processo L-PBF.

In questo lavoro di tesi si analizzano provini prodotti in AlSi10Mg As-Built, con trattamento termico aging a 200°C e a 300°C. Nella *Tabella 2.1* sono riportate le principali proprietà del materiale utilizzato.

<b>AlSi10Mg</b>	Densità $\rho$	Modulo Elastico E	Coefficiente di Poisson $\nu$
As-Built	2,6 g/cm <sup>3</sup>	68 GPa	0.33
200°C	2,6 g/cm <sup>3</sup>	58 GPa	0.33
300°C	2,6 g/cm <sup>3</sup>	53 GPa	0.33

Tabella 2.1: Proprietà meccaniche dell'AlSi10Mg As-Built, trattamento a 200°C e 300°C

Le curve sforzo-deformazione dei diversi materiali sono state ricavate da test sperimentali eseguiti in laboratorio e sono riportate in *Figura 2.1*. Tali curve sono ottenute con tecnica DIC (Digital Image Correlation), che si basa su una misura ottica che, attraverso l'elaborazione di immagini digitali, misura spostamenti e deformazioni della superficie di un oggetto. I test di trazione eseguiti sui provini mostrano una maggiore resistenza meccanica e una frattura più fragile per i campioni As-Built, mentre i campioni termicamente trattati presentano un allungamento a rottura più elevato che si traduce in una frattura più duttile.

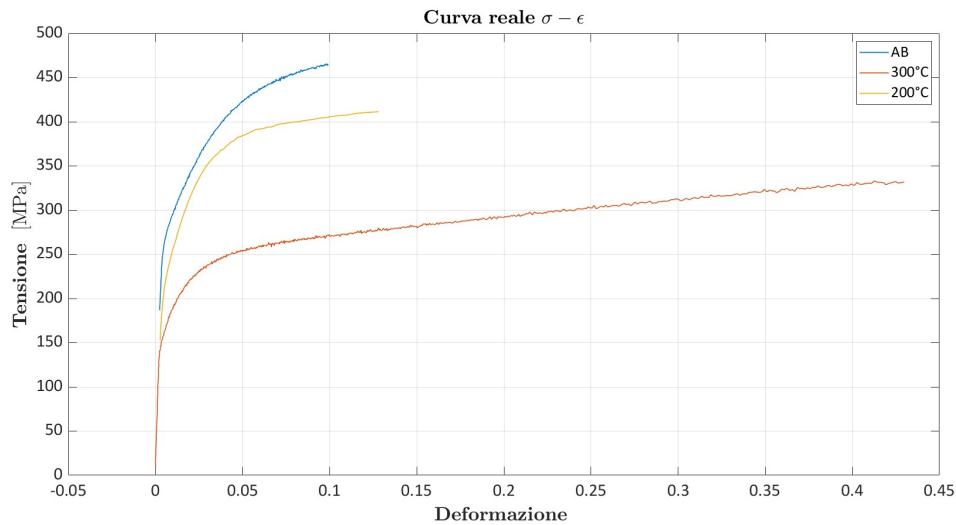


Figura 2.1: Curva sforzo-deformazione AlSi10Mg: confronto dei materiali

## 2.2 Struttura lattice dei provini in esame

In questa tesi verranno approfondite strutture lattice con celle *octet* uniformi che si ripetono con periodicità nello spazio e come i diversi trattamenti termici subiti dai provini in lega AlSi10Mg influenzano il comportamento di queste strutture. La struttura *octet* risulta essere, tra quelle proposte in *Figura 1.4*, una tra le strutture con maggiori quantità di energia specifica assorbita e con maggiore carico massimo consentito.

I provini analizzati sono di due tipologie: struttura composta da 2 celle unitarie (struttura 2x2x2) e 3 celle unitarie (struttura 3x3x3, riportata in *Figura 2.2*) che si ripetono nelle tre dimensioni, dove la cella unitaria cubica ha dimensione del lato pari a 8.5 mm e diametro delle singole beam pari a 1,4 mm nel modello CAD.

È stato scelto di esaminare queste due strutture, relativamente piccole, in quanto nello studio *Experimental and Numerical Investigation of a Lattice Structure for Energy Absorption: Application to the Design of an Automotive Crash Absorber* [5] si afferma che, per un determinato materiale esaminato e per una geometria e dimensione fissa della cella unitaria, l'energia assorbita specifica durante i test di compressione non dipende dal numero di celle unitarie che costituiscono la struttura e quindi un provino di dimensioni ridotte può rappresentare verosimilmente il comportamento di un intero componente, limitando in questo modo il tempo di fabbricazione dei provini da analizzare.

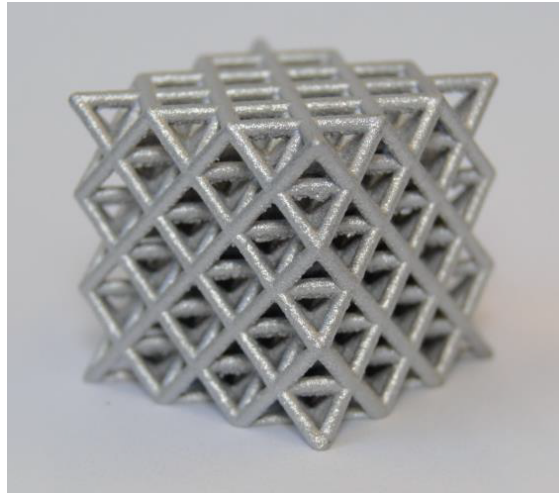


Figura 2.2: Esempio di struttura lattice 3x3x3

### 2.3 Effetti del trattamento termico sulle proprietà di assorbimento di energia

Le proprietà finali del materiale possono essere significativamente influenzate dal trattamento termico, che modifica la microstruttura e le prestazioni meccaniche, anche in termini di capacità di assorbire energia durante carichi dinamici. Una ricerca svolta presso l'università di Brescia e il CNR di Bologna ha permesso di studiare le proprietà di elevata velocità di deformazione e il comportamento anisotropico della lega AlSi10Mg in diversi stati di trattamento termico con l'obiettivo di identificare possibili tipologie di trattamento termico alternativi a quelli convenzionali [6]. I risultati hanno mostrato che il trattamento termico a 300°C (annealing) riduce la resistenza statica rispetto alla lega As-Built, ma nelle prove d'impatto la stessa lega mostra un'energia totale assorbita di circa 4 volte superiore. Nello studio si afferma quindi che la ricottura a bassa temperatura è una valida alternativa per ottenere condizioni di equilibrio, ragionevoli proprietà statiche e un eccellente comportamento all'impatto.

In generale, le strutture lattice sono progettate per massimizzare l'assorbimento di energia a parità di ingombro, come nel caso delle crash box, grazie alla loro geometria e porosità controllata. Tuttavia, non ci sono studi specifici che collegano direttamente i trattamenti precedentemente descritti alle proprietà di assorbimento energetico delle strutture lattice.

# Capitolo 3

## Analisi dei difetti

La produzione in L-PBF della struttura lattice implica numerose difettosità con dimensioni variabili, che rendono difficile la valutazione numerica del comportamento statico e dinamico dei componenti con struttura reticolata; questo porta spesso ad avere differenze notevoli tra i test sperimentali eseguiti sul componente e l'analisi agli elementi finiti eseguiti sul modello CAD 3D dello stesso componente. In generale, possono essere utilizzati tre metodi numerici per simulare il comportamento meccanico delle strutture reticolari:

- *Modelli FEM che si basano sui dati CAD*, in cui non si tiene conto della presenza dei difetti e consentono una simulazione numerica rapida a scapito dell'accuratezza del risultato;
- *Modelli FEM staticamente equivalenti*, in cui sono implementati i difetti in termini di equivalenza di forma e dimensione;
- *Modelli FEM basati sulle immagini*, che consentono di incorporare direttamente i difetti di fabbricazione.

### **Modello FEM basato su scansioni con microtomografia**

Nello studio "*Mechanical characterization of lattice structures fabricated by selective laser melting via an image-based finite cell method with a damage model*" [7] si parte da una scansione con microtomografia delle celle lattice octet, si ricostruisce la geometria imperfetta e si prosegue con la definizione delle curve forza-spostamento. Attraverso lo studio della distribuzione delle cricche presenti nelle singole beam sotto diverse condizioni di carico rispetto alla direzione di costruzione, si afferma che i difetti esterni influenzano in modo significativo la distribuzione delle cricche nelle beam, mentre i vuoti interni hanno un'influenza minore a causa della loro bassa frazione volumetrica. Viene innanzitutto definito il metodo numerico con l'introduzione delle equazioni che governano il problema fisico, l'implementazione del modello di celle finite basato sulle immagini (FCM). Si combinano poi questi

modelli con lo schema di mesh hp multilivello per risolvere i difetti locali, e con il modello di danno di Lemaitre, secondo cui è possibile utilizzare per un materiale danneggiato lo schema di equazioni costitutive proprio del materiale privo di danno sostituendo il tensore degli sforzi con quello effettivo. L'utilizzo di una mesh multilivello permette di definire *per sovrapposizione* una mesh grossolana per le informazioni globali e una mesh più fine per informazioni locali nel sottodominio di interesse (*Figura 3.1*).

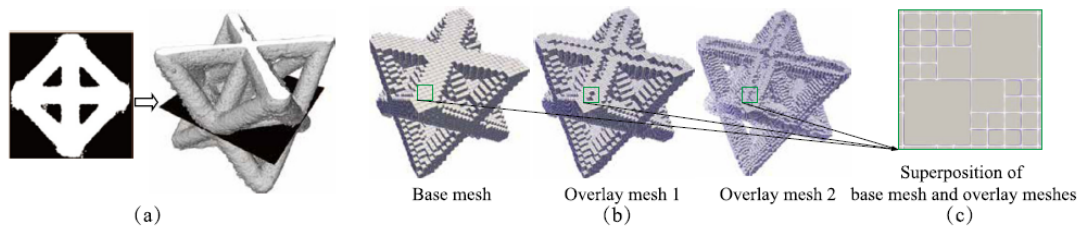


Figura 3.1: Immagine CT di una cella octet (a), Raffinamento della mesh multilivello (b) [7]

Sono stati prodotti, utilizzando il processo L-PBF, 6 celle lattice octet in acciaio inossidabile 316L che differiscono per la direzione di stampa e di carico. Sono state estratte da ogni cella le beam di supporto primario, allineate con le direzioni di carico, e isolati all'interno di un dominio cilindrico (*Figura 3.2*) per una valutazione dei difetti geometrici. Risulta evidente come le beam orientate lungo la direzione di carico  $0^\circ$  presentano deviazioni maggiori rispetto a quelle orientate a  $90^\circ$ . Da un'ulteriore analisi è possibile affermare che le beam orientate a  $0^\circ$  presentano distribuzioni di materiale più simmetriche rispetto al piano medio tra le superfici superiore e inferiore della cella; inoltre, l'area trasversale nella sezione centrale è minore rispetto alle beam orientate a  $90^\circ$ . Questa distribuzione del materiale determina diversi comportamenti meccanici.

Lo studio quindi procede con un'analisi numerica di confronto, ipotizzando quattro diversi approcci: beam con difetti interni e esterni, beam con solo difetti esterni, beam con solo vuoti interni e beam CAD idealizzato (senza difetti). Dalle curve forza-spostamento si ha la conferma che il modello CAD con geometria perfetta sovrastima il comportamento meccanico del componente, infatti le curve per le beam con difetti presentano carichi massimi più bassi. Dal confronto tra le curve nei grafici (b) e (c) in *Figura 3.3* è evidente che i difetti esterni hanno un'influenza maggiore sul comportamento elastoplastico delle beam rispetto ai vuoti interni. Dal confronto delle curve nei diversi casi si sottolinea che le curve con difetti interni ed esterni sono pressoché sovrapponibili a quelle con soli difetti esterni e di conseguenza, semplificando il modello, nell'analisi numerica delle celle octet si possono ignorare i vuoti interni. La cella octet mostra prestazioni meccaniche superiori



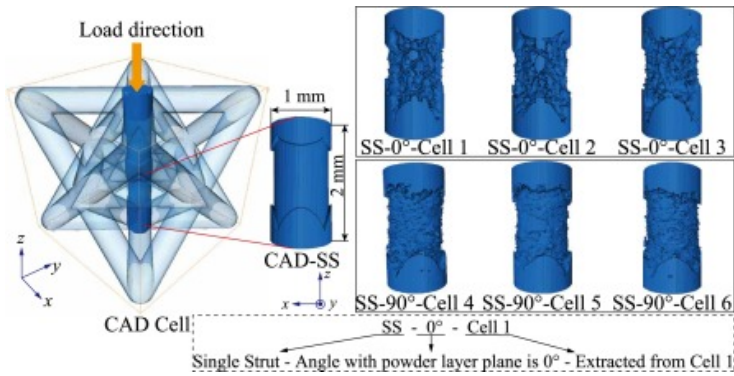


Figura 3.2: Beam di supporto primario estratti dalle celle [7]

quando la direzione di carico è perpendicolare piuttosto che parallela alla direzione di costruzione; si tratta quindi comportamenti meccanici non isotropici, attribuibili anche alla distribuzione non simmetrica del materiale. Dall'analisi numerica delle celle lattice si è poi potuto affermare che la frattura avviene in prossimità dei vertici e dei nodi della struttura reticolare.

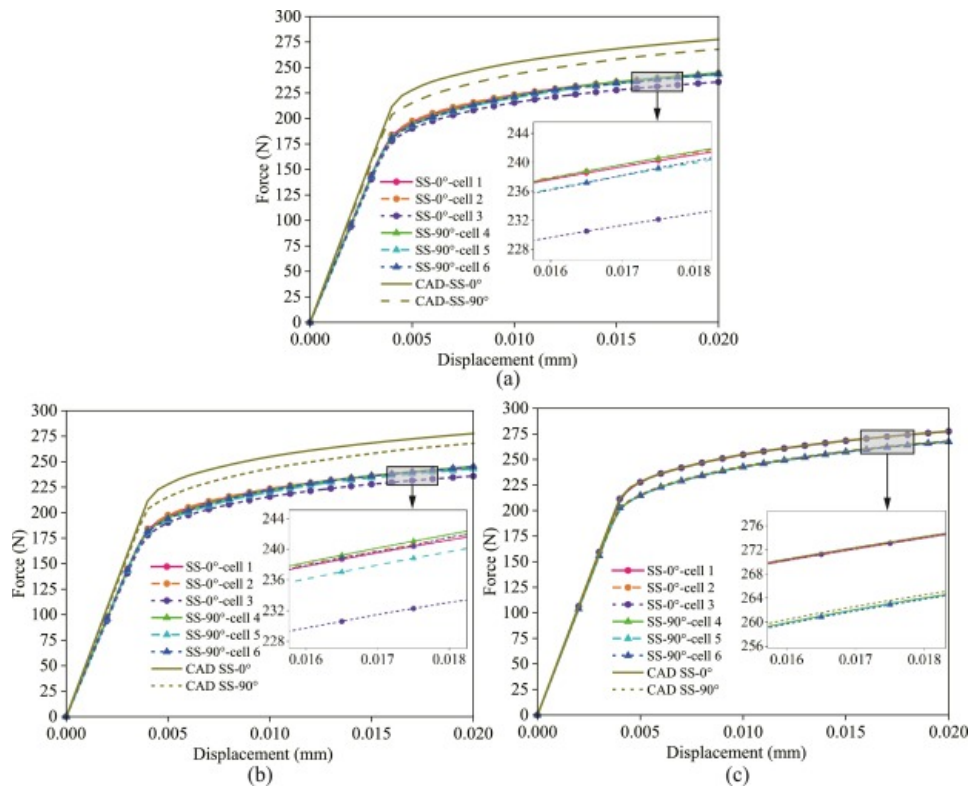


Figura 3.3: Curve forza spostamento con difetti sia esterni che interni, (b) con solo difetti esterni e (c) con solo vuoti interni [7]

### 3.1 Scansioni Micro-CT per difetti interni

Come detto, il processo di produzione mediante fabbricazione additiva comporta numerose difettosità, le cui dimensioni possono essere rilevate mediante scansioni tomografiche al Micro-CT. Sono stati studiati un provino lattice 2x2x2 e uno 3x3x3 per ogni trattamento del materiale oggetto di studio (As-Built, HT200°C e HT300°C), per un totale quindi di 6 provini scansionati. Le dimensioni e il numero dei difetti, intesi come porosità del materiale, riducono il volume effettivo del provino, influenzandone le proprietà meccaniche. Dalle scansioni si è evidenziato come i difetti presentano una geometria piuttosto sferica o ellissoidale. Il software VG Studio [8], utilizzato per l'elaborazione dei dati della scansione alla Micro-CT, fornisce in uscita diversi parametri, tra cui diametro equivalente, coordinate nello spazio del centro del difetto, volume, aree proiettate nei diversi piani, ecc. In *Figura 3.4* si riporta un esempio di difetto analizzato in riferimento alla lega che ha subito trattamento termico a 300°C, con dettaglio dei dati dell'area proiettata nel piano xy di stampa.

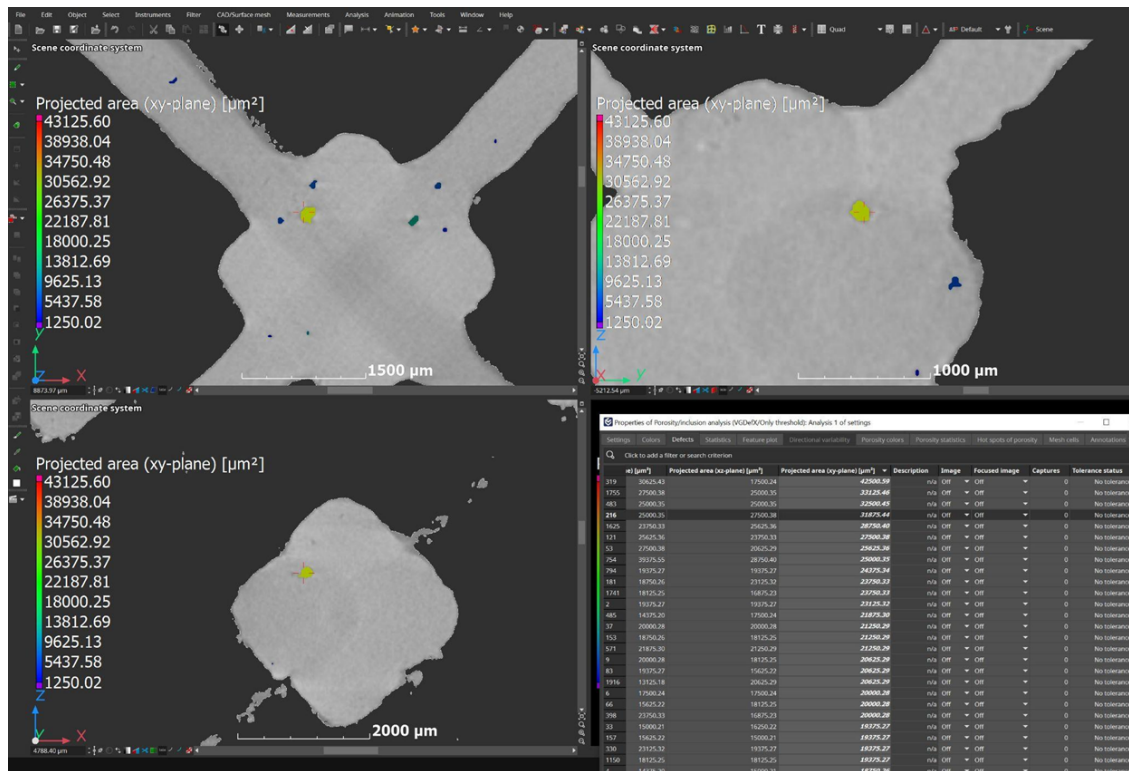


Figura 3.4: Scansione Micro-CT per difetti interni - Esempio trattamento 300°C

L'analisi della scansione si basa sul riconoscimento della superficie del provino attraverso la ricostruzione della scala dei grigi, rappresentando con tonalità diverse le sezioni del difetto e quelle del componente vero e proprio. In particolare, la

ricostruzione 3D avviene tramite l'utilizzo di proiezione 2D in scala di grigi. Combinando le proiezioni 2D viene creato il volume 3D in scala di grigi. Diversi materiali generano intensità di grigi diverse: in particolar modo, densità e spessori maggiori restituiscono colori più luminosi tendenti al bianco, mentre densità e spessori minori restituiscono colori più scuri tendenti al nero. In questo caso i vuoti (aria) sono neri e il materiale stampato avrà un colore grigio. A partire da queste differenze di contrasto è possibile effettuare un'analisi dei difetti, che restituirà come i parametri geometrici che definiscono ogni porosità. Ad ogni poro viene anche associato un valore di probabilità che indica la probabilità del poro in esame di essere un vero difetto o un artefatto; generalmente i difetti più piccoli avranno probabilità più basse, a causa del materiale circostante che genera rumore nella ricostruzione 3D. A partire dai dati raccolti sulle aree proiettate nel piano di stampa  $xy$ , sono state definite 20 classi di difetto. Le classi rappresentano intervalli di dimensioni all'interno dei quali i difetti sono stati raggruppati per analizzarne la distribuzione. In particolare, a partire dallo studio di *Y. Murakami* [9] in cui è stato mostrato come il limite di fatica e la soglia di propagazione del materiale dipendono dalla dimensione del difetto, è stato scelto di riportare le distribuzioni delle dimensioni del difetto in termini di  $\sqrt{\text{Area proiettata nel piano } xy}$ . In *Figura 3.5 e 3.6* sono riportati gli andamenti della frequenza delle dimensioni dei difetti per i tre diversi trattamenti termici studiati, cioè si vuole descrivere quante volte ciascuna dimensione del difetto si ripete all'interno della cella lattice. Si può notare come nel caso della struttura 2x2x2 il picco della distribuzione si concentra intorno ad un diametro di 100  $\mu\text{m}$  per As-Built e HT300°C e intorno ai 150  $\mu\text{m}$  per HT200°C, mentre per la struttura 3x3x3 il picco della distribuzione si concentra intorno ad un diametro di 50  $\mu\text{m}$ . Si sottolinea come i diametri massimi dei difetti riscontrabili per i diversi provini sono di dimensioni confrontabili, arrivando tra i 250 e 260  $\mu\text{m}$ , ad eccezione del provino 2x2x2 trattato a 200°C in cui si registrano valori massimi che superano i 300  $\mu\text{m}$ .

Nella *Tabella 3.1* sono riportate le classi dei diametri medi del difetto per le scansioni effettuate sui tre provini As-Built, HT200 e HT300 con struttura 2x2x2 delle celle lattice.

Questi dati relativi alla distribuzione dei difetti sono utili per definire e validare il modello numerico che consentirà di tener conto della presenza dei difetti nella struttura lattice, in maniera tale da permettere un confronto con un modello ideale in cui si trascurano i difetti.

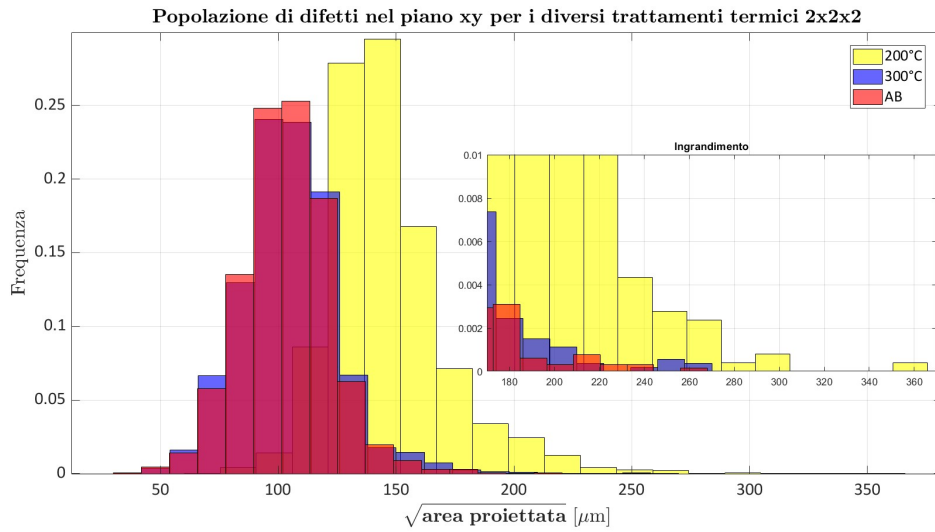


Figura 3.5: Frequenza delle dimensioni dei difetti nel provino 2x2x2

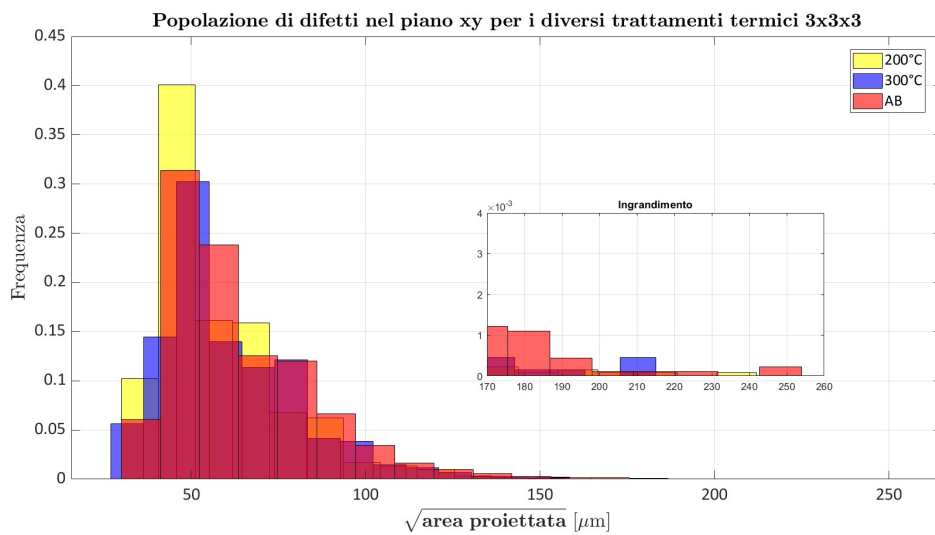


Figura 3.6: Frequenza delle dimensioni dei difetti nel provino 3x3x3

<b>Diametro medio del difetto per classe [<math>\mu\text{m}</math>]</b>			
<b>Classe</b>	<b>As-Built</b>	<b>200°C</b>	<b>300°C</b>
1	35,95	67,65	36
2	47,85	82,95	48
3	59,75	98,25	60
4	71,65	113,55	72
5	83,55	128,85	84
6	95,45	144,15	96
7	107,35	159,45	108
8	119,25	174,75	120
9	131,15	190,05	132
10	143,05	204,45	144
11	154,95	220,65	156
12	166,85	235,95	168
13	178,75	251,65	180
14	190,65	266,55	192
15	202,55	281,85	204
16	214,45	297,55	216
17	226,35	-	-
18	238,25	-	240
19	-	-	252
20	262,05	358,35	264

Tabella 3.1: Classi di difetto interno per struttura 2x2x2 per As-Built, trattamento a 200°C e 300°C

## 3.2 Geometria e Analisi FEM della singola beam

A partire dalla struttura lattice, è stato scelto di rappresentare e analizzare agli elementi finiti una singola beam che compone la cella elementare. Nello specifico, si è scelta una struttura semplificata della beam che consiste in un cilindro di diametro 1,4 mm e altezza 2 mm, dimensioni ricavate a partire dalle scansioni Micro-CT. Per semplificazione si è tenuto conto, per l'analisi di una singola beam, della presenza di un solo difetto sferico posizionato in corrispondenza della mezzieria dell'asse di rotazione del cilindro, le cui dimensioni variano opportunamente in ogni simulazione secondo quanto ricavato dalle scansioni tomografiche.

Sono state effettuate, utilizzando il software LS-Dyna [10], una serie di simulazioni FEA per determinare il comportamento tensione-deformazione delle singole beam al variare del diametro dei difetti interni e del materiale. Per i dati del materiale per i diversi trattamenti termici ci si riferisce a quanto riportato in *Tabella 2.1* e alle curve reali di tensione-deformazione riportata in *Figura 2.1*. In seguito ad uno studio di convergenza della mesh, è stato scelto di utilizzare una mesh di dimensione 0.06 mm per tutto il cilindro rappresentativo e procedere con un infitimento della mesh pari a 0.04 mm nei punti con deformazioni e stress critici, in particolare nella zona tutta intorno al difetto interno sferico (*Figura 3.7*). Questa scelta, confermata con un'analisi di convergenza, è frutto del compromesso tra precisione dell'analisi e tempo richiesto per la simulazione, con il risultato che si ha un numero ridotto di elementi da simulare che però ben rappresenta il comportamento della beam.

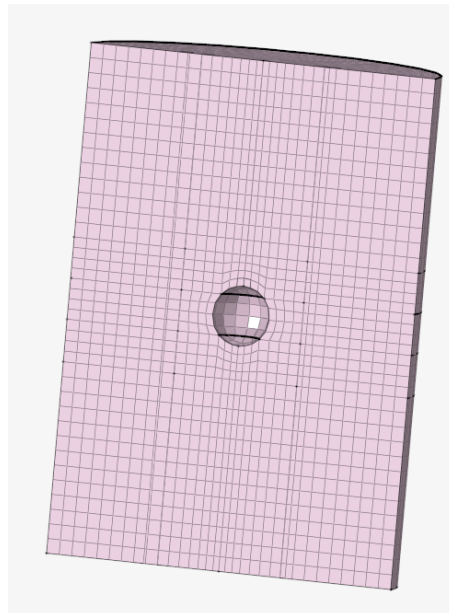


Figura 3.7: Mesh della singola beam

Per le condizioni al contorno si è fatto riferimento ad una prova di trazione della trave. In particolare, mediante la definizione di due set di nodi, i nodi inferiori sono stati bloccati per la traslazione in  $z$  (asse verticale che corrisponde all'asse del cilindro), mantenendo quindi libere le traslazioni nel piano  $xy$  e le rotazioni intorno ai tre assi; ai nodi superiori invece è stato applicato uno spostamento lineare di trazione con velocità costante pari a 200 mm/s. La simulazione per le singole beam è stata effettuata con un *control termination*  $t$  pari a 0.001 s per le simulazioni con materiale As-Built e HT200°C e pari a 0,0027 s per materiale HT300°C. Un esempio dei risultati ottenuti nella simulazione è riportato in *Figura 3.8*. Si procede quindi con la definizione della curva tensione-deformazione della prova a partire dalla curva di forza-spostamento fornita in output dal programma. La tensione è calcolata come rapporto tra forza applicata e area nominale della beam, mentre la deformazione è il rapporto tra spostamento e lunghezza iniziale della beam. Le simulazioni si ripetono per i tre diversi trattamenti termici dei provini variando il diametro interno del difetto a partire dalla *Tabella 3.1* riportata in precedenza. Si è scelto di non analizzare le classi che corrispondono a diametri interni inferiori a 130  $\mu\text{m}$ , in quanto ritenute superflue, poiché i risultati ottenuti sono molto simili alla curva della prima classe successiva esaminata.

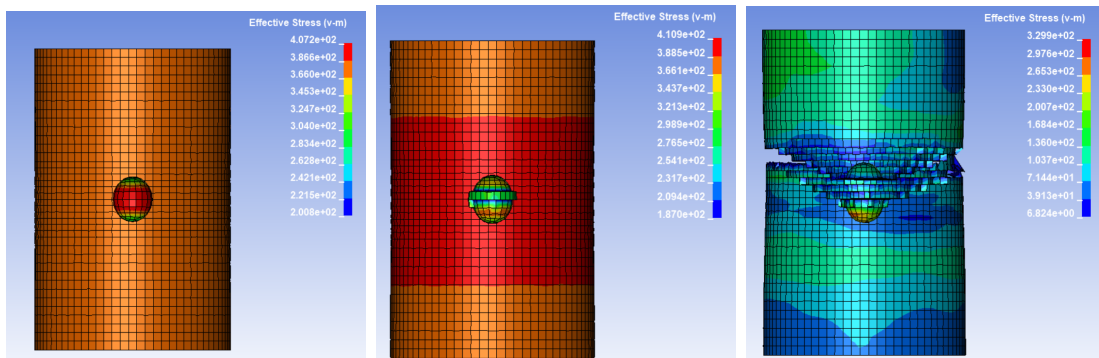


Figura 3.8: Esempio dei risultati della simulazione per beam in AlSi10Mg trattata a 200°C con diametro del difetto interno pari a 282  $\mu\text{m}$ , da sx simulazione a  $t = 0,0005$  s,  $t = 0.0006$  s e  $t = 0.001$  s

Nelle *Figure 3.9*, *3.10* e *3.11* si riportano le curve tensione-deformazione ricavate nelle diverse simulazioni: per facilità di lettura si riportano separatamente le curve ottenute per ogni materiale considerato. Si nota come, avviando simulazioni con lo stesso spostamento lineare imposto ai nodi superiori, l'aumento delle dimensioni del difetto influenzi negativamente le proprietà meccaniche della beam, in particolare sia la tensione massima che la deformazione massima raggiunta diminuiscono all'aumentare della dimensione del difetto; ciò è sicuramente riconducibile, come detto in precedenza, alla riduzione del volume della beam.

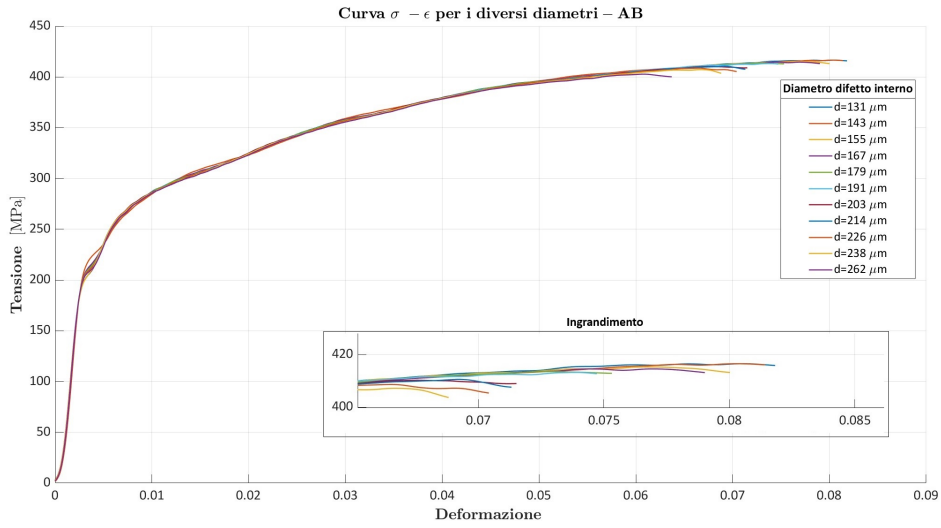


Figura 3.9: Curve al variare del difetto interno nella beam - As-Built

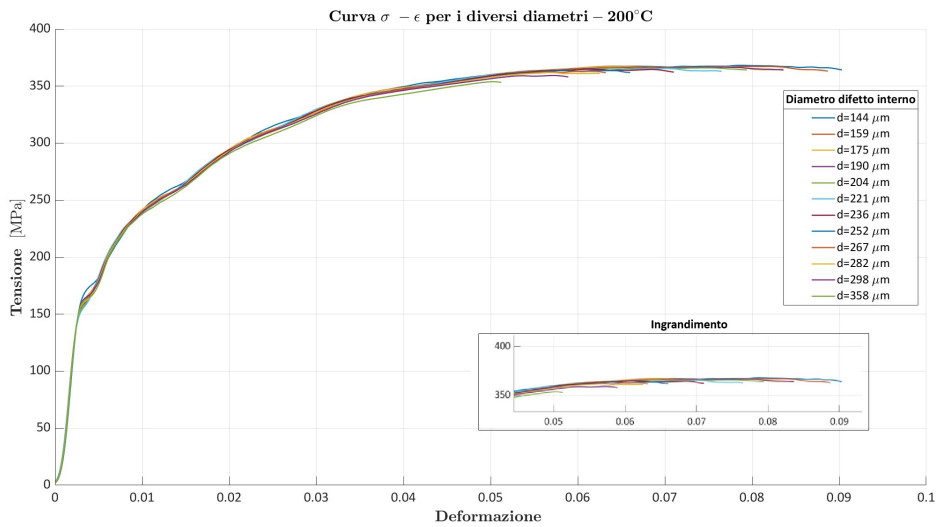


Figura 3.10: Curve al variare del difetto interno nella beam - Trattamento termico 200°C

Un ulteriore grafico (*Figura 3.12*) offre un quadro completo dei valori della deformazione ultima raggiunta in funzione del diametro del difetto. La deformazione riportata è normalizzata, ovvero i diversi valori di deformazione a fine simulazione ottenuti per i diversi trattamenti termici sono stati divisi per il valore *fail* imposto. Il parametro *fail*, ovvero valore di deformazione oltre il quale si verifica la rottura dell'elemento considerato, è stato ricavato dalle curve forza-spostamento in *Figura*



2.1. In particolare per As-Built il parametro fail è pari a 0,09906, per HT200 è pari a 0.125275 e per HT300 è pari a 0.4397771. Risulta quindi importante tener conto della dimensione del difetto come parametro su cui basare il modello numerico che tiene conto della presenza dei difetti.

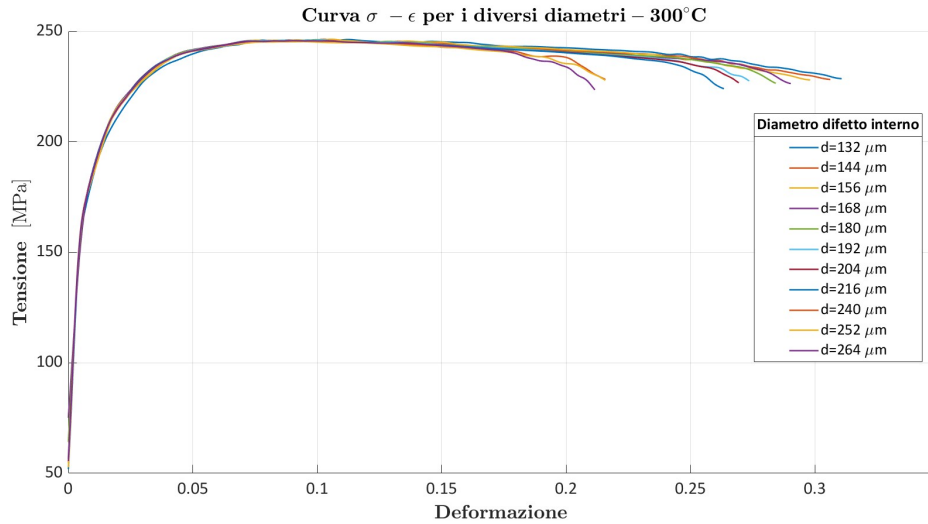


Figura 3.11: Curve al variare del difetto interno nella beam - Trattamento termico 300°C

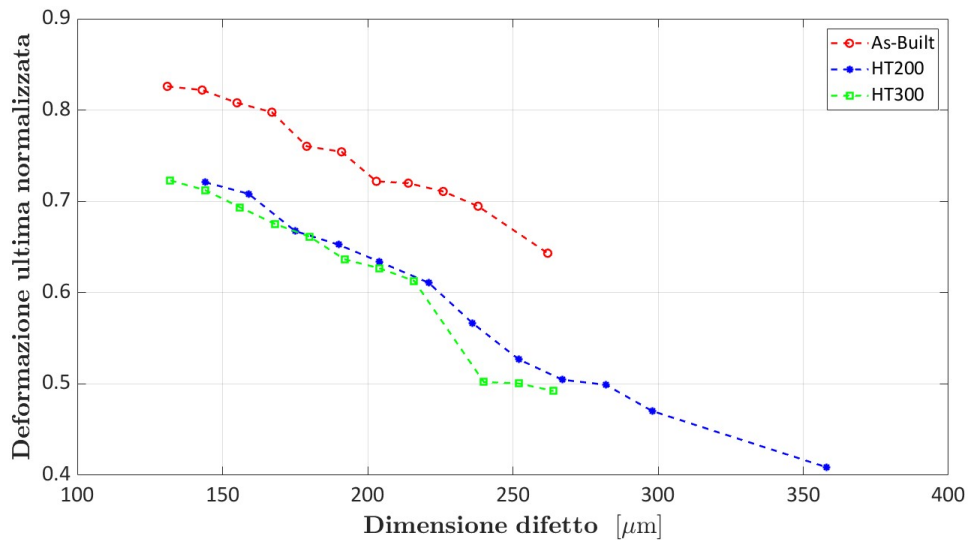


Figura 3.12: Relazione deformazione massima e dimensione del difetto

# Capitolo 4

## Analisi della microstruttura

In questo capitolo si vuole studiare come i trattamenti termici influiscono sulle microstrutture del materiale e sulle sue proprietà. La microstruttura della lega AlSi10Mg risulta essere composta da una matrice di alluminio, da una struttura di silicio in fase eutettica e particelle di silicio distribuite in modo diffuso nella matrice di Al. Con l'aumento della temperatura del trattamento termico, si hanno delle fratture del Si eutettico, mentre le particelle di Si distribuite nella matrice diminuiscono di dimensione [11]. Risulta evidente che variando le temperature dei diversi trattamenti termici è possibile valutare e controllare la microstruttura e le proprietà meccaniche della lega, che risultano significativamente diverse da quelle della lega As-Built. Come già visto nel *Paragrafo 2.1*, i trattamenti termici della lega di alluminio in esame sono finalizzate al rafforzamento per soluzione solida e per invecchiamento (aging).

Lo studio della microstruttura include numerosi aspetti come la dimensione, la forma e l'orientazione dei grani, la presenza di difetti e porosità, la distribuzione delle fasi, ecc. Per l'analisi della microstruttura si utilizzano simultaneamente diverse tecniche, tra cui:

- *Microscopia Elettronica a Scansione (SEM)*, che, attraverso l'utilizzo di un fascio di elettroni mobili, consente di ottenere immagini ad alta risoluzione della superficie del materiale, rilevando dettagli topografici e strutturali, con il riconoscimento delle forme cristalline che lo costituiscono;
- *Diffrazione di Elettroni Retrodiffusi (EBSD)*, che accoppiata al SEM permette di determinare l'orientazione cristallografica dei grani, la dimensione dei cristalli e la distribuzione delle fasi;
- *Microscopia Elettronica in Trasmissione (TEM)* fornisce immagini ad altissima risoluzione della microstruttura interna, evidenziando le celle elementari che si ripetono in un piano e permettendo di osservare difetti cristallini, dislocazioni e precipitati a livello nanometrico.

Le diverse tecniche in combinazione permettono di ottenere una caratterizzazione completa della microstruttura del materiale.

### Tecnica EBSD

La tecnica EBSD (Electron BackScattered Diffraction) sfrutta la diffrazione degli elettroni retrodiffusi quando un fascio elettronico colpisce un campione inclinato di circa  $70^\circ$ . Gli elettroni diffratti formano un pattern specifico, contenente informazioni sulla struttura cristallina locale. La tecnica EBSD è spesso integrata con i sistemi EDS, consentendo la misurazione simultanea sia delle informazioni chimiche che di quelle cristallografiche del campione. Affinché ciò sia possibile, il campione deve essere posizionato in modo che il rivelatore EBSD possa acquisire modelli di diffrazione di buona qualità e il rivelatore EDS possa misurare simultaneamente un numero sufficientemente elevato di conteggi di raggi X. La *Figura 4.1* mostra la geometria ideale per EBSD ed EDS integrati, con il rivelatore EDS montato sopra il rivelatore EBSD [12].

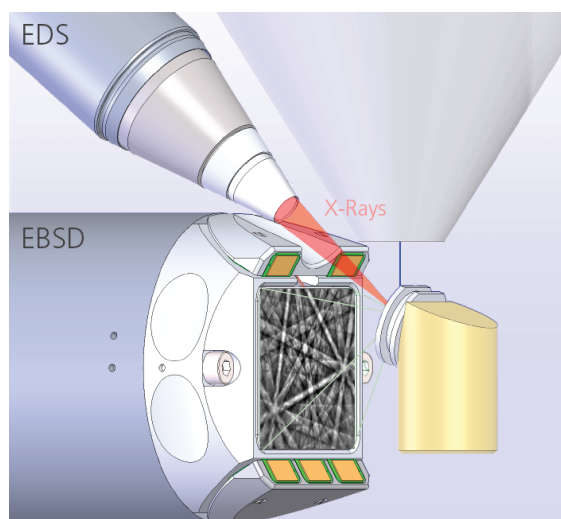


Figura 4.1: Rappresentazione schematica di una geometria ottimale del sistema integrato EBSD e EDS [12]

I dati EBSD possono essere rappresentati attraverso diverse modalità grafiche, tra cui le *mappe di orientazione cristallografica (Inverse Pole Figure, IPF)*, che mostrano la distribuzione delle direzioni cristallografiche rispetto all'orientazione della superficie analizzata, e le *mappe di confini di grano*, che evidenziano le dimensioni del grano, la distribuzione e l'energia delle interfacce cristalline. Un altro metodo comune è l'uso delle *mappe di misorientazione locale (Kernel Average Misorientation, KAM)*, che permettono di valutare il grado di deformazione plastica accumulata all'interno dei grani. Queste rappresentazioni sono fondamentali per

comprendere fenomeni microstrutturali come la ricristallizzazione, la crescita dei grani e la formazione della grana. Per riconoscere i confini tra i grani, il software utilizza una soglia di disorientazione, generalmente fissata a  $15^\circ$  per separare i confini ad alto angolo (High-Angle Grain Boundaries, HAGB) da quelli a basso angolo (Low-Angle Grain Boundaries, LAGB). I grani possono essere definiti sia in termini di diametro medio equivalente, che assume una forma sferica per semplificare il calcolo, sia tramite una distribuzione statistica delle loro dimensioni [12].

## 4.1 Stato dell'arte sugli effetti del trattamento termico sulla microstruttura della lega

Numerosi studi si sono concentrati nel valutare gli stress residui che la struttura presenta dopo la stampa in L-PBF e si è visto che è possibile ridurli procedendo con un trattamento termico di ricottura a  $300^\circ\text{C}$ ; questo però modifica notevolmente la microstruttura, influenzando il comportamento di deformazione e rottura del provino. Si è osservato come, in seguito a trattamento termico a  $300^\circ\text{C}$  per 2h, il materiale trattato presenta una resistenza a rottura molto inferiore dell'As-Built (circa il 40 %) mentre l'allungamento a rottura aumenta significativamente, ciò conferma i risultati delle prove a trazione riportati in *Figura 2.1*. In sintesi, il trattamento termico di stress relieving consente di aumentare la duttilità del materiale a discapito però del carico di rottura.

Lo studio "*Annealing behavior of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion*" [4] si pone come obiettivo quello di strutturare una base teorica per ottimizzare i parametri del processo di trattamento termico a partire dall'osservazione dell'evoluzione delle microstrutture alle diverse temperature di ricottura del materiale, al fine di comprendere i meccanismi di ricristallizzazione e nucleazione della lega. I trattamenti termici sono stati effettuati su provini pieni di AlSi10Mg prodotti con L-PBF, diversi quindi da quelli analizzati in questo lavoro di tesi che presentano struttura lattice. Le temperature applicate sono state di  $100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$  e  $520^\circ\text{C}$ , con un tempo di trattamento di 2 ore. Le immagini SEM mostrano variazioni significative della microstruttura al variare della temperatura: in particolare a  $200^\circ\text{C}$ , la struttura eutettica del Si si mantiene e se ne osserva una lieve sferoidizzazione mentre aumenta il numero di particelle di Si immerse nella matrice. A  $300^\circ\text{C}$ , la struttura eutettica del Si viene quasi completamente distrutta e i precipitati di Si diventano particelle fini. A  $520^\circ\text{C}$ , la struttura eutettica del Si scompare del tutto, con particelle di Si che crescono notevolmente fino a dimensioni di 1-3  $\mu\text{m}$ , circa 50 volte più grandi di quelle a  $200^\circ\text{C}$ . Le mappe EBSD (*Figura 4.2*), invece, mostrano che la struttura cambia poco fino a  $300^\circ\text{C}$ ; solo aumentando la temperatura fino a  $520^\circ\text{C}$  è apprezzabile una crescita graduale dei grani. In generale, quindi, si può affermare che l'effetto del trattamento termico a

basse e medie temperature (200°C e 300°C) risulta limitato e difficile da rilevare con immagini EBSD, in quanto si evidenziano variazioni minime della topografia delle mappe di orientazione, nonostante le immagini SEM siano diverse alle diverse temperature. Per il trattamento a 520°C, le immagini EBSD confermano la crescita della dimensione del grano rilevate dalle immagini SEM, anche se la crescita è contenuta a causa della presenza di particelle di Si a bordo grani che ne limitano la crescita, conferendo alla lega una buona stabilità termica. In definitiva, si è riscontrato che, all'aumentare della temperatura di trattamento termico, la dimensione media dei grani della lega, le disorientazioni dei confini di grano e il rapporto di ricristallizzazione continuano ad aumentare.

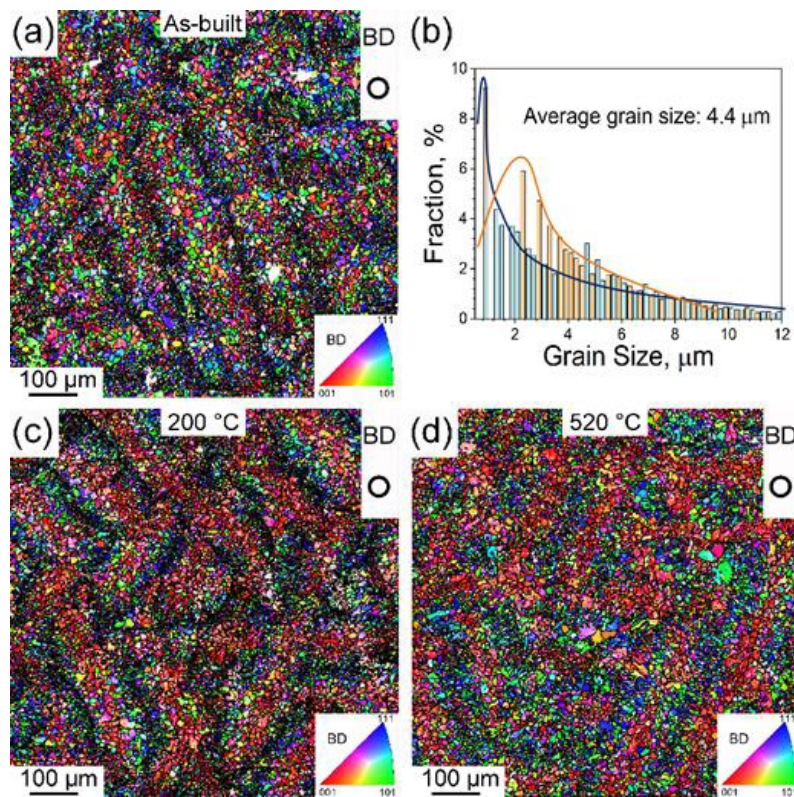


Figura 4.2: Immagini EBSD della lega AlSi10Mg: a) AB, b) diagramma di distribuzione della dimensione dei grani, c) HT 200°C, d) HT 520°C [4]

## 4.2 Risultati EBSD dei provini

In questo progetto di tesi, per lo studio degli effetti dei diversi trattamenti termici sulla microstruttura della lega AlSi10Mg sono stati analizzati tre provini con struttura lattice 2x2x2 (As-Built, HT200, HT300). Prima dell'analisi EBSD, i provini

sono stati preparati tramite lucidatura meccanica per garantire una superficie adatta alla caratterizzazione cristallografica. I campioni sono stati inglobati nella resina epossidica per facilitare la manipolazione durante la successiva fase di lucidatura. La lucidatura è stata eseguita con la macchina Mecatech 250 [13], riportata in *Figura 4.3*. Durante l'operazione di lucidatura, sono state dapprima utilizzate carte abrasive di SiC con numero di grana crescente ( in ordine 180, 320, 600, 1200), con l'ausilio dell'acqua per facilitare la rimozione dei detriti che si sviluppano durante l'abrasione e ridurre l'attrito per evitare erosione e generazione di calore eccessivo. Successivamente, per ottenere una finitura a specchio, indispensabile per l'osservazione al microscopio elettronico, si è passati a panni *PAD TOP*, *RAM*, *NT E SUPRA* con pasta diamantata rispettivamente da 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  e 0.03  $\mu\text{m}$ .



Figura 4.3: Lucidatrice Mecatech 250

La lucidatura e l'analisi al microscopio elettronico sono state effettuate sulle facce in direzione perpendicolare alla direzione di crescita Z, ovvero per una sezione del provino parallela al piano di stampa xy.

Il microscopio elettronico utilizzato per l'analisi EBSD presenta una camera per l'acquisizione delle immagini con risoluzione 1244x1024 px. Si riportano di seguito le immagini ottenute dall'Analisi EBSD dei campioni sottoposti a diversi trattamenti termici. Poiché la maggior parte dei campioni, in generale, presenta imperfezioni superficiali, vuoti o crepe che non forniscono una soluzione perfetta in una scansione EBSD, risulta necessario eseguire una pulizia dei dati prima di poter valutare parametri come le proprietà dei confini e la dimensioni dei grani; l'azienda *Oxford Instruments*[12], fornitrice del software AZtec utilizzato per queste analisi, suggerisce di riportare le analisi effettuate insieme alle misure di pulizia adottate, al fine di conferire valore scientifico alla trattazione.

### 4.2.1 As-Built

Si riportano di seguito le impostazioni del microscopio elettronico per l'analisi:

- *Step size: 0,15  $\mu\text{m}$ ;*
- *Velocità di acquisizione: 7,13 Hz;*
- *Tempo di acquisizione: 12h;*
- *Magnification: 890x ;*
- *Working Distance 14,9 mm;*
- *Detector Insertion Distance 170,9 mm.*

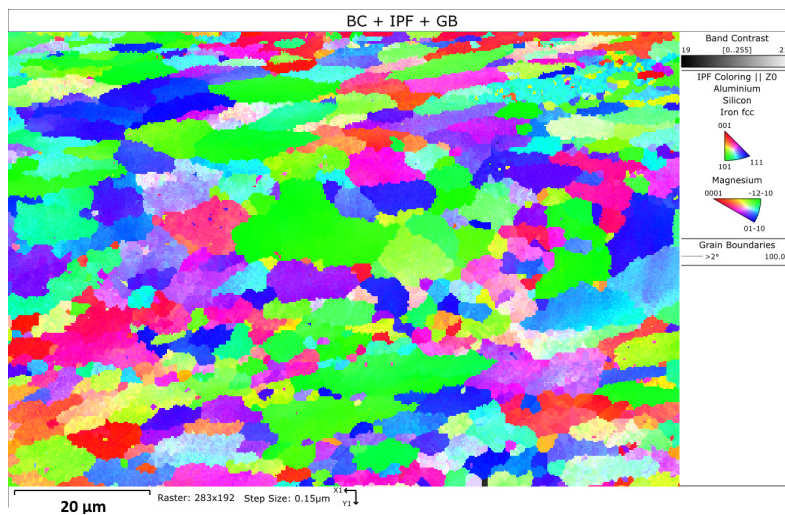


Figura 4.4: Immagine EBSD della lega AlSi10Mg As-Built

Si riportano le misure di pulizia adottate:

- *Auto-Clean;*
- *Zero Solution Removal: One Neighbor;*

Si riportano i risultati ottenuti (*Figura 4.4*) in seguito alla pulizia dei dati:

- *Hit Rate: 99,98%;*
- *Alluminio: 38,65%;*
- *Magnesio: 0,91%;*
- *Silicio: 30,77% ;*
- *Ferro FCC: 29,65%;*

## 4.2.2 Trattamento termico a 200°C

Si riportano di seguito le impostazioni del microscopio elettronico per l'analisi:

- *Step size: 0,3  $\mu\text{m}$ ;*
- *Velocità di acquisizione: 1,31 Hz;*
- *Tempo di acquisizione: 7h;*
- *Magnification: 907x;*
- *Working Distance 14,1 mm;*
- *Detector Insertion Distance 171,9 mm;*

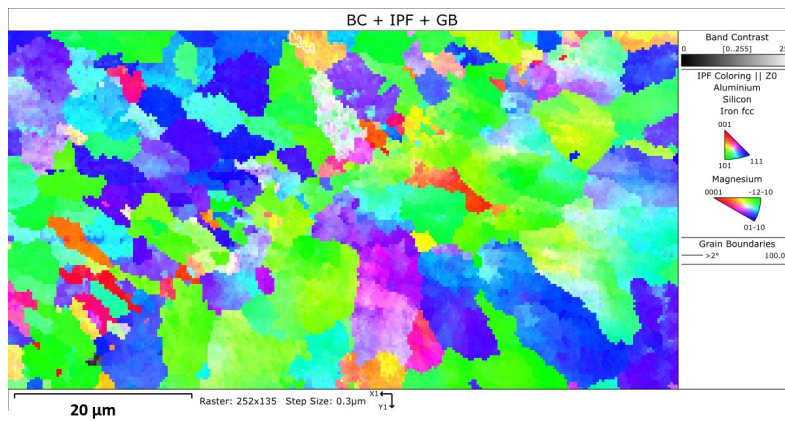


Figura 4.5: Immagine EBSD della lega AlSi10Mg 200°C

Si riportano le misure di pulizia adottate:

- *Auto-Clean;*
- *Zero Solution Removal: Three Neighbor;*
- *Zero Solution Removal: One Neighbor;*

Si riportano i risultati ottenuti (*Figura 4.5*) in seguito alla pulizia dei dati:

- *Hit Rate: 99,94%;*
- *Alluminio: 62,64%;*
- *Magnesio: 0,1%;*
- *Silicio: 18,56% ;*
- *Ferro FCC: 18,73%.*



### 4.2.3 Trattamento termico a 300°C

Si riportano di seguito le impostazioni del microscopio elettronico per l'analisi:

- *Step size: 0,35  $\mu\text{m}$ ;*
- *Velocità di acquisizione: 0,99 Hz;*
- *Tempo di acquisizione: 15h;*
- *Magnification: 926x ;*
- *Working Distance 14,7 mm;*
- *Detector Insertion Distance 168,9 mm;*

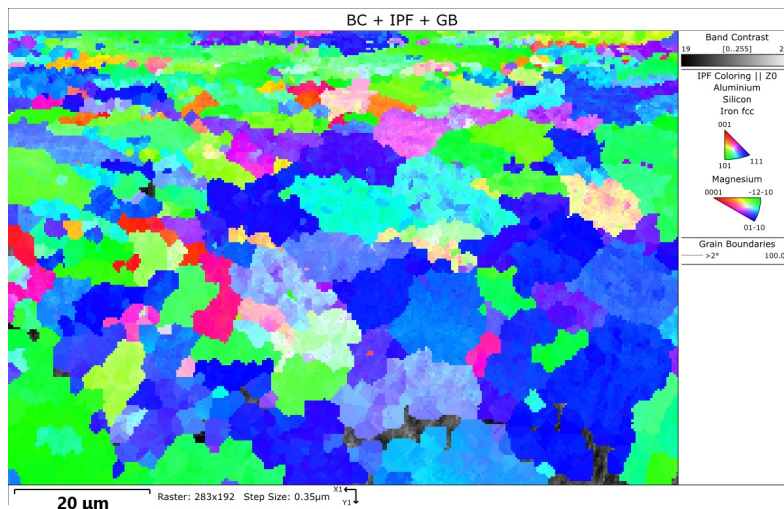


Figura 4.6: Immagine EBSD della lega AlSi10Mg 300°C

Si riportano le misure di pulizia adottate:

- *Auto-Clean;*
- *Zero Solution Removal: Three Neighbor;*
- *Zero Solution Removal: One Neighbor;*

Si riportano i risultati ottenuti (*Figura 4.6*) in seguito alla pulizia dei dati:

- *Hit Rate: 98,65%;*
- *Alluminio: 47,62%;*
- *Magnesio: 0,06%;*

- Silicio: 29,33% ;
- Ferro FCC: 21,64%;

Dal confronto con le microstrutture si può affermare che il trattamento termico comporta un aumento della dimensione dei grani cristallini, con la progressiva scomparsa delle strutture di Silicio a bordo grano, molto evidenti nella *Figura 4.4* che si riferisce all'As-Built. Le particelle di Si, presenti all'interno della matrice di Al, diminuiscono di dimensione all'aumentare della temperatura. Ciò è evidente dalle immagini EBSD riportate in precedenza ma soprattutto dall'analisi della Grain List che si ottiene in output dalla scansione al microscopio elettronico, di cui si riportano i dati relativi alla dimensione dei grani in *Figura 4.7*.

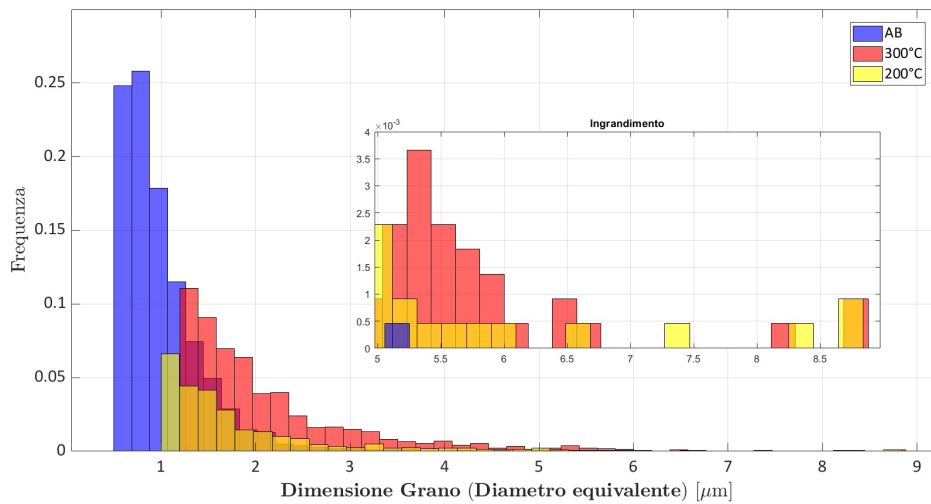


Figura 4.7: Diagramma di distribuzione della dimensione dei grani: confronto tra AB, HT200°C e HT300°C

Il diagramma rappresenta la distribuzione della dimensione dei grani alle diverse temperature di trattamento considerando il diametro equivalente fornito dal software come parametro di valutazione. È evidente come all'aumentare della temperatura i picchi delle distribuzioni si spostano su diametri maggiori; in tutti i casi, la distribuzione presenta un andamento decrescente. In particolare, per l'As-Built il picco è concentrato tra un diametro equivalente di 0,5 - 0,7  $\mu\text{m}$  con una media di dimensione del diametro del grano pari a 0,99  $\mu\text{m}$  e dimensione massima individuata tra i 5,1 e i 5,25  $\mu\text{m}$  ; per il provino che ha subito trattamento termico a 200°C si ha il picco della distribuzione tra 1,0 e 1,2  $\mu\text{m}$ , una dimensione media dei grani pari a 1,80  $\mu\text{m}$  e dimensione massima intorno a 8,6  $\mu\text{m}$ ; per il provino che ha subito trattamento termico a 300°C si ha il picco della distribuzione tra 1,2 e 1,4  $\mu\text{m}$ , una dimensione media dei grani pari a 2,11  $\mu\text{m}$  e dimensione massima

intorno a 8,7  $\mu\text{m}$ . I risultati sono confrontabili con quelli presentati nel *Paragrafo 4.1*: l'andamento delle distribuzioni delle dimensioni dei grani, in funzione dei trattamenti termici subiti, in *Figura 4.2* è uguale a quello ottenuto in *Figura 4.7*, anche se le dimensioni dei grani presenti in quest'ultimo risultano inferiori. Ciò è giustificabile tenendo conto della dimensione del provino analizzato, fattore che influenza la crescita del grano; nei componenti di dimensione ridotta la crescita del grano è limitata e si ottiene una microstruttura più fine. È bene sottolineare che il provino dello studio riportato nel paragrafo precedente è stato realizzato in Al-Si10Mg come campione pieno di dimensioni 5mm x 3mm, mentre in questa tesi sono stati analizzati con EBSD provini in struttura lattice 2x2x2 che presentano singole beam di diametro teorico pari a 1,4 mm (si parla di diametro teorico in quanto il diametro effettivo risulta diverso nelle diverse sezioni a causa delle porosità dovute al processo produttivo L-PBF). La struttura lattice essendo aperta favorisce un maggior scambio termico con l'ambiente intorno rispetto al provino pieno: si ha quindi, per la struttura lattice, un raffreddamento più rapido con la riduzione del tempo di crescita dei grani; inoltre, una maggiore superficie di scambio significa un numero maggiore di siti in cui può avvenire la nucleazione e la successiva crescita dei grani, una nucleazione più intensa porta alla formazione di tanti piccoli grani in quanto ogni grano è limitato dalla presenza di altri grani vicini [14].

# Capitolo 5

## Prove di compressione quasi-statica

I modelli numerici relativi alle strutture reticolari sono stati validati sui risultati di prove di compressione svolti sperimentalmente. In questo capitolo saranno presentate le prove di compressione quasi-statica effettuate in laboratorio con i relativi risultati sperimentali, a cui segue un confronto con i risultati numerici del modello FE. La prova di compressione quasi-statica viene utilizzata per determinare le proprietà meccaniche di un materiale, sottoponendolo a compressione quasi-statica. La velocità della prova risulta molto bassa in maniera tale da trascurare gli effetti inerziali e quindi valutare il comportamento meccanico in condizioni il più possibile simili a quelle statiche.

### 5.1 Test sperimentali

I test di compressione quasi-statica sono stati effettuati con il macchinario *Zwick-Roell Z100* impostando i seguenti parametri di prova:

- *Velocità di avanzamento: 1 mm/min;*
- *Precarico: 30 N;*
- *Limite sulla forza massima: 50 kN;*
- *Limite sul decremento della forza massima pari al 90% .*

La velocità di avanzamento è stata regolata su un valore molto ridotto per evitare effetti legati al fenomeno dello strain rate, ovvero la variazione della deformazione nel tempo, che correla la velocità con cui la deformazione viene applicata con la risposta del materiale. Le caratteristiche del materiale dipendono dalla velocità di

deformazione utilizzata nei test sperimentali, come verrà confermato nel capitolo successivo con la presentazione dei risultati della prova d’impatto.

Durante i test di compressione è possibile osservare il fenomeno della densificazione, in cui il progressivo collasso degli elementi beam porta alla compattazione del materiale e ad un incremento repentino della tensione, fino alla rottura completa delle celle. I test effettuati si interrompono prima dell’inizio della densificazione: per il materiale As-Built e HT200 il fenomeno della densificazione si registra in seguito al primo cedimento della struttura, con un iniziale crollo della forza fino a valori molto bassi, seguito da un successivo aumento di essa. Di conseguenza, si decide di interrompere manualmente i test in seguito al primo cedimento. Nel caso del provino trattato HT300, i risultati mostrano un primo picco di forza massima raggiunta, seguito da diversi massimi locali che corrispondono al cedimento successivo di altri layer. Tuttavia, questi massimi, non rappresentano propriamente l’inizio della densificazione, in quanto il provino presenta ancora alcune celle integre.

Sono stati effettuati complessivamente 12 test di compressione quasi-statica: 6 test su struttura lattice 2x2x2 ( 2 test per ogni materiale analizzato: As-Built, HT200 e HT300) e 6 test su struttura lattice 3x3x3 ( 2 test per ciascun materiale). I test sperimentali sono stati documentati con video per confrontare le modalità di cedimento del provino reale con quelle registrate con l’analisi agli elementi finiti del provino CAD. Il software associato alla macchina di compressione restituisce per ogni prova una curva forza-spostamento; poiché i provini analizzati presentano due diverse strutture (2x2x2 e 3x3x3), si è preferito riferirsi alle curve Tensione-Deformazione che ne derivano, permettendo così un confronto più adeguato dei risultati ottenuti su strutture differenti. La tensione è calcolata come il rapporto tra la forza applicata e l’area della sezione trasversale del campione, quest’ultima si riferisce all’involuppo continuo del campione, senza tener conto dei vuoti presenti nella geometria della struttura lattice. La deformazione è calcolata come il rapporto tra lo spostamento misurato e l’altezza iniziale della struttura, cioè la dimensione della struttura lungo la direzione di applicazione del carico.

Nei due grafici mostrati in *Figura 5.1 e 5.2* è evidente la ripetibilità dei test effettuati per ogni materiale confrontando l’andamento della tensione rispetto alla deformazione tra i test 1 e 2, eseguiti sui tre materiali e ripetuti per entrambe strutture. Le due strutture mostrano un comportamento sovrapponibile per ciascun materiale, con curve Tensione-Deformazione simili. In particolare, per il materiale As-Built, tutti e quattro i test (sia su struttura 2x2x2 che su 3x3x3) hanno raggiunto una tensione massima compresa tra 43 e 45 MPa, con valori di deformazione finale di circa il 13%. Per i provini trattati a 200°C le tensioni massime raggiunte sono leggermente inferiori all’As-Built con picchi tra i 39 e 40 MPa e valori di deformazione finale di circa l’11%. I provini trattati a 300°C presentano tensioni massime inferiori ai casi precedenti (30 MPa) ma deformazioni finali raggiunte molto elevate, circa il 50% prima dell’innesco del fenomeno della densificazione.

Analizzando la sequenza di immagini presenti in *Figura 5.3*, si nota come il provino

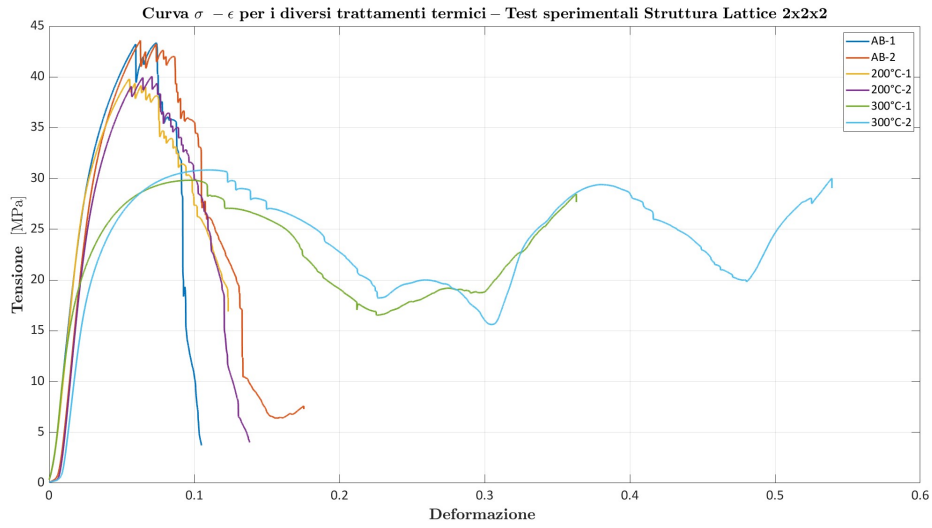


Figura 5.1: Test sperimentali di Compressione quasi-statica: confronto tra As-Built, HT200, HT300 per struttura lattice 2x2x2

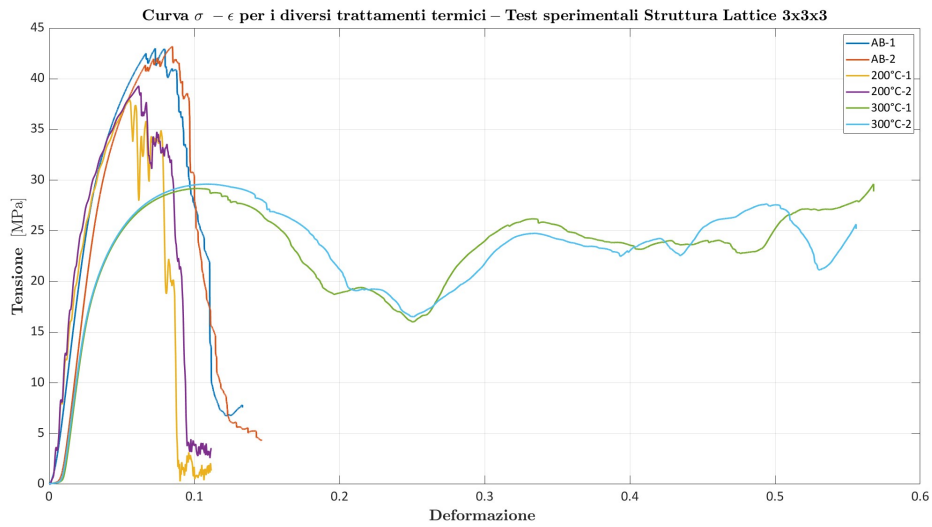


Figura 5.2: Test sperimentali di Compressione quasi-statica: confronto tra As-Built, HT200, HT300 per struttura lattice 3x3x3

inizialmente si deforma plasticamente, con struttura reticolare ancora ben definita, ma subito segue il cedimento strutturale, con il collasso progressivo di alcuni elementi beam nella parte superiore. Nella terza immagine la frattura è evidente e si ha un parziale schiacciamento della struttura, indicando l'avanzamento del collasso

fino alla rottura completa alla fine della prova, come riportato nella curva tensione-deformazione corrispondente.

Lo stesso comportamento a rottura è riscontrabile anche nel provino As-Built con struttura 3x3x3, in particolare nella terza immagine in *Figura 5.4* è ben visibile la modalità di rottura con più crepe consecutive a 45° rispetto alla direzione di carico, di cui si è parlato nel *Paragrafo 1.2*.

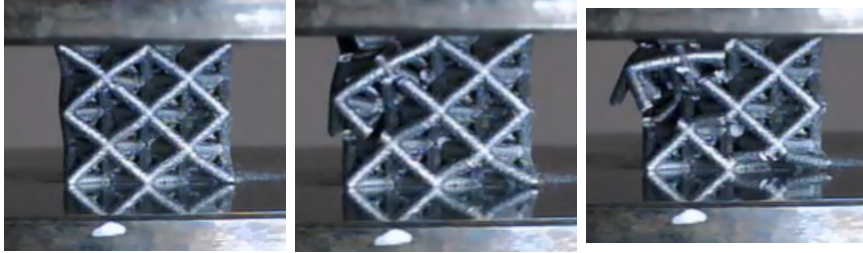


Figura 5.3: Sequenza di rottura provino As-Built cella 2x2x2 Test 1

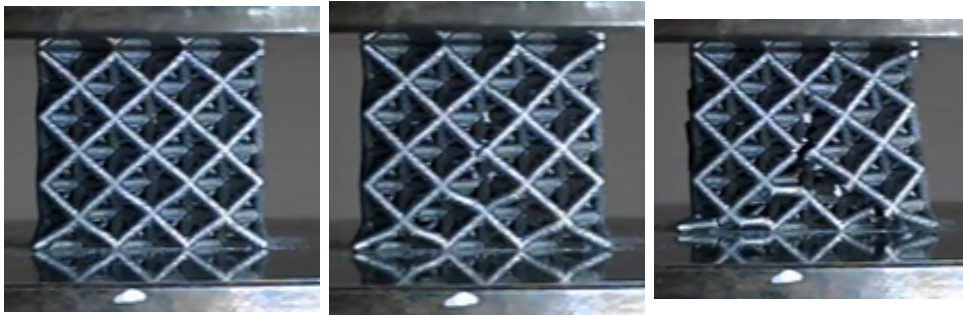


Figura 5.4: Sequenza di rottura provino As-Built cella 3x3x3 Test 1

Anche per il provino trattato a 200°C struttura 2x2x2, si ha un primo schiacciamento nella regione di contatto, che causa una lieve deformazione plastica, seguito da cricche che interessano diverse beam della struttura (*Figura 5.5*).

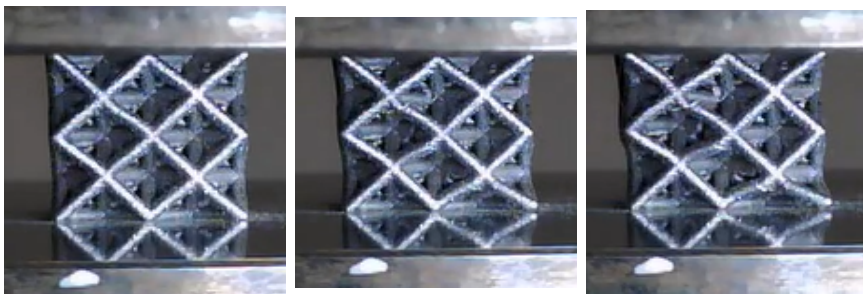


Figura 5.5: Sequenza di rottura provino HT200 cella 2x2x2 Test 1

Per il provino trattato a 300°C il discorso cambia. Nelle *Figure 5.6 e 5.7* viene mostrata la progressiva rottura del provino. Nella prima immagine di entrambe le sequenze, i provini mostrano già segni di deformazione plastica, con una chiara inclinazione delle celle a circa 45° e senza rottura immediata di esse. Il cedimento continua e nelle immagini successive il collasso delle celle è più evidente: ciò avviene con meccanismi di instabilità strutturale dei diversi layer successivi (meccanismo di *buckling locale* visto nel *Paragrafo 1.2*). Alla fine della prova la struttura è completamente schiacciata, si è giunti alla rottura finale. In queste sequenze di immagini è quindi visibile quanto descritto nei capitoli precedenti. Il trattamento termico a 300°C riduce la fragilità del materiale, aumentandone la capacità di deformarsi plasticamente prima della frattura, diversamente da come avviene per i provini As-Built e HT200 in cui si ha una risposta del materiale più fragile con rotture improvvise nelle sezioni più sollecitate della struttura.

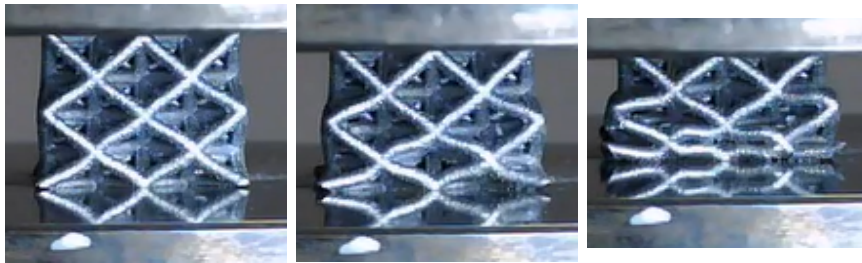


Figura 5.6: Sequenza di rottura provino HT300 cella 2x2x2 Test 1



Figura 5.7: Sequenza di rottura provino HT300 cella 3x3x3 Test 1

Infine nelle *Tabelle 5.1 e 5.2* sono riportati tutti i dati delle prove sperimentali effettuati sulle due diverse strutture lattice. Anche queste tabelle riassuntive confermano la ripetibilità dei test effettuati. Sono riportati in tabella i dati relativi alla forza massima raggiunta e all'energia assorbita dai provini. Quest'ultima è stata calcolata a partire dalla curva forza-spostamento, attraverso un integrale cumulativo (utilizzando la funzione *cumtrapz(spostamento, forza)* mediante uno script di MATLAB). Per i test svolti con provini AS-Built struttura 2x2x2, i valori di energia



riportati sono coerenti con le curve di *Figura 5.1*: le tensioni massime raggiunte (e quindi le forze massime) sono pressoché identiche, mentre la deformazione finale per il test AB\_2x2\_2 risulta maggiore, da qui la maggiore energia assorbita a fine di questo test. Anche i risultati dei provini HT300 struttura 2x2x2 mostrano dei diversi valori di energia massima: i due test presentano curve tensione-deformazione molto simile ma il test HT300\_1 è stato interrotto per un valore di deformazione minore. Sia per le strutture 2x2x2 sia 3x3x3, i provini che hanno subito trattamento termico a 300°C sono in grado di assorbire a fine test una quantità elevata di energia: in particolare, per la struttura 2x2x2 e test 2 l'energia assorbita da HT300 si triplica rispetto ai risultati ottenuti da As-Built e HT200, per la struttura 3x3x3 il provino HT300 presenta un valore di energia assorbita pari a più di 3 volte quello dei provini As-Built e pari a circa 4 volte quello dei provini HT200.

<b>Provini Struttura 2x2x2</b>		
	<b>F max [kN]</b>	<b>Energia max [J]</b>
AB Test 1	14,68	18,93
AB Test 2	14,76	24,56
200 Test 1	13,47	21,94
200 Test 2	13,56	21,32
300 Test 1	10,10	51,12
300 Test 2	10,44	66,74

Tabella 5.1: Risultati sperimentali Prova di Compressione quasi-statica struttura 2x2x2

<b>Provini Struttura 3x3x3</b>		
	<b>F max [kN]</b>	<b>Energia max [J]</b>
AB Test 1	32,45	66,90
AB Test 2	32,58	66,81
200 Test 1	28,62	46,85
200 Test 2	29,65	53,62
300 Test 1	22,02	205,47
300 Test 2	22,34	206,06

Tabella 5.2: Risultati sperimentali Prova di Compressione quasi-statica struttura 3x3x3

## 5.2 Modello FE senza difetti

Come già anticipato, il software utilizzato per le analisi agli elementi finiti è LS-Dyna. Il primo passo per la caratterizzazione meccanica della cella lattice dal punto

di vista numerico consiste nell'impostare un modello agli elementi finiti che simula in maniera più accurata possibile il comportamento meccanico del provino rilevato nei test sperimentali precedentemente descritti. L'impostazione del modello si basa sulla definizione di *keyword*, ovvero dei comandi di input che definiscono gli elementi del modello di simulazione. Ogni *keyword* specifica un aspetto del modello, come la geometria, i materiali, le condizioni al contorno e i parametri di calcolo.

### 5.2.1 Definizione del modello FEM del provino in esame senza difetti

Utilizzando il software LS-Dyna, è stata discretizzata la struttura lattice attraverso una mesh realizzata inizialmente con elementi beam monodimensionali e successivamente tridimensionali, che permettono di ottenere un risultato più accurato. I tempi di calcolo del modello 3D risultano superiori a quelli ottenuti per il modello 1D. Per la definizione del modello si definiscono le stesse *keyword* in entrambi i casi, apportando, dove necessario, alcune modifiche. Per quanto riguarda la geometria del provino (struttura 2x2x2 e 3x3x3), la differenza nel modello è solo nella dimensione, ovvero nella ripetizione della cella elementare nello spazio. La geometria del provino, facendo riferimento alla struttura 3x3x3, è riportata in *Figura 5.8*.

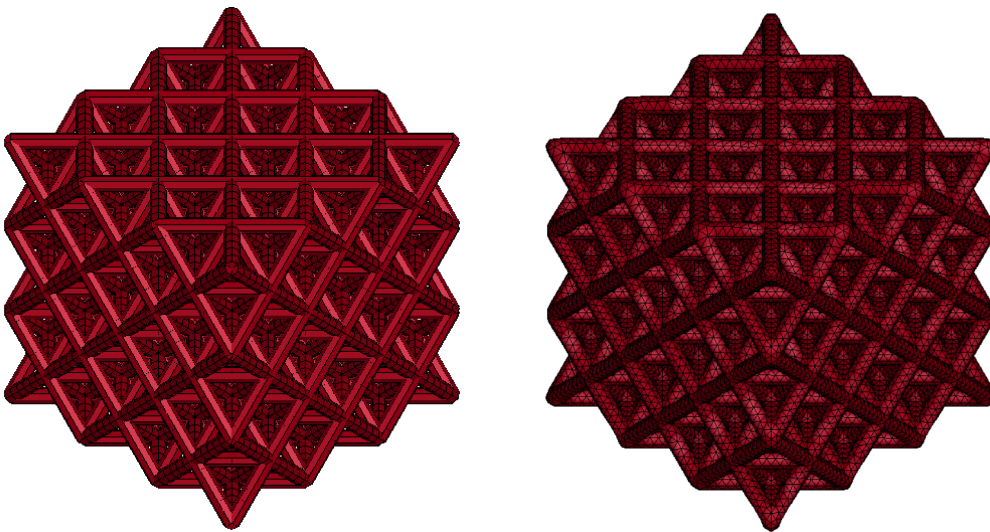


Figura 5.8: Geometria 1D (sx) e 3D (dx) del modello numerico di struttura lattice 3x3x3

Tra le *keyword* inserite nel modello creato si ha:

- *\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE*: definisce il contatto tra una superficie rigida e la cella lattice ;

- **\*CONTROL\_TERMINATION**: viene definito l'istante in cui la prova termina; per le diverse prove sono stati scelti valori tali da garantire che la durata della simulazione sia coerente con quella del test sperimentale, permettendo un confronto diretto tra i risultati numerici e sperimentali. In particolare, per le simulazioni con materiale As-Built e HT200, il control termination è imposto pari a  $t = 0,0035$  s, mentre per il materiale HT300 si ha  $t = 0,009$  s;
- **\*CONTROL\_TIMESTEP**: è una keyword strettamente collegata al concetto di "mass scaling", secondo cui viene introdotta nella struttura una massa non-fisica con l'obiettivo di poter utilizzare un timestep maggiore per l'analisi, riducendo il tempo di calcolo. Durante le simulazioni di compressione quasi-statica gli effetti dell'aggiunta di massa non-fisica sono trascurabili, in quanto l'energia cinetica è trascurabile rispetto all'energia interna del sistema. Si è scelto quindi un valore  $DT2MS = -2.5 \times 10^{-7}$ , in modo che la massa sia aggiunta solo agli elementi il cui timestep risulta minore del modulo di DT2MS;
- **\*DATABASE\_ASCII\_option**: permette di generare file Ascii di determinate grandezze di interesse definite dall'utente; in queste simulazioni di compressione quasi-statica si è voluto considerare in particolare NODOUT e SECFORC, che permettono di visualizzare rispettivamente lo spostamento di un determinato nodo e l'andamento della forza della *\*CROSS\_SECTION*, descritti di seguito;
- **\*DATABASE\_EXTENT\_BINARY**: permette di generare il file binary *d3plot*, che contiene i risultati della simulazione nei vari istanti temporali;
- **\*DATABASE\_CROSS\_SECTION\_PLANE**: definisce una superficie, identificando le coordinate del vettore normale N alla superficie e del vettore laterale, ortogonale al vettore N. Come detto in precedenza, nel post-process, sarà possibile determinare la forza che agisce su questa superficie;
- **\*DATABASE\_HISTORY\_NODE**: in questa keyword si indica il nodo di interesse per valutare lo spostamento nel file Ascii NODOUT. In questa sede è stato scelto di seguire lo spostamento di un nodo della superficie rigida superiore;
- **\*DEFINE\_CURVE**: in questo modello sono state inserite due curve, una di spostamento e una che rappresenta la curva tensione deformazione. Per la curva di spostamento, trattandosi di una compressione quasi statica, è stato sufficiente stabilire i punti che definiscono una retta bisettrice del primo quadrante, uscente dall'origine, imponendo quindi uno spostamento proporzionale al valore della forza che agisce sul sistema. Nello specifico, è stato imposta una velocità di spostamento pari a 1 m/s, piuttosto elevata rispetto

alla velocità di avanzamento del test sperimentale, ma che ad ogni modo non compromette la prova in quanto è sufficiente che l'energia cinetica sia trascurabile rispetto all'energia interna. Per la curva tensione-deformazione, sono state inserite le curve reali definite in *Figura 2.1*, facendo riferimento al solo tratto plastico;

- **\*BOUNDARY**: in questa sede, definisce le condizioni al contorno in termini di vincoli (**\*BOUNDARY\_SPC\_SET**) e in termini di movimenti rigidi applicati ad un determinato set di nodi o superfici (**\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID**);
- **\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_TITLE**: a seconda del materiale considerato vengono inseriti i valori caratteristici di esso, in termini di densità, modulo elastico e coefficiente di Poisson, secondo la *Tabella 2.1*. Inoltre si definisce il valore FAIL necessario per definire il cedimento per ciascuna scheda materiale, da cui si riporta il valore di deformazione ultima per la corrispondente curva, ripresa da **\*DEFINE\_CURVE**.
- **\*MAT\_RIGID**: viene qui definito il materiale utilizzato per simulare le superfici rigide. Anche in questo caso, sono inseriti i valori caratteristici, in riferimento ad un comune acciaio, in termini di densità ( $7,9 \text{ g/cm}^3$ ), modulo elastico (210 GPa) e coefficiente di Poisson (0,3);
- **\*NODE**: riporta il numero dei nodi della struttura lattice;
- **\*SET\_NODE\_LIST**: riporta i set di nodi individuati dall'utente e utilizzati per definire i nodi su cui sono imposti vincoli o applicati carichi utili alla simulazione;
- **\*ELEMENT**: riporta il numero di elementi della struttura lattice e delle superfici rigide che simulano il contatto tra provino e macchinario con cui si effettua la prova. Per le superfici rigide si utilizza **\*ELEMENT\_SHELL**. Per la struttura lattice, a seconda della simulazione, si definisce una determinata tipologia di **ELEMENT**: per il caso monodimensionale si fa riferimento a **\*ELEMENT\_BEAM**, in quanto stiamo simulando la struttura come un insieme di beam monodimensionali, nel caso 3D si utilizza **\*ELEMENT\_SOLID**;
- **\*SECTION**: con questa keyword viene definita la tipologia di formulazione (ELFORM) che il software utilizzerà per analizzare la struttura agli elementi finiti al fine di ottenere risultati confrontabili con quelli ottenuti nei test sperimentali. Viene definita per le superfici rigide una **\*SECTION\_SHELL** con ELFORM = 16 (Fully integrated shell element), per la struttura lattice monodimensionale **\*SECTION\_BEAM** con ELFORM = 1 (Hughes-Liu) e per la struttura tridimensionale **\*SECTION\_SOLID** con ELFORM = 10 (1 point tetrahedron);

- \*PART: attraverso questa keyword, si assegna ad ogni SECTION un MAT completando la definizione della parte, ovvero della struttura lattice.

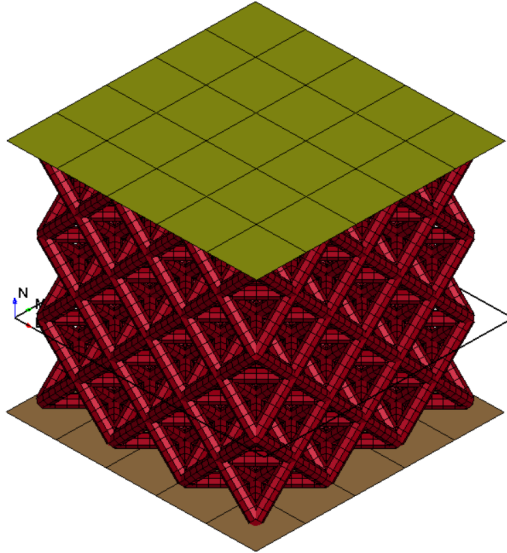


Figura 5.9: Modello FE 3D: struttura lattice 3x3x3 e piani rigidi

La parete rigida inferiore in contatto con la cella lattice è fissa durante la prova di compressione, rappresentando il piano di supporto della macchina; la parete rigida superiore si sposta linearmente secondo quando detto in \*DEFINE\_CURVE simulando la compressione del provino (*Figura 5.9*).

### 5.2.2 Risultati simulazioni e Validazione del modello FE

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti dal modello FE precedentemente descritto, procedendo ad un confronto con i risultati sperimentali. Nelle figure successive sono riportati gli andamenti delle tensioni rispetto alla deformazione al fine di poter confrontare il comportamento delle strutture lattice 2x2x2 e 3x3x3 sia nei test sperimentali sia nelle analisi FEA del modello. Nello specifico, il confronto è effettuato tra i test sperimentali sulle due strutture, i modelli FE 1D e 3D della struttura 2x2x2 e il modello FE 1D della struttura 3x3x3.

In generale, è possibile affermare che i modelli FEA proposti sovrastimano il comportamento a compressione delle strutture lattice in termini di forza massima raggiunta, anche se gli andamenti delle curve numeriche per i tre materiali sono piuttosto simili alle curve reali. In particolare, il primo tratto della curva, che mette in risalto la rigidità della struttura lattice, si ripete per tutti i test e le prove effettuate. Per i modelli 1D questo tratto presenta delle oscillazioni dovute alla semplificazione del modello. Di seguito, si procede con l'analisi specifica per ogni materiale.

## Risultati FEA compressione quasi-statica As-Built

I diversi modelli FE per As-Built hanno dato come risultati le curve mostrate in *Figura 5.10*, *5.11* e *5.12*. Come si può notare, i tre modelli FE, sia 1D sia 3D, sovrastimano il valore della tensione massima, in particolar modo i modelli mono-dimensionali, che però mostrano il raggiungimento di deformazioni riscontrabili nei test sperimentali. Nel modello 3D (*Figura 5.11*) il picco di tensione (circa 48 MPa) si riduce rispetto al modello 1D (circa 54 MPa) (*Figura 5.10*), ma ciò determina comunque un errore percentuale del 10% rispetto ai risultati sperimentali (circa 43 MPa). Nel modello 3D si nota una diminuzione quasi istantanea della tensione oltre il picco, indicando che la rottura della struttura avviene nello stesso moento in tutta la struttura. La deformazione per il modello 3D oltre la quale è avvenuta la rottura del modello è inferiore a quella determinata nei test. Le curve del modello 1D, inoltre, rappresentano più fedelmente le curve sperimentali nel tratto elastico. Confrontando, per la struttura 2x2x2, le curve dei modelli 1D e 3D (*Figura 5.12*) si osserva che l'area sottesa alla curva 1D è nettamente superiore rispetto a quella della curva 3D. Si potrebbe quindi dire che il modello 1D presenta valore di energia assorbita durante la simulazione maggiori di quelli ottenuti con il modello 3D. Ciò risulta confermato dalle immagini in *Figura 5.13*, in cui si vede che il modello 3D a fine simulazione presenta una zona di rottura più ampio, si rompe prima assorbendo meno energia. Il modello 3D, inoltre, mostra una rottura delle celle lungo le diagonali a 45°, seguito dal collasso della struttura, così come avviene nei test sperimentali.

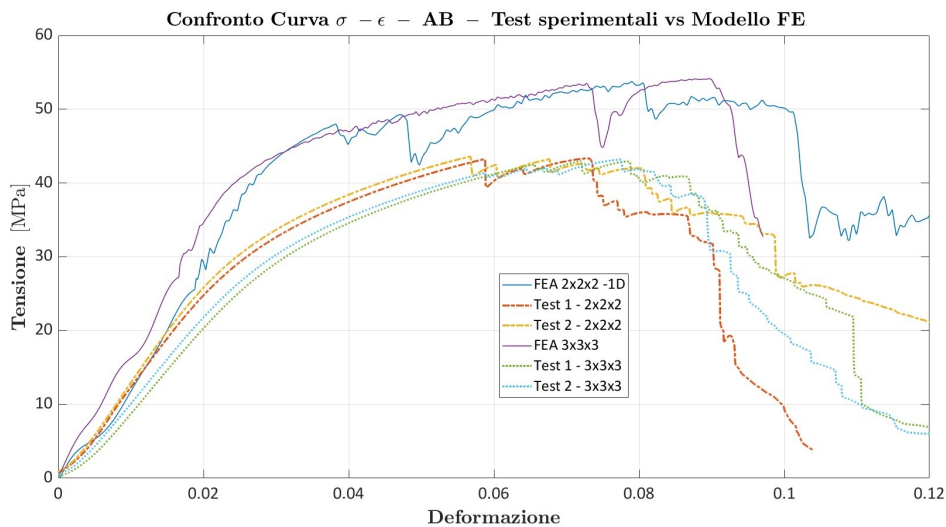


Figura 5.10: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D As-Built

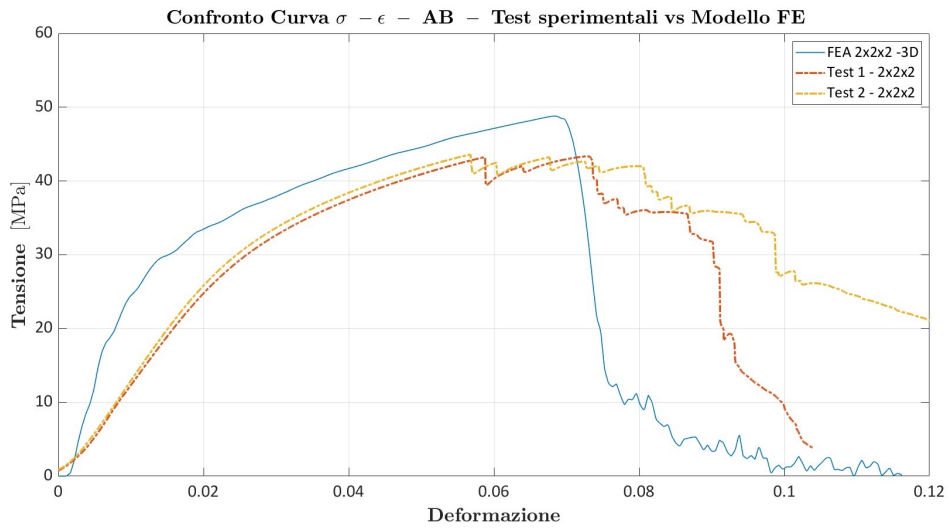


Figura 5.11: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 3D As-Built

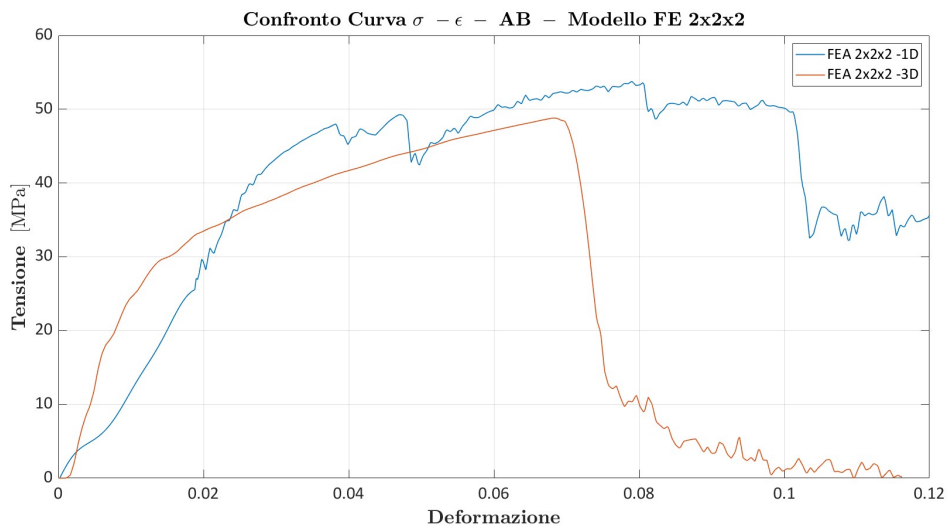


Figura 5.12: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D vs 3D As-Built

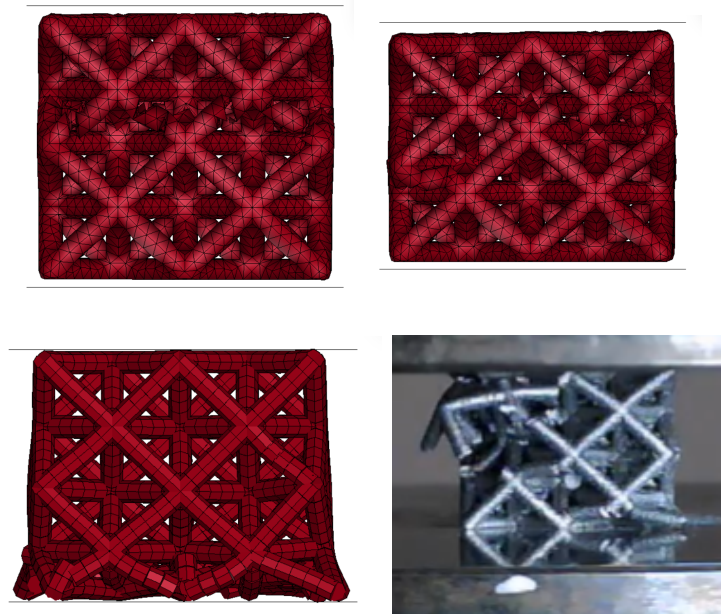


Figura 5.13: Sequenza di rottura FEA 3D (in alto) vs 1D (in basso) As-Built cella  $2 \times 2 \times 2$

### Risultati FEA compressione quasi-statica HT200

I modelli FE HT200 presentano risultati analoghi ai modelli per As-Built: si verifica la sovrastima delle tensioni massime raggiunte per entrambi i modelli. I modelli 1D, sia per la struttura  $2 \times 2 \times 2$  sia  $3 \times 3 \times 3$  (*Figura 5.14*), evidenziano la stessa deformazione complessiva sotto compressione quasi statica delle corrispettive prove sperimentali. Nel modello 3D (*Figura 5.14*) la tensione subisce un decremento considerevole in pochi istanti, proprio come già riscontrato con As-Built. Nelle prove sperimentali si assiste ad una decrescita graduale della tensione, giungendo a valori di deformazione maggiori. la tensione massima raggiunta nel modello 3D (circa 45 kN) si pone ad un valore intermedio tra la tensione massima nei test sperimentali (circa 40 kN) e quella ottenuta nei modelli 1D (circa 48 kN). Dal confronto tra risultati 1D e 3D (*Figura 5.16*), si osserva che nel caso del provino HT200 le due curve presentano un andamento più simile tra loro di quello riscontrato nei corrispettivi modelli As-Built. Anche per i modelli 3D HT200 la modalità di cedimento rispecchia ciò che avviene nella realtà, con fratture in diagonale (*Figura 5.17*), in maniera simile se non identica all'As-Built (*Figura 5.13*). Il modello 1D a fine simulazione mostra fratture solo nelle celle inferiori, non giungendo a rottura completa.



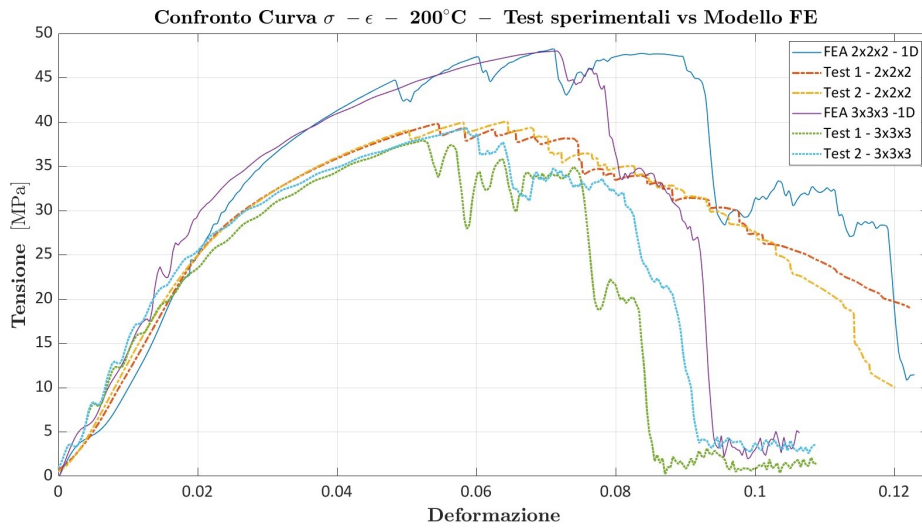


Figura 5.14: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D HT200

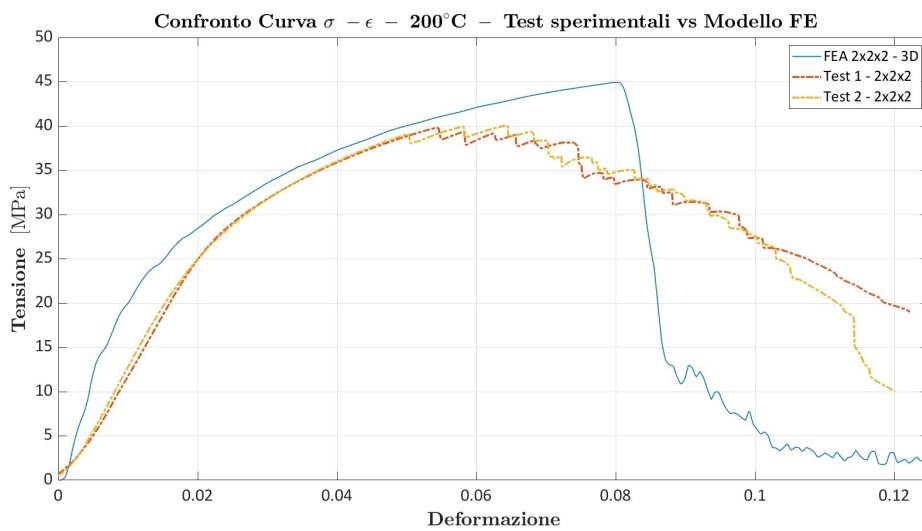


Figura 5.15: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 3D HT200

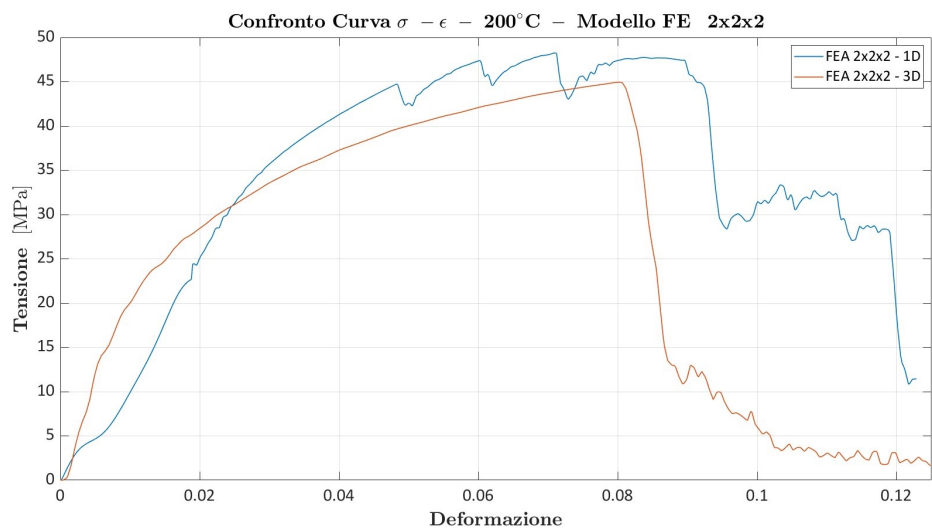


Figura 5.16: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D vs 3D HT200

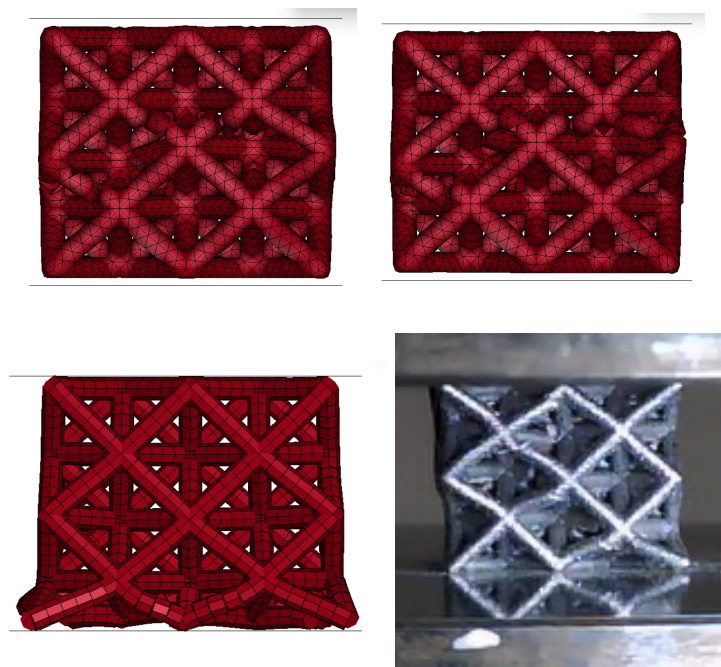


Figura 5.17: Sequenza di rottura FEA 3D (in alto) vs 1D (in basso) HT200 cella 2x2x2

## Risultati FEA compressione quasi-statica HT300

Per la lega AlSi10Mg trattata a 300°C si è visto che durante le prove sperimentali il provino mostra una deformazione plastica molto prolungata dei diversi layer successivi. Ciò si traduce in una curva forza-spostamento, quindi tensione-deformazione, caratterizzata da diversi picchi, a cui corrisponde il cedimento di un layer. Tutti i modelli FE (modelli 1D riportati in *Figura 5.18* e modelli 3D in (*Figura 5.19*), presentano il primo tratto delle curve simile a quello sperimentale, anche se sono seguiti da un incremento delle tensioni oltre quelli stabiliti nei test. In particolare, i modelli 1D presentano tensioni i cui valori si discostano di circa il 10% rispetto alle tensioni dei test sperimentali; inoltre i picchi successivi risultano anticipati rispetto ai test. Per il modello 3D il discorso è più complicato. La tensione sale fino ad un valore di 41 MPa contro i 31 MPa sperimentali per poi subire un decremento piuttosto accentuato. Mentre nelle prove sperimentali le curve presentano picchi successivi su valori confrontabili con quello massimo, nel caso del modello 3D il secondo picco raggiunge con difficoltà la metà del valore massimo della stessa curva. Di conseguenza, questo modello risulta poco adatto per un'analisi preliminare finalizzata alla progettazione. Tuttavia, un aspetto positivo è che la modalità di cedimento risulta simile a quella reale, mostrandone le deformazioni plastiche in *Figura 5.21*. A differenza dei risultati ottenuti per As-Built e HT200, per HT300 anche il modello 1D rappresenta molto bene la deformazione plastica subita dalla struttura, seguita da un impacchettamento delle celle.

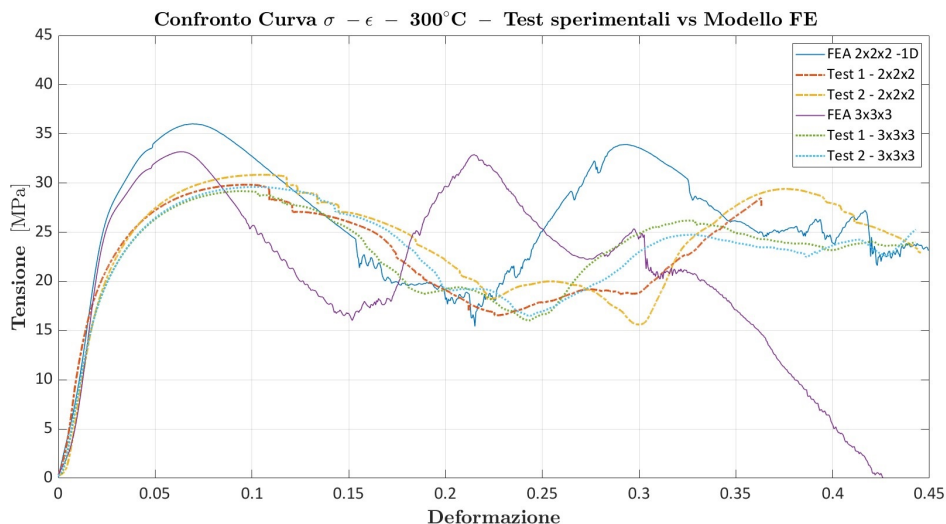


Figura 5.18: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D HT300

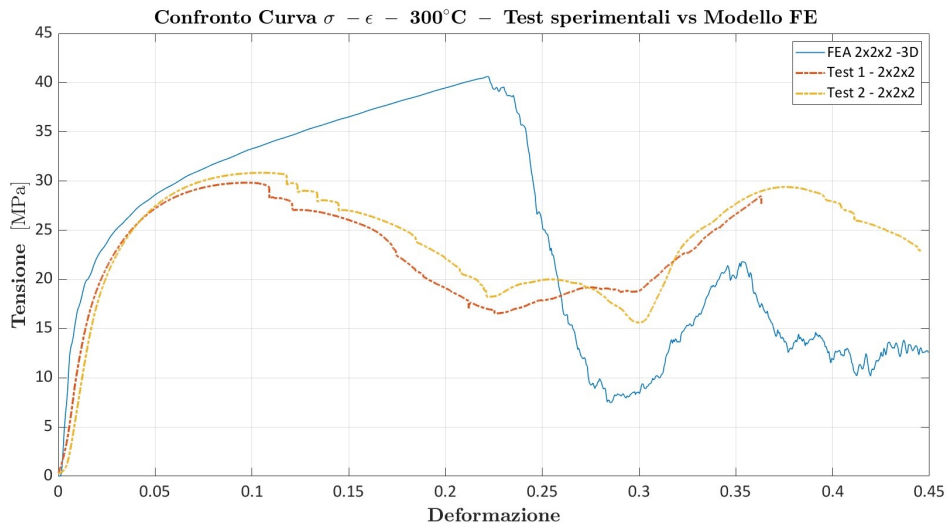


Figura 5.19: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 3D HT300

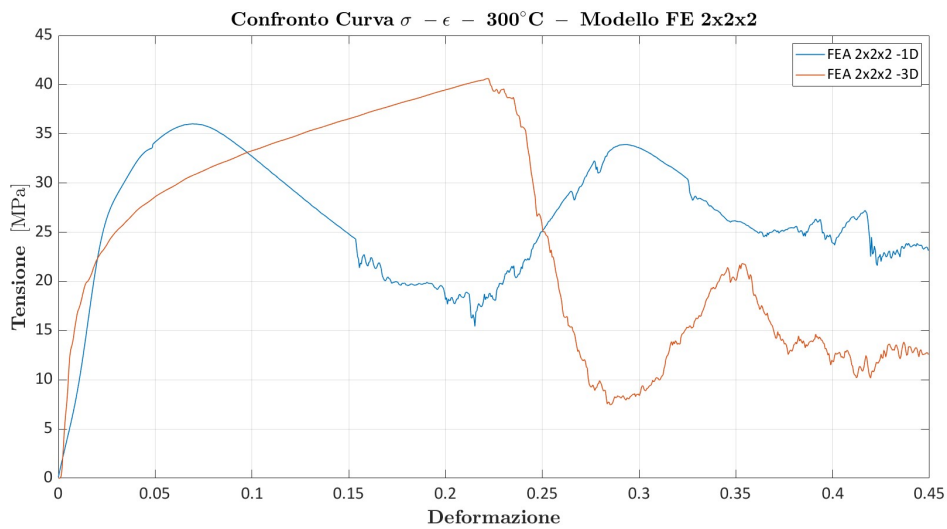


Figura 5.20: Risultati compressione quasi-statica Modello FE 1D vs 3D HT300

### Conclusioni sui modelli FE senza difetti

Dopo aver analizzato i diversi risultati ottenuti, è possibile fare un confronto generale tra i modelli utilizzati. Le diverse analisi agli elementi finiti hanno evidenziato che sia il modello 1D che quello 3D sovrastimano le tensioni massime rispetto ai risultati sperimentali, con il modello 1D che presenta valori di tensione ancora

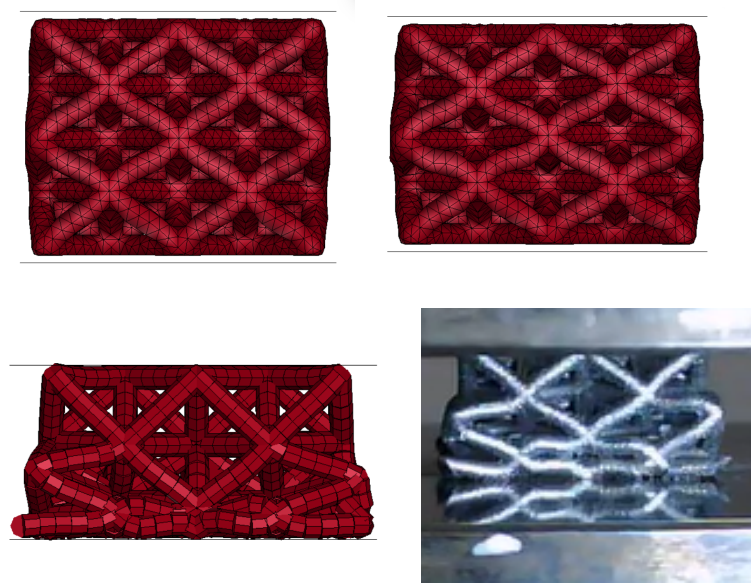


Figura 5.21: Sequenza di rottura FEA 3D (in alto) vs 1D (in basso) HT300 cella 2x2x2

maggiori rispetto al 3D. Tuttavia, il modello 1D si è dimostrato più accurato nell'approssimare le deformazioni osservate sperimentalmente e, al tempo stesso, ha garantito un notevole risparmio in termini di tempo di calcolo (per As-Built e Ht200 5 minuti contro i 30 minuti richiesti dal modello 3D, per HT300 sono richiesti 10 minuti contro i 45 minuti per il modello 3D, con risorse disponibili per LS-Dyna di 4 CPU e MEMORY 20 m). Questo suggerisce che, per applicazioni in cui la stima accurata delle deformazioni e l'efficienza computazionale sono prioritarie, il modello 1D può rappresentare una scelta più vantaggiosa. Tuttavia, potrebbero essere utili ulteriori analisi per migliorare la valutazione delle tensioni e quindi la correlazione con i dati sperimentali.

### 5.3 Modello FE con difetti

Come già detto, la produzione in L-PBF della struttura lattice comporta numerose difettosità con dimensioni variabili. L'obiettivo di questo paragrafo è poter validare un modello FE che tenga conto della difettosità della struttura e che fornisca dei risultati confrontabili con quanto ottenuto nei test sperimentali. Nel *Paragrafo 3.2* sono state presentate le analisi effettuate sulla singola beam in cui si tiene conto della difettosità interna. Dalle analisi delle singole beam sono state determinate le curve forza-spostamento, e da queste le curve tensione-deformazione, per ciascuno dei tre materiali analizzati (As-Built, HT200 e HT300). In questo modo è stato

possibile studiare il comportamento locale relativo ad una piccola parte che compone la struttura lattice e ottenere un database di curve omogeneizzate per ogni materiale, che possono essere utilizzate nel modello macroscale. Anche in questo caso si è fatto riferimento ad un modello con geometria  $3 \times 3 \times 3$  in cui la struttura lattice è discretizzata con una mesh di elementi beam 1D. La difettosità globale della struttura lattice viene valutata localmente analizzando le singole beam. La

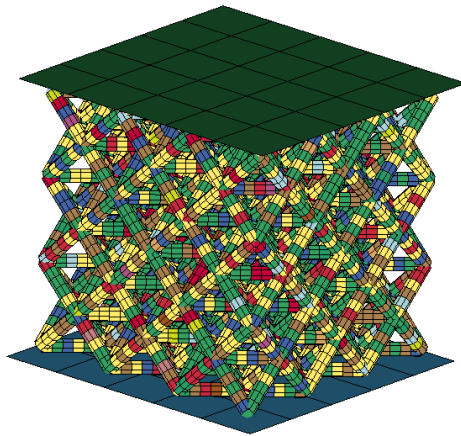


Figura 5.22: Modello FE 1D con difetti: struttura lattice  $3 \times 3 \times 3$  e piani rigidi

struttura lattice, riportata in *Figura 5.22*, risulta quindi essere composta da un numero elevato di \*ELEMENT\_BEAM, a cui è necessario associare una delle curve ottenute dalle simulazioni descritte nel *Paragrafo 3.2*, al fine di simulare la presenza di un difetto di dimensioni variabili nell'elemento considerato. Le caratteristiche meccaniche saranno assegnate ad ogni elemento in maniera casuale. La probabilità che ogni caratteristica meccanica si ripresenti dipende dalle frequenze ottenute per ciascuna classe di difetto a partire dalle scansioni Micro-CT e riportate nei diagrammi di distribuzione al *Paragrafo 3.1*. Si ricorda che le simulazioni delle singole beam erano state effettuate solo per le classi di difetto che presentavano un diametro medio maggiore di  $130 \mu\text{m}$ , in quanto le simulazioni per diametri minori erano state ritenute trascurabili, poiché i risultati ottenuti risultavano molto simili alla curva della prima classe successiva esaminata. Per poter effettuare una corretta simulazione del modello FE con difetti si deve tener conto di tutte le classi di difetto presenti. Si è ritenuto quindi necessario aggiungere le curve mancanti, ciò è stato fatto copiando le curve della prima classe esaminata per il numero di classi mancanti. In questo modo si ottengono per i diversi materiali un database di 20 curve.

### 5.3.1 Definizione del modello FEM del provino in esame con difetti

Per definire il modello FEM della struttura lattice che tiene conto della presenza dei difetti si ricorre ad uno script MATLAB che genera diversi file .k di input in LS-Dyna, in cui sono definite le keyword utili a descrivere materiali, elementi e parti, e che completano il file .k principale per la simulazione. Di seguito sono descritti i diversi step utili per la definizione del modello FE finale. A differenza dei modelli precedentemente descritti in cui si aveva una sola curva tensione-deformazione del materiale applicato alla struttura lattice, in questo modello ad ogni elemento beam potrà essere assegnata una delle 20 curve presente nel database per quel determinato materiale (il database è rappresentato da una tabella in formato .mat in cui sono raccolte le curve come coppia di colonne strain-stress). Inoltre, mentre nel caso precedente il numero e le caratteristiche dell'elemento erano definite in automatico in LS-Dyna a partire dalla geometria iniziale importata della struttura lattice, in questo modello, invece, il file che contiene le informazioni sugli elementi viene aggiornato ogni qual volta si avvia lo script MATLAB, di seguito descritto.

A partire dai dati delle scansioni micro-CT per ognuno dei tre materiali ( *Paragrafo 3.1* ), si definiscono tre vettori:

- *frequency*: contiene tutti i valori di probabilità per ciascuna delle 20 classi di difetti;
- *diameter\_defects*: contiene il diametro medio per ciascuna delle 20 classi di difetti;
- *counts*: contiene il numero di difetti per ciascuna delle 20 classi di difetti.

Si procede generando un vettore *pid* che, attraverso la funzione `randsample`, rappresenta l'assegnazione delle classi di difetto agli elementi 1D del modello di cella lattice.

```
pid = randsample(2:(n_classi+1), totale_elementi, true, frequency);
```

In particolare, ogni elemento 1D della struttura (per la struttura lattice analizzata 3x3x3 il numero degli elementi risulta pari a 6479) riceve un valore corrispondente a una classe di difetto. I valori di *pid* vengono selezionati casualmente tra le possibili classi di difetto, seguendo le probabilità specificate nel vettore *frequency* come mostrato nella seguente riga di codice:

Si procede quindi con l'assegnazione di un unico ID a ciascuna curva del database:

```
pid_unique = unique(pid);
```

```

pid_def = zeros(1,totale_elementi);
for i=1:length(pid_unique)
    orientation = randsample(1:n_angles,length(pid(pid==
    pid_unique(i))),true);
    pid_def(1,pid==pid_unique(i)) = orientation - 2 + (pid_unique(i)
    - 1)*n_angles + 2;
end

```

Questo script rappresenta la base da cui partire per l'assegnazione casuale di un ID ad una curva. In questo lavoro di tesi si è studiato la sola influenza della dimensione del difetto (considerando ad esempio  $n\_angles = 1$  corrispondente ad una sola geometria del difetto), ma è possibile implementare altre curve che riportano diversi altri fattori che influiscono il comportamento della struttura lattice, giungendo all'assegnazione dell'ID sulla base del campionamento casuale dei diversi parametri specificati. Tornando al caso in esame, attraverso il ciclo for si arriva alla definizione di un vettore *pid\_def*, ovvero il vettore che associa un valore pid ad un indice calcolato sulla base della frequenza.

Viene quindi generato il file "*element\_beam.k*", in cui ad ogni elemento identificato (eid) del modello viene associato un valore del vettore pid\_def, oltre agli indici n1 e n2 che definiscono i nodi che limitano l'element\_beam alle estremità. In *Figura 5.23* è riportato un estratto del file in oggetto, dove si può osservare che lo stesso valore del pid si ripete per diversi elementi.

*KEYWORD										
*ELEMENT_BEAM										
\$#	eid	pid	n1	n2	n3	rt1	rr1	rt2	rr2	local
	163	14	352	353	0	0	0	0	0	2
	164	9	353	355	0	0	0	0	0	2
	165	14	355	357	0	0	0	0	0	2
	166	8	357	359	0	0	0	0	0	2
	167	9	359	361	0	0	0	0	0	2
	168	13	361	194	0	0	0	0	0	2
	223	12	482	483	0	0	0	0	0	2
	224	10	483	485	0	0	0	0	0	2
	225	10	485	487	0	0	0	0	0	2
	226	9	487	489	0	0	0	0	0	2
	227	11	489	491	0	0	0	0	0	2

Figura 5.23: Estratto del file *element\_beam.k*

Si prosegue con la creazione del file "*material.k*", che contiene tutte le informazioni del materiale. In particolare, ci saranno diverse schede (indicata da un numero progressivo del *mid*) che presentano stesse proprietà di densità, modulo elastico e coefficiente di Poisson ma differiscono per la \*DEFINE\_CURVE associata (ovvero le diverse curve tensione-deformazione del database) e quindi per il parametro



del Fail. Alla fine del processo, il codice MATLAB genera un file "*part.k*" in cui si associa la material card con la singola parte corrispondente (Figura 5.24). Le schede incrementano man mano il valore di pid e mid fino a raggiungere l'ultima combinazione.

```
*KEYWORD
*PART
$HWCOLOR COMPS      1      3
$#                                     title
MESH_Unit_Cell_04_3x3
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
      4     1     4     0       0       0       0       0
```

Figura 5.24: Estratto del file *part.k*

Si ottengono quindi tre file .k da includere nel file principale .k del modello FE, quest'ultimo sarà aperto come file di input in LS-Dyna e sarà simulato agli elementi finiti, come è avvenuto per i modelli descritti in precedenza. Nel file principale infatti sono stati definiti i set di nodi, le superfici rigide e le curve di spostamento che permettono la simulazione di compressione quasi-statica, oltre a contenere altre informazioni sui tempi di simulazione e sui diversi file Ascii da generare in output per poter valutare la validità del modello presentato. Per le simulazioni con materiale As-Built e HT200, il control termination dell'analisi è imposto pari a  $t = 0,003$  s, mentre per il materiale HT300 si ha  $t = 0,008$  s. Si procede quindi con l'analisi agli elementi finiti per i tre diversi materiali. Per mostrare la validità dello script di MATLAB, quest'ultimo è stato lanciato 5 volte per ogni set di curve del materiale. Sono di seguito riportati le curve ottenute:

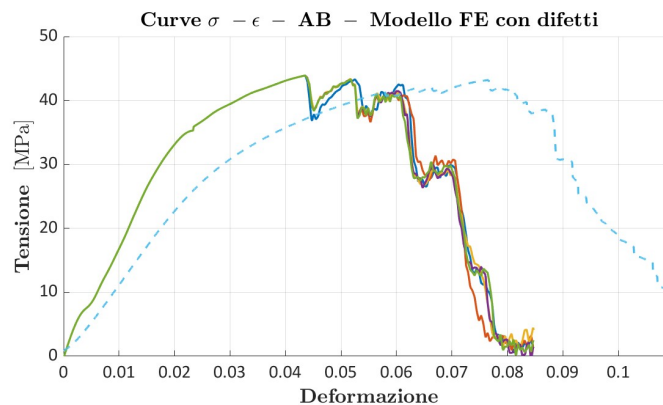


Figura 5.25: Risultati compressione quasi-statica FEA con difetto As-Built

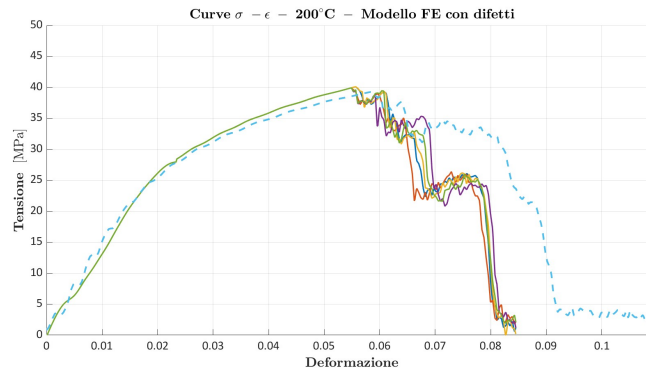


Figura 5.26: Risultati compressione quasi-statica FEA con difetto HT200

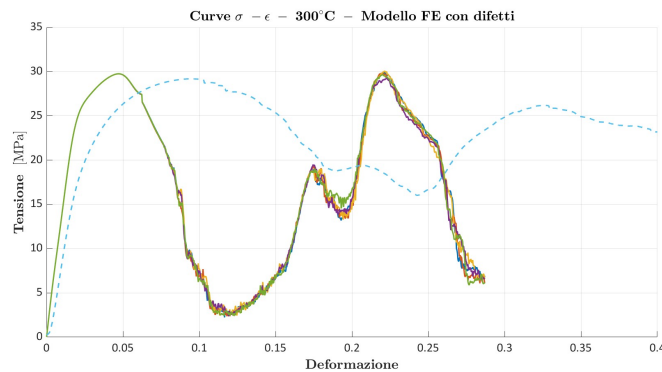


Figura 5.27: Risultati compressione quasi-statica FEA con difetto HT300

I risultati mostrati dei modelli FE con difetti, in *Figure 5.25, 5.26 e 5.27* suggeriscono che questi possono essere ritenuti validi per la determinazione della tensione massima raggiunta durante i test, effettuando le opportune valutazioni. Per i diversi materiali analizzati la tensione massima ottenuta nei test sperimentali risulta inferiore a quella presente nelle curve numeriche, anche se l'errore percentuale è ridotto rispetto a quello mostrato nei modelli FE in cui sono stati trascurati i difetti. Per i modelli As-Built e HT300, i picchi di tensione nelle curve numeriche risultano piuttosto anticipati rispetto ai risultati sperimentali, con il raggiungimento di deformazione a rottura per valori più bassi.

Si sottolinea che in questo modello è stato considerato come parametro soltanto la dimensione del difetto; è possibile implementare il modello tenendo conto delle diverse difettosità in base alla forma, alla posizione e all'orientamento del difetto. Tutto questo permetterà di avvicinare le curve numeriche a quelle sperimentali.

# Capitolo 6

## Prove d'impatto

Le prove sperimentali d'impatto sono state eseguite con il macchinario INSTRON CEAST 9350, riportato in *Figura 6.1*.

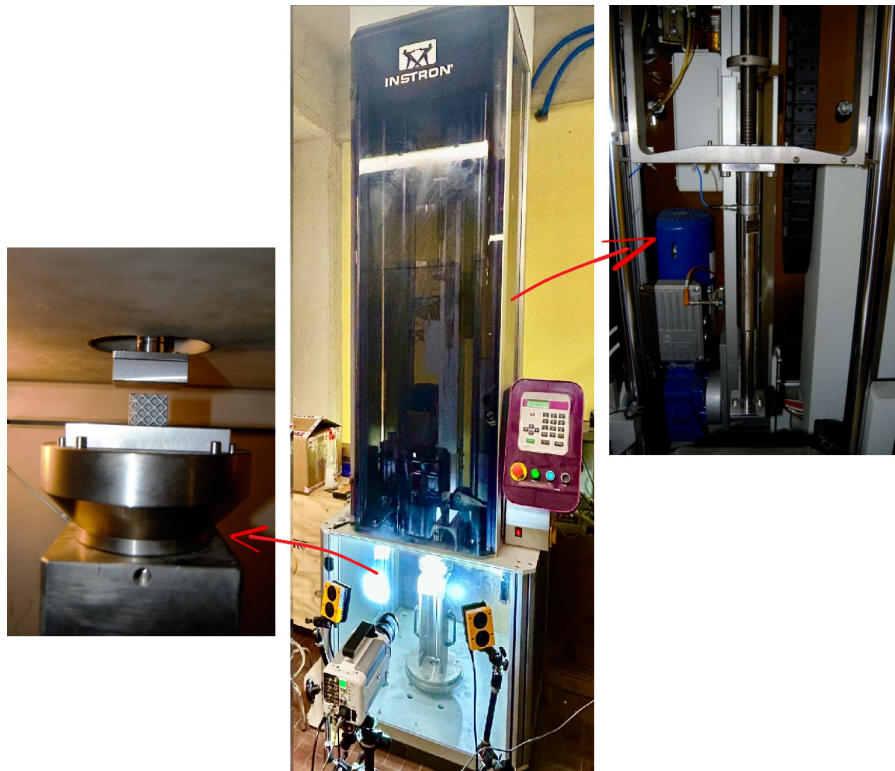


Figura 6.1: Macchina INSTRON CEAST 9350 per test d'impatto

I test d'impatto hanno come obiettivo quello di studiare il comportamento in campo dinamico della struttura lattice, eseguendo prove a diverse velocità, e quello di valutare il fenomeno dello strain-rate. L'impiego di una telecamera ad alta velocità ha permesso di registrare le prove, consentendo così una valutazione delle

modalità di cedimento dei provini alle diverse temperature di trattamento considerate.

Il macchinario è composto da una camera chiusa in cui viene posizionato il provino, mentre al di sopra si trova l'intero sistema che consente la caduta controllata di un impattatore sul campione. L'impattatore è montato su un meccanismo che scorre lungo due guide lineari, permettendo l'aggiunta di masse in modo da adattare il test alle esigenze specifiche. Sopra l'impattatore è installata una cella di carico piezoelettrica, che registra l'andamento della forza durante l'impatto. I test vengono eseguiti impostando la massa totale che colpirà il provino e la velocità di impatto. A partire da questi due parametri è possibile stimare l'energia d'impatto:

$$Energia = \frac{1}{2}mv^2$$

Come detto, la cella di carico ha fornito i dati sull'andamento della forza nel tempo. A partire da questi dati è stato possibile determinare lo spostamento. Innanzitutto è stato ricavato il valore dell'accelerazione attraverso l'equazione:

$$a = g - \frac{F}{M}$$

con  $a$  accelerazione dell'impattatore,  $g$  accelerazione di gravità,  $F$  forza misurata dalla cella di carico e  $M$  massa impattante totale. Da qui è stato calcolato lo spostamento integrando due volte l'accelerazione nel tempo, calcolando dapprima la velocità d'impatto  $v$ , facendo riferimento alla velocità  $v_0$  rilevata nell'istante precedente all'impatto, e successivamente è stato calcolato lo spostamento  $s$ :

$$v = v_0 + \int a dt$$

$$s = \int v dt$$

## 6.1 Test Sperimentali

Sono stati effettuati complessivamente 12 test di impatto su provini in struttura lattice 3x3x3, suddivisi equamente in due gruppi da 6 test ciascuno, rispettivamente condotti a una velocità di 4 m/s e 8 m/s. I test sono stati eseguiti sui tre diversi materiali (As-Built, HT200, HT300), con ciascun materiale sottoposto a 2 prove a 4 m/s e 2 prove a 8 m/s.

Si riportano in *Tabella 6.1* i valori impostati per l'esecuzione dei test sperimentali; sono inoltre riportati la velocità d'impatto effettiva (rilevata) e l'energia assorbita. Volendo valutare il comportamento del materiale alle diverse velocità, per ogni materiale analizzato, la velocità del corpo in caduta della seconda coppia di test è stata ridotta rispetto ai primi due test, mentre la massa del sistema è stata aumentata. Questa scelta è stata effettuata per mantenere pressoché costante

l'energia totale dell'impatto in tutte le prove per uno stesso trattamento termico. Dall'analisi dei dati, sono stati ricavati diversi grafici: andamento della forza in funzione del tempo, accelerazione in funzione del tempo, velocità in funzione del tempo, spostamento in funzione del tempo, forza in funzione dello spostamento e energia assorbita in funzione dello spostamento.

Test	Massa totale [kg]	v impostata [m/s]	v rilevata [m/s]	Energia assorbita [J]
AB_1	30,9815	4	4,0995	94,58
AB_2	30,9815	4	4,0995	97,75
200_1	30,9815	4	4,0999	99,29
200_2	30,9815	4	4,0979	79,54
300_1	30,9815	4	4,0999	264,67
300_2	30,9815	4	4,1004	264,28
AB_3	7,9815	8	8,1025	89,9
AB_4	7,9815	8	-	-
200_4	7,9815	8	8,0926	76,29
200_5	7,9815	8	8,1185	84,3
300_4	7,9815	8	8,1182	261,36
300_5	7,9815	8	8,1501	262,44

Tabella 6.1: Dati prova sperimentale d'impatto

Per ogni materiale si riportano tutti i grafici prodotti per il primo test di ogni valore di velocità e un confronto dei grafici Forza-spostamento e Energia-spostamento per i due test effettuati alla stessa velocità, al fine di valutarne la ripetibilità. Si sottolinea che i dati rappresentati nei grafici di seguito proposti fanno riferimento alla sola rottura del provino e non al successivo fenomeno di densificazione; questi ultimi sono stati di fatto rimossi in post-process perché non oggetto di studio in questa sede.

### 6.1.1 Test d'impatto per As-Built

Si riportano i risultati dei test sperimentali effettuati sulla lega di alluminio As-Built per entrambe le velocità di prova (*Figura 6.2 e 6.5*). Per i test a velocità di 8 m/s, sono stati persi i dati in riferimento al secondo test effettuato. Per quanto riguarda le energie assorbite, per i tre test si ottengono valori confrontabili inseriti in un intervallo tra i 90 e 98 J, con andamenti simili per i tre test effettuati. Per le prove condotte a 4 m/s si può notare la ripetibilità dei test sia in termini di forza sia in termini di energia in funzione dello spostamento (*Figura 6.3*). In entrambi i test a velocità 4 m/s la forza massima che si ottiene è intorno a 43 kN, a cui segue un secondo picco, che corrisponde alla rottura dei layer successivi della struttura

lattice. Le immagini del test AB\_1 mostrano una prima frattura a 45° delle celle in basso, seguita da una completa rottura della struttura lattice (*Figura 6.4*).

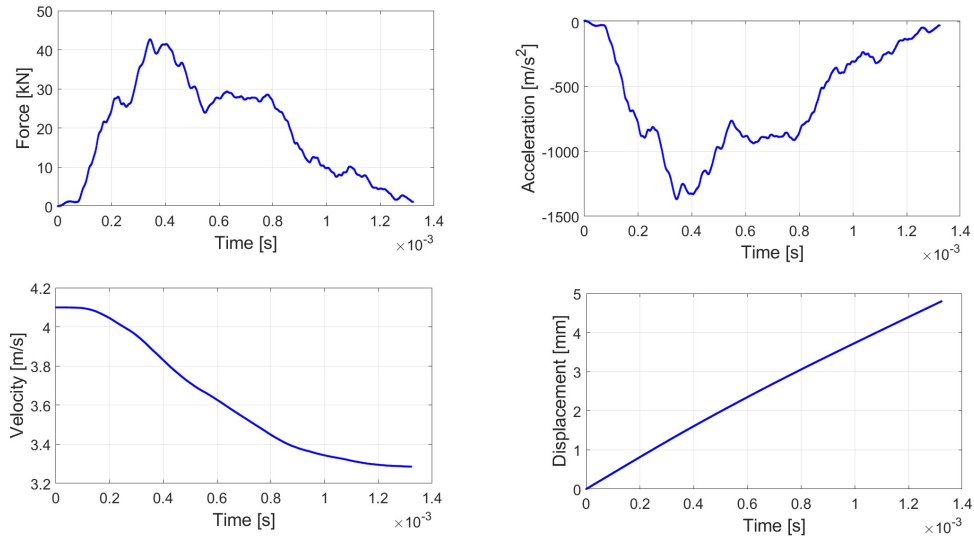


Figura 6.2: Test d'impatto AB\_1

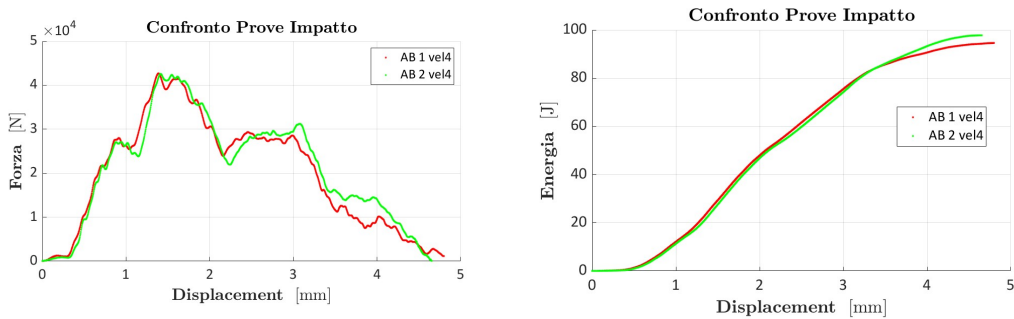


Figura 6.3: Confronto prova d'impatto As-Built a velocità 4 m/s

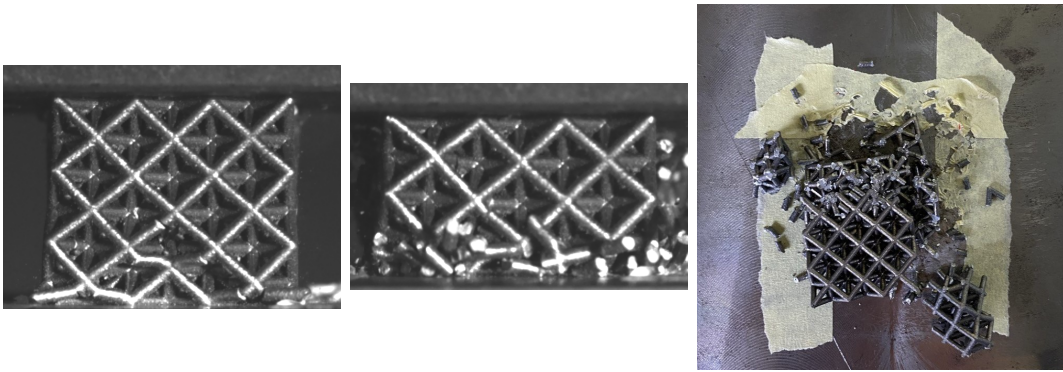


Figura 6.4: Sequenza immagini impatto As-Built a velocità 4 m/s

Anche per il test condotto a velocità di 8m/s la forza massima raggiunta è di circa 43 kN (*Figura 6.6*). Si nota inoltre che l'andamento nel tempo della forza è simile a quello mostrato in precedenza con il massimo seguito da un secondo picco, a cui segue una diminuzione netta della forza, dovuto al cedimento completo della struttura. Le immagini del test AB\_3 mostrano che la rottura avviene sulla diagonale a 45° in diversi punti della struttura, seguita da una rottura completa del provino in diverse sotto-strutture come visibile dall'alto (*Figura 6.7*).

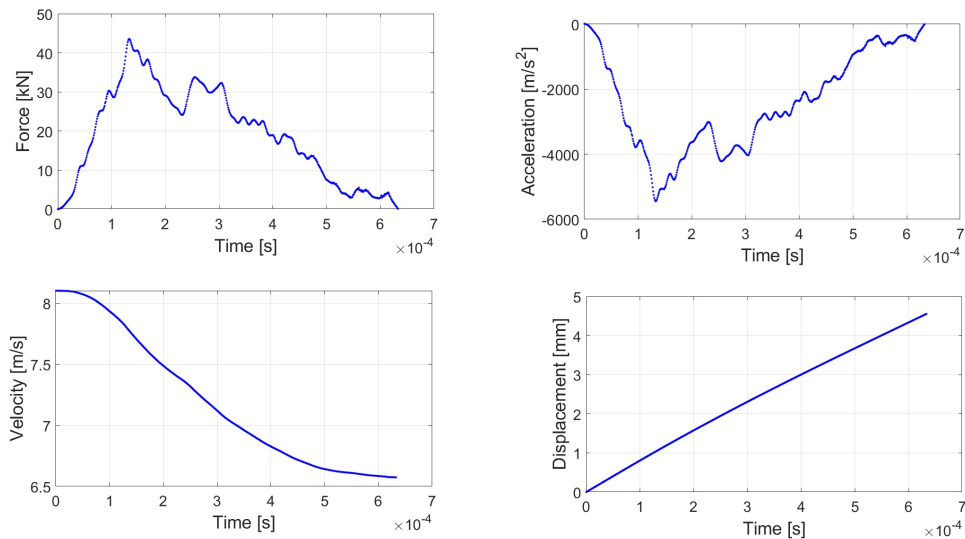


Figura 6.5: Test d'impatto AB\_3

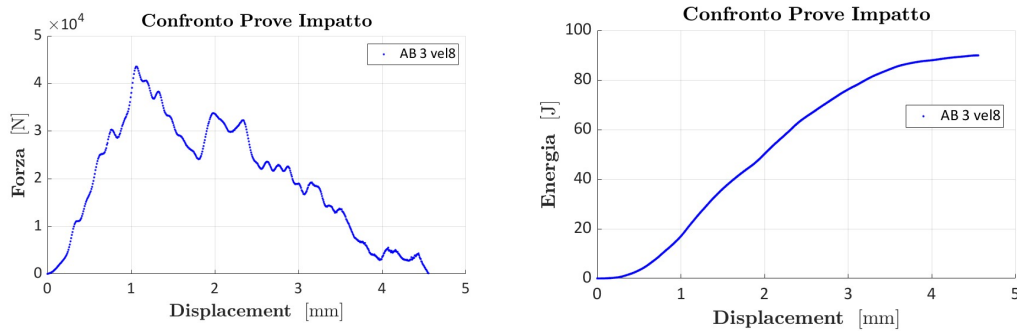


Figura 6.6: Prova d'impatto As-Built a velocità 8 m/s

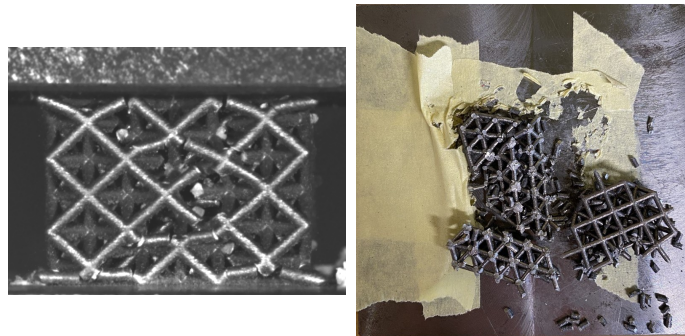


Figura 6.7: Immagini impatto As-Built a velocità 8 m/s

### 6.1.2 Test d'impatto per HT200°C

Si riportano i risultati dei test sperimentali effettuati sulla lega di alluminio con trattamento termico a 200°C per entrambe le velocità di prova (*Figure 6.8 e 6.13*). Confrontando i risultati dei due test condotti a 4 m/s, si può notare un andamento diverso tra i due per quanto riguarda la forza in funzione dello spostamento (*Figura 6.9 sx*): il test HT200\_1 presenta una forza massima di circa 35 kN non coincidente con il primo picco della curva, come avvenuto invece nel caso dei test As-Built e come avviene nel test HT200\_2. Nel secondo test si raggiunge infatti una forza massima di 39,5 kN sull'unico picco presente della curva forza-spostamento. Una differenza tra i due provini è anche visibile nel grafico dell'energia in funzione dello spostamento (*Figura 6.9 dx*): l'energia di fine test nel provino HT200\_1 risulta essere di 99,29 J mentre nel caso HT200\_2 risulta di 79,54 J, con una differenza tra le due prove piuttosto elevata e pari a circa 20 J.

Per giustificare questa differenza di energia assorbita, oltre a confrontare le curve forza-spostamento, è possibile procedere con una valutazione della modalità di rottura del provino. In *Figura 6.10 e 6.11* sono riportate rispettivamente le immagini della prova d'impatto per i test HT200\_1 e HT200\_2. In *Figura 6.12* sono presenti degli schemi grafici che permettono di confrontare le modalità di cedimento



che hanno caratterizzato le due prove. In entrambi i test, le fratture avvengono in diagonale a 45° con conseguente rottura completa della struttura lattice. Dallo schema si può notare come la rottura nel test HT200\_2 interessa un numero maggiore di beam. Il provino HT200\_2 quindi si rompe più rapidamente, assorbendo meno energia.

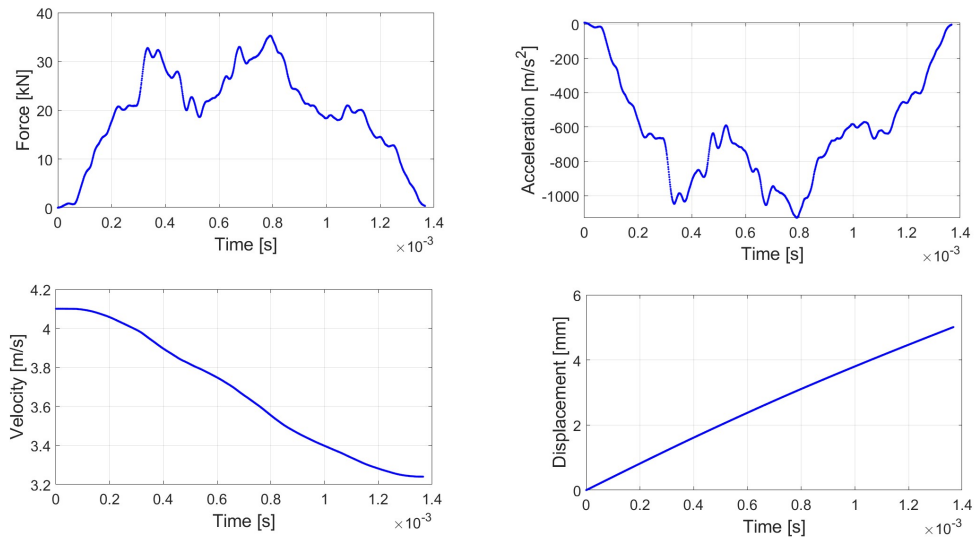


Figura 6.8: Test d'impatto HT200\_1

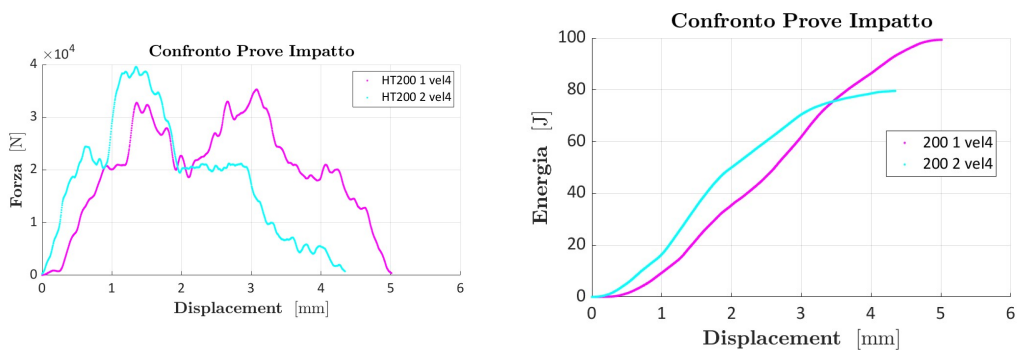


Figura 6.9: Confronto prova d'impatto HT200 a velocità 4 m/s

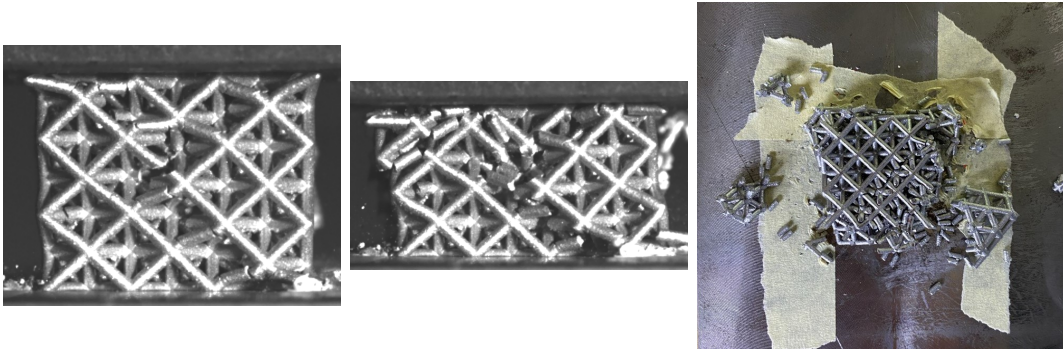


Figura 6.10: Sequenza immagini impatto HT200\_1 a velocità 4 m/s

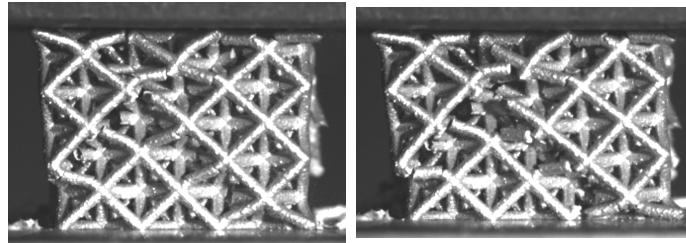


Figura 6.11: Sequenza immagini impatto HT200\_2 a velocità 4 m/s

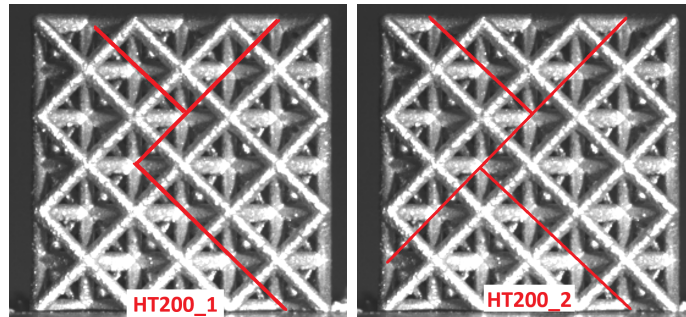


Figura 6.12: Confronto schema impatto HT200\_1 (sx) e HT200\_2 (dx) a velocità 4 m/s

Per le prove condotte a 8 m/s, i grafici dei due test risultano avere andamenti simili sia in termini di forza sia in termini di energia in funzione dello spostamento, mostrando una certa ripetibilità nell'esecuzione. Nel test HT200\_4 la forza massima raggiunta è pari a 38 kN mentre per HT200\_5 si ha 43 kN, entrambi in corrispondenza del primo picco della curva (*Figura 6.14*). Le immagini del test 200\_5 mostrano che la rottura avviene a 45° in diversi punti della struttura, seguita da una rottura completa del provino in diverse sotto-strutture come visibile dall'alto (*Figura 6.15*), con cedimento a rottura simile all'As-Built.

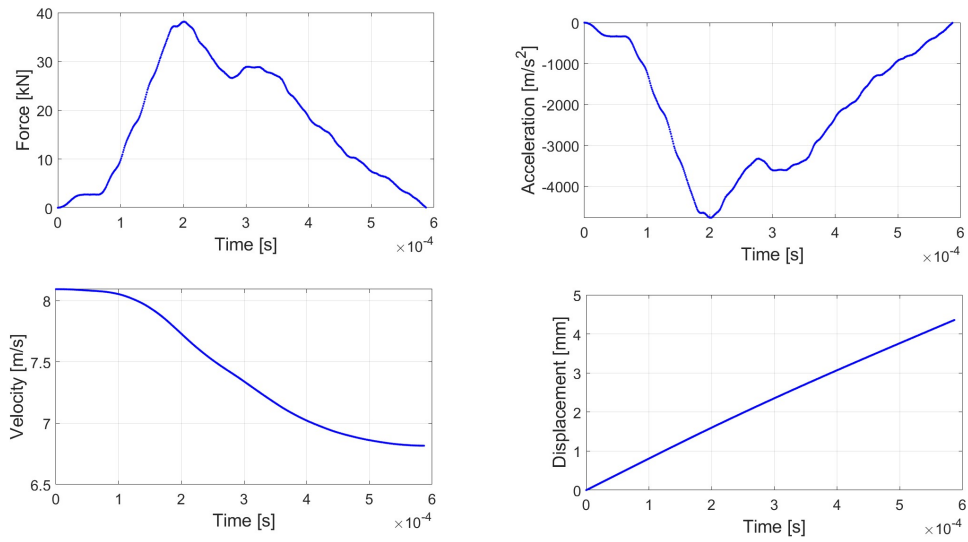


Figura 6.13: Test d'impatto HT200\_4

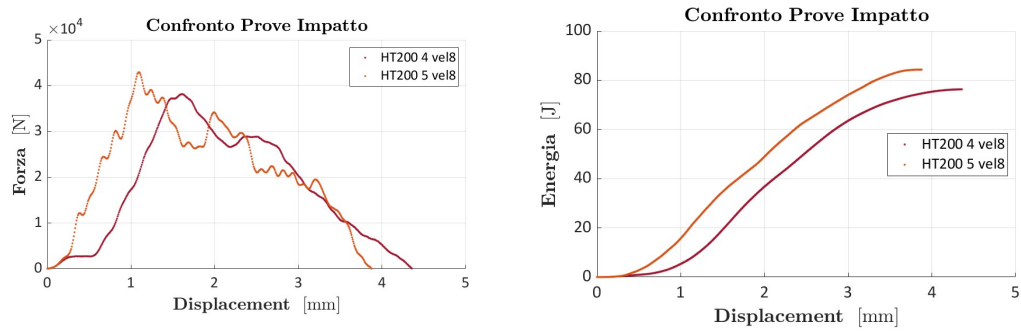


Figura 6.14: Confronto prova d'impatto HT200 a velocità 8 m/s

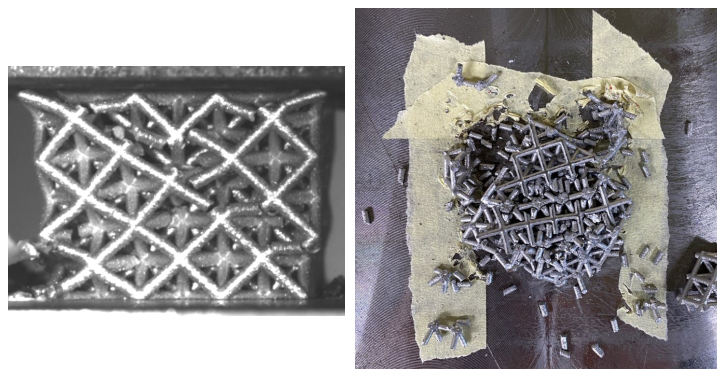


Figura 6.15: Immagini impatto HT200 a velocità 8 m/s

### 6.1.3 Test d'impatto per HT300°C

I test effettuati su As Built e HT200 presentano curve forza-spostamento molto simili tra i due materiali, a meno di opportune valutazioni sulle forze massime raggiunte, come si era già riscontrato per le prove di compressione quasi statica. Per i test effettuati sulla lega trattata a 300°C la situazione è leggermente diversa. In generale, nei test d'impatto le forze massime raggiunte nelle prove HT300 presentano valori più bassi, mentre l'energia assorbita dal provino a fine prova risulta oltre che raddoppiata. Ciò che è evidente in entrambe le coppie di test è l'elevata ripetibilità, con risultati che non solo mostrano una stretta correlazione, ma risultano addirittura sovrapponibili. Mentre nei risultati mostrati in precedenza, le forze presentavano un andamento graduale crescente prima del picco seguito da uno decrescente dopo esso, i grafici dei test HT300 mostrano un incremento istantaneo della forza all'inizio della prova, fino a raggiungere il valore massimo (intorno a 30 kN), una successiva oscillazione intorno ad un valore medio (circa 15-20 kN) con diversi massimi locali e infine un decremento quasi istantaneo della forza che determina la fine dell'impatto (*Figura 6.16*). In particolare, il test HT300\_2 condotto a 4 m/s mostra nella fase finale dell'impatto valori della forza molto vicini al valore massimo di 32 kN (*Figura 6.17*). Le immagini del test 300\_1 (*Figura 6.18*) mostrano che il provino si deforma plasticamente durante la prova d'impatto e che le deformazioni si stabiliscono in diagonale a 45°. Dall'immagine dall'alto si osserva che al termine della prova il campione rimane integro e la rottura avviene senza rilascio di detriti o frammenti, come invece visto nelle prove precedenti. La rottura del provino infatti porta ad un impacchettamento delle beam che costituiscono le celle. Lo stesso avviene anche nella prova a HT300\_4 (*Figura 6.19 e 6.20*), dove però la deformazione plastica inizia nella parte bassa del provino (*Figura 6.21*).

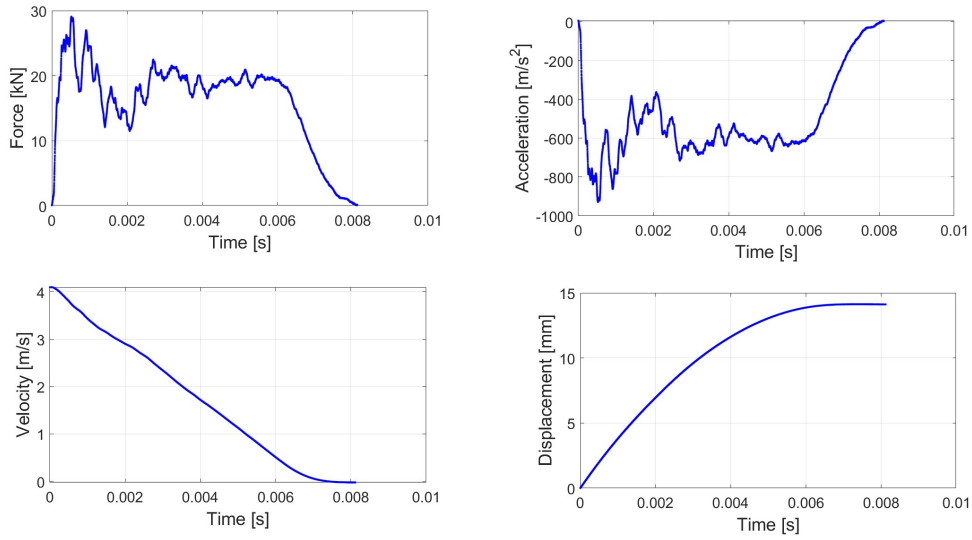


Figura 6.16: Test d'impatto HT300\_1

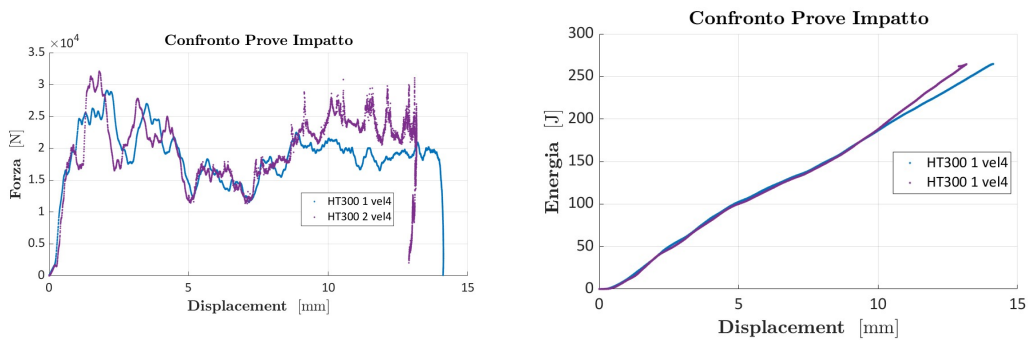


Figura 6.17: Confronto prova d'impatto HT300 a velocità 4 m/s

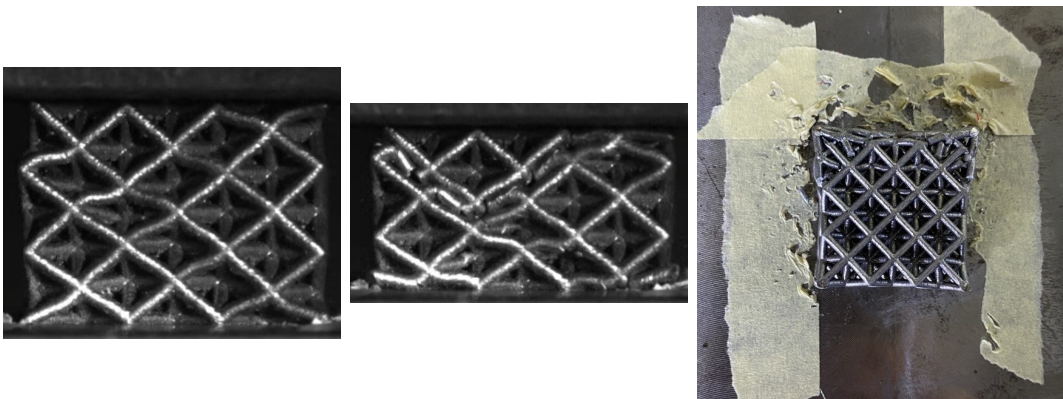


Figura 6.18: Sequenza immagini impatto HT300 a velocità 4 m/s

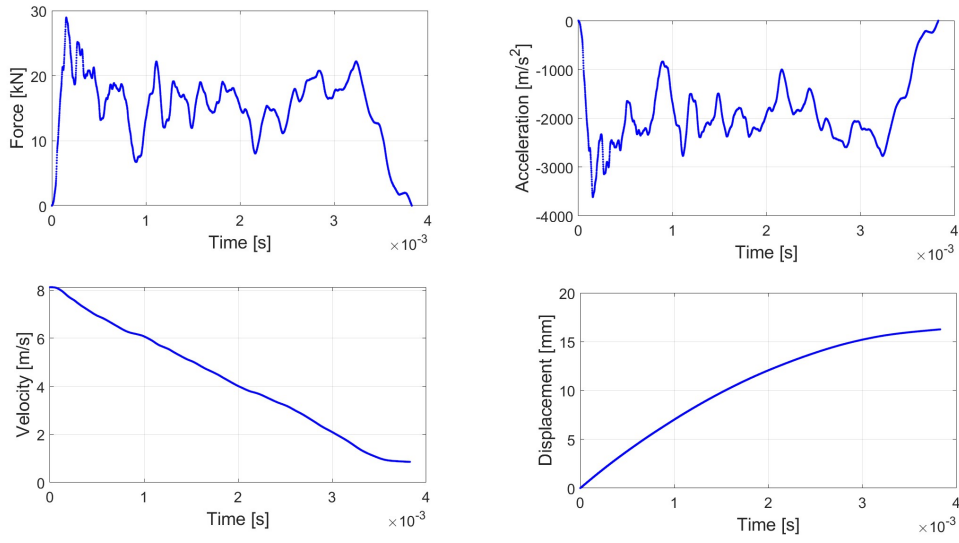


Figura 6.19: Test d'impatto HT300\_4

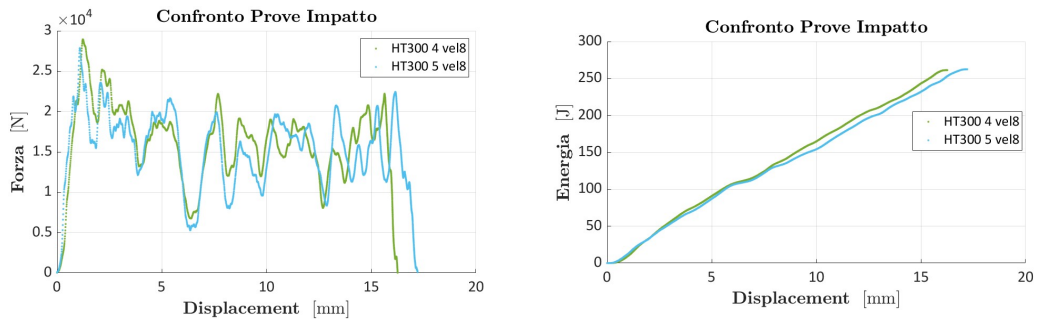


Figura 6.20: Confronto prova d'impatto HT300 a velocità 8 m/s

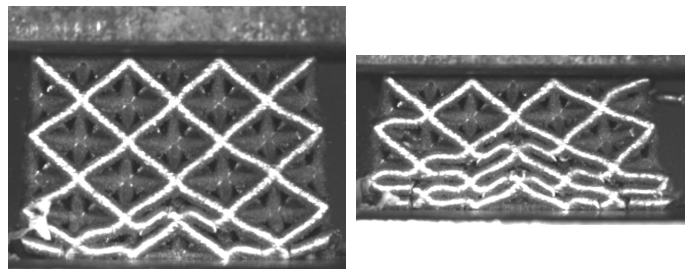


Figura 6.21: Sequenza immagini impatto HT300 a velocità 8 m/s

## 6.2 Effetto dello strain-rate

Dopo aver analizzato le diverse prove sperimentali eseguite, è confrontare per ogni trattamento termico analizzato alle diverse velocità di prova, comprese le prove di compressione quasi-statica eseguite a velocità di 1 mm/min.

In generale, per i diversi trattamenti termici, si osserva come all'aumentare della velocità della prova aumenta la forza massima applicata al provino. Inoltre, l'energia assorbita dal provino nelle prove d'impatto risulta superiore rispetto a quella assorbita nella compressione quasi-statica:

- **As-Built** (*Figura 6.22 e Tabella 6.2*): l'energia assorbita passa da un valore di circa 67 J nelle prove di compressione quasi-statica a valori compresi tra i 90 e 97 J per i test d'impatto con un incremento del 40%;
- **HT200** (*Figura 6.23 e Tabella 6.3*): l'energia assorbita varia da 47-54 J nella compressione quasi-statica a valori compresi tra i 76 e 99 J per la prova d'impatto. L'ampio intervallo nei test d'impatto è dovuto alla modalità di cedimento che influisce significativamente sull'energia assorbita, registrando un incremento medio del 70%;
- **HT300** (*Figura 6.24 e Tabella 6.4*): l'energia assorbita passa da circa 206 J per compressione quasi-statica a valori tra 261 e 265 J nei test d'impatto, con un incremento del 30%.

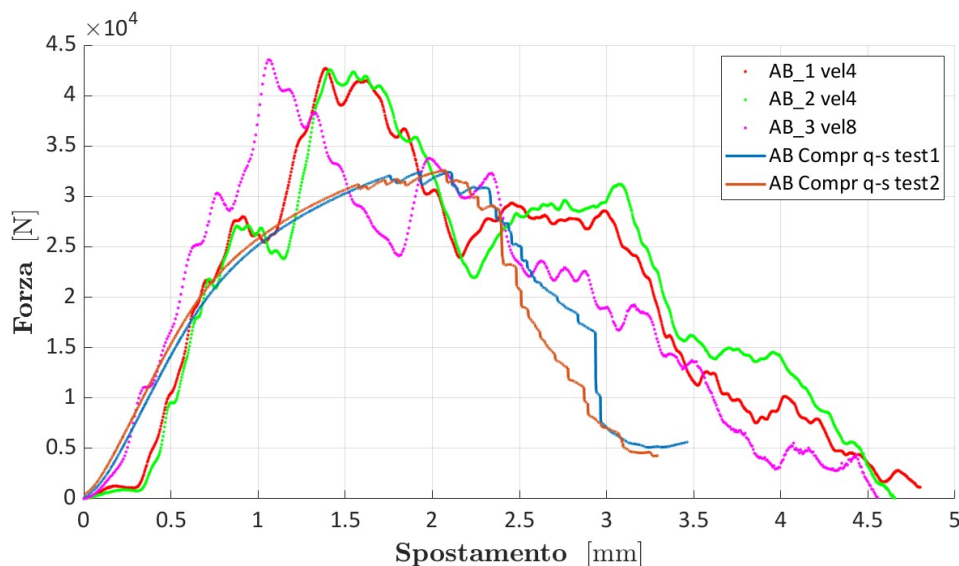


Figura 6.22: Confronto effetto strain-rate As-Built

Provini As-Built		
	F max [kN]	Energia max [J]
AB Test 1 vel4	42,67	94,58
AB Test 2 vel4	42,54	97,75
AB Test 3 vel8	43,55	89,90
AB Test 1 Compr q-s	32,45	66,90
AB Test 2 Compr q-s	32,58	66,81

Tabella 6.2: Risultati confronto strain-rate As-Built

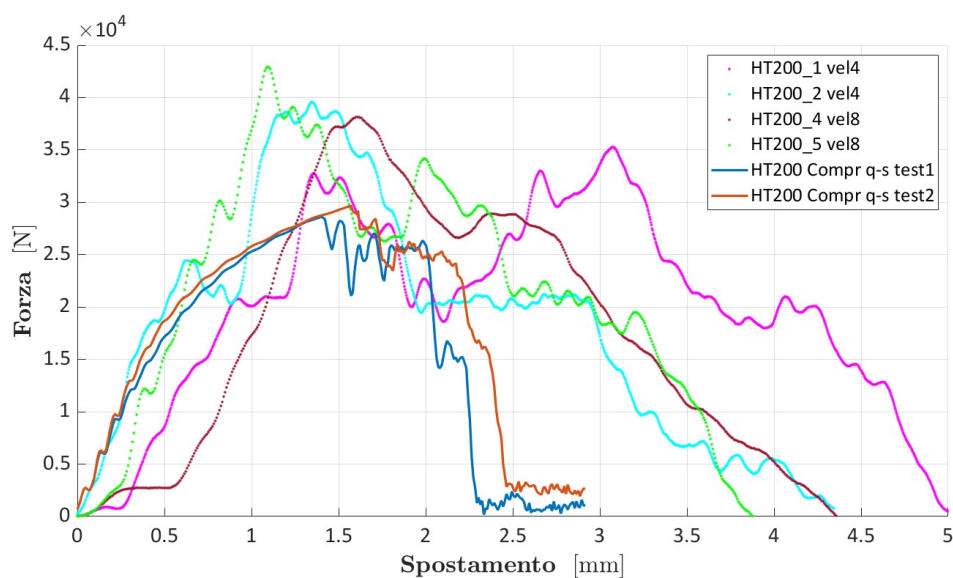


Figura 6.23: Confronto effetto strain-rate HT200

Provini HT200		
	F max [kN]	Energia max [J]
HT200 Test 1 vel4	35,27	99,29
HT200 Test 2 vel4	29,56	79,54
HT200 Test 4 vel8	38,15	76,29
HT200 Test 5 vel8	42,94	84,30
HT200 Test 1 Compr q-s	28,62	46,85
HT200 Test 2 Compr q-s	29,65	53,62

Tabella 6.3: Risultati confronto strain-rate HT200



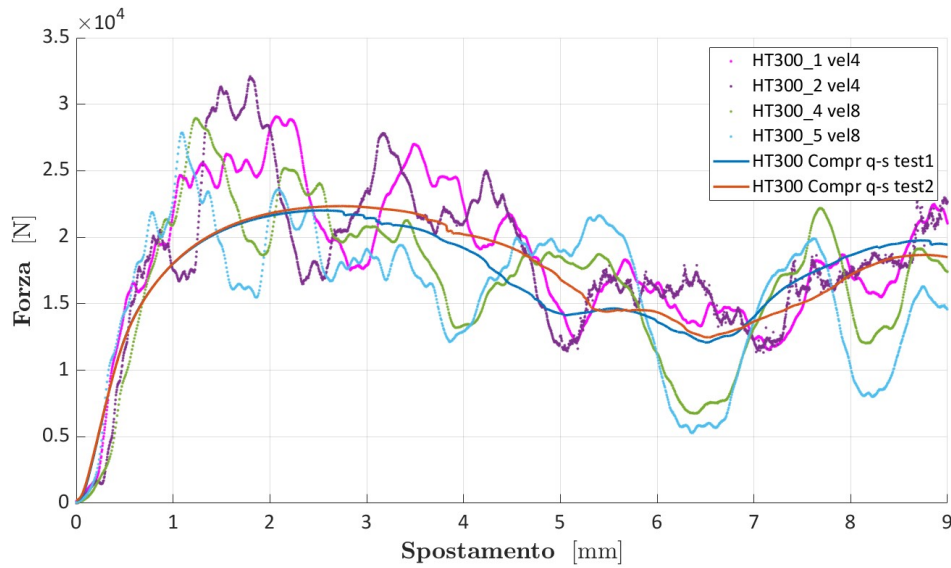


Figura 6.24: Confronto effetto strain-rate HT300

Provini HT300		
	F max [kN]	Energia max [J]
HT300 Test 1 vel4	29,08	264,67
HT300 Test 2 vel4	32,09	264,28
HT300 Test 4 vel8	28,94	261,36
HT300 Test 5 vel8	27,84	262,44
HT300 Test 1 Compr q-s	22,02	205,47
HT300 Test 2 Compr q-s	22,34	206,06

Tabella 6.4: Risultati confronto strain-rate HT300

L'incremento dell'energia assorbita nei test d'impatto può essere attribuito a un diverso meccanismo di deformazione e alla maggiore velocità di applicazione del carico, che influenza la risposta del materiale e la modalità di cedimento. Tuttavia, dai valori riportati nelle tabelle, si osserva come l'energia assorbita a velocità di 8 m/s è inferiore rispetto all'energia assorbita a 4 m/s per tutti i trattamenti termici analizzati. Questo comportamento potrebbe essere spiegato da un cambiamento nel meccanismo di cedimento del materiale, che risulta essere più fragile a velocità elevate (8m/s), assorbendo meno energia prima della frattura. Infine, analizzando le curve forza-spostamento, si può osservare che il primo tratto delle curve corrispondenti alle diverse prove risulta piuttosto simile per uno stesso trattamento termico. In particolare, per HT300, questa similitudine si estende lungo l'intero andamento della curva e non solo del primo tratto, anche se le curve di compressione quasi-statica presentano minori oscillazioni del valore di forza.

### 6.3 Modello FE senza difetti

Il modello FE per la simulazione delle prove d'impatto è generato a partire dal modello utilizzato per le simulazione di compressione quasi statica presentato precedentemente. La curva di spostamento lineare definita nel modello di compressione quasi statica è sostituita con un piano rigido che impatta con la struttura lattice. In particolare, su LS-Dyna viene definito un `*RIGIDWALL_PLANAR_FINITE_MOVING_FORCES`, a cui è assegnata opportunamente la massa e la velocità di impatto al fine di simulare numericamente le prove realizzate in laboratorio alle diverse velocità ed effettuare un confronto tra risultati numerici e sperimentali. Il piano inferiore fisso, che replica il piano di appoggio, è definito attraverso la keyword `*RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_DISPLAY`. Ad entrambi i piani rigidi è stata assegnata la material card riferita ad un acciaio comune, così come è stato fatto nel *Paragrafo 5.2.1*.

La definizione del `*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY` per la struttura lattice, a differenza di quanto avviene nelle prove di compressione quasi statica, per le prove d'impatto deve includere anche l'effetto dovuto allo strain-rate. È stato quindi considerato il modello di Cowper-Symonds, in cui il valore di tensione di snervamento  $\sigma_y$  viene modificato, a partire dalla tensione di snervamento statica  $\sigma_y^s$ , secondo la legge:

$$\sigma_y (\varepsilon_{\text{eff}}^p, \dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^p) = \sigma_y^s (\varepsilon_{\text{eff}}^p) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^p}{c} \right)^{\frac{1}{p}} \right]$$

Per migliorare la correlazione tra test reali e simulazione sia per il modello 1D sia 3D, si è deciso di eseguire diverse analisi variando opportunamente i parametri C e p, valutando di volta in volta le curve forza-spostamento ed energia-spostamento ottenute e confrontandole con le curve sperimentali corrispondenti. I valori che hanno permesso di ottenere i migliori risultati nelle simulazioni in campo dinamico sono riportati nella seguente tabella:

<b>AlSi10Mg</b>	C	p
As-Built FEA 1D	9500	1
As-Built FEA 3D	9500	1
200°C FEA 1D	8800	1
200°C FEA 3D	8800	1
300°C FEA 1D	6500	1
300°C FEA 3D	6500	1

Tabella 6.5: Parametri C e p per la definizione del materiale nei test d'impatto

### 6.3.1 Risultati simulazioni e Validazione del modello FE

Definiti i parametri ottimizzati, si procede con l'avvio delle diverse simulazioni variando opportunamente i valori di massa e velocità di impatto. Si riportano per ogni materiale i grafici di forza-spostamento ed energia-spostamento in funzione delle diverse velocità, attraverso cui è possibile effettuare un confronto tra simulazioni numeriche realizzate con modello 1D e 3D e le curve sperimentali corrispondenti. In linea generale, si può affermare che il primo tratto delle curve forza-spostamento numerico del modello FE 3D sono molto vicine alle curve sperimentali e anche per la determinazione della forza massima il modello risulta piuttosto accurato.

### 6.3.2 Risultati simulazioni test d'impatto As-Built

Il modello FE sia 1D sia 3D permette di descrivere con una buona accuratezza il comportamento della lega As-Built nei test sperimentali. La forza massima raggiunta nelle simulazioni si pone nell'intervallo di valori definito dalle curve sperimentali (*Figure 6.25 e ??*). Le curve numeriche di energia-spostamento, di entrambi i modelli e per entrambe le velocità (*Figure 6.26 e 6.29*), presentano lo stesso andamento delle curve sperimentali; anche se il modello 1D per entrambe le velocità di prova sovrastima il valore di energia assorbita dal modello. Nelle curve numeriche forza-spostamento è presente un solo picco, a differenza delle curve sperimentali dove sono presenti un numero elevato di picchi, probabilmente dovuti ad un effetto d'inerzia dell'impattatore.

L'analisi è stata impostata con un *control termination*  $t$  pari a 0.002 s per la simulazione a velocità di 4 m/s e pari a 0,001 s per la velocità di 8 m/s. In entrambi i casi si è giunto a rottura prima del termine della prova; per questo motivo è stato effettuato un passaggio di post-process delle curve, non mostrando i dati che non sono d'interesse in questa sede. Riferendosi ai grafici, è possibile affermare che entrambi i modelli considerato possono essere utilizzato per una prima analisi in vista di un progettazione di componenti in lattice: il modello 1D ha come vantaggio il minor costo computazionale, il modello 3D invece riproduce meglio l'energi assorbita durante la prova. Facendo riferimento alle *Figure 6.27 e 6.30*, il modello FE non riproduce fedelmente la modalità di cedimento presentato nei test sperimentali; è infatti visibile un cedimento sulla diagonale a  $45^\circ$  con la successiva rottura delle celle in alto ma alla fine della simulazione non si giunge alla completa rottura del modello, contrariamente a ciò che si è visto in *Figura 6.4 e 6.7*. Il modello 1D invece caratterizza meglio la modalità di rottura riscontrata nelle prove sperimentali, con rottura dapprima in diagonale seguita da rottura completa nella parte basse della struttura.

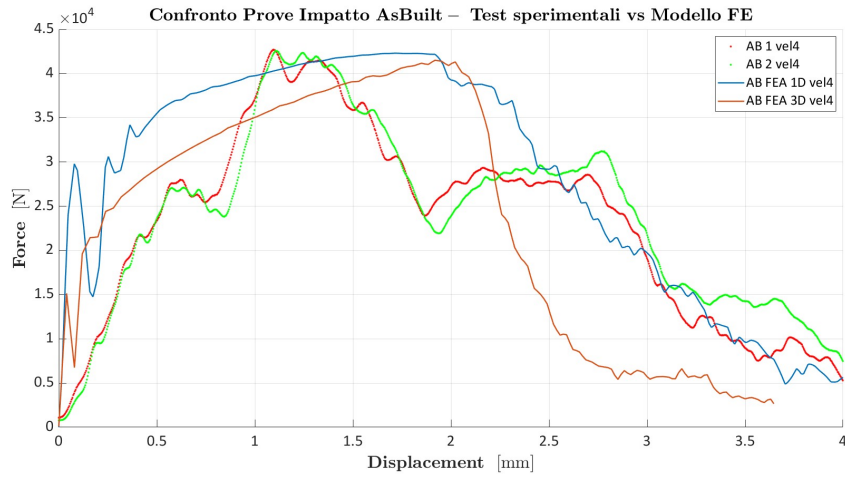


Figura 6.25: Confronto forza-spostamento prova d'impatto As-Built a velocità 4 m/s

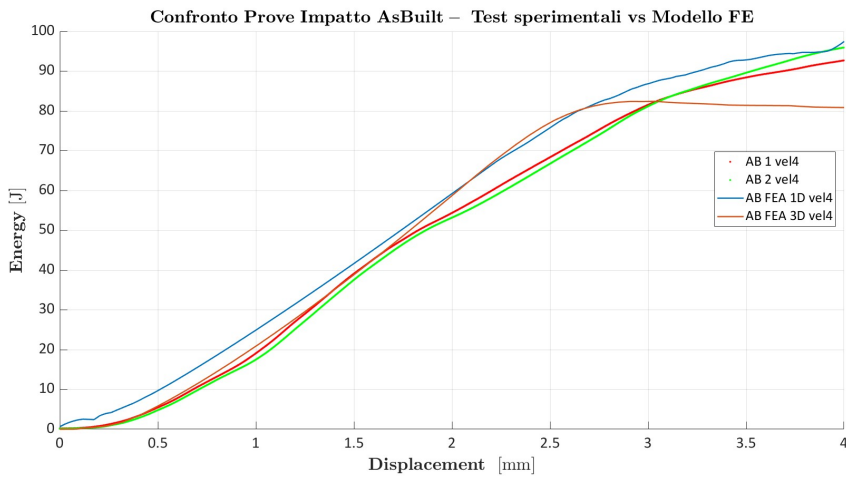


Figura 6.26: Confronto energia-spostamento prova d'impatto As-Built a velocità 4 m/s

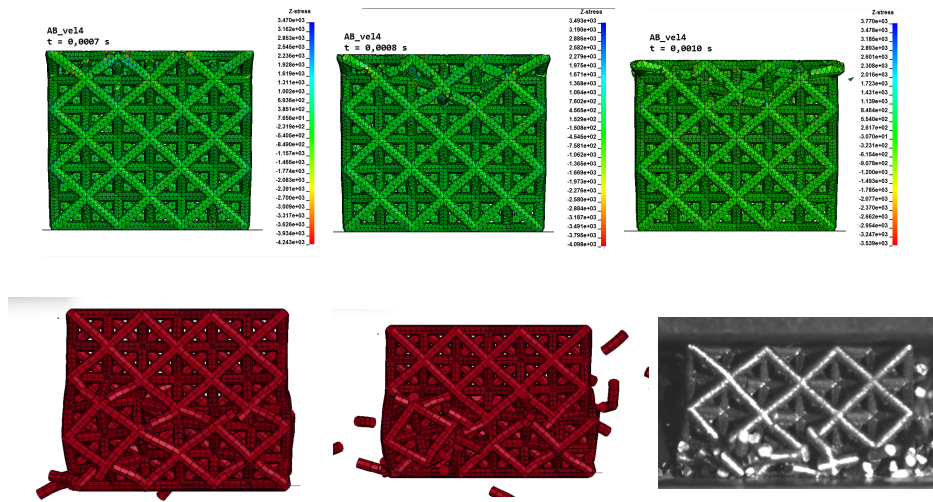


Figura 6.27: Sequenza immagini impatto FEA 3D (in alto) e 1D (in basso) As-Built a velocità 4 m/s

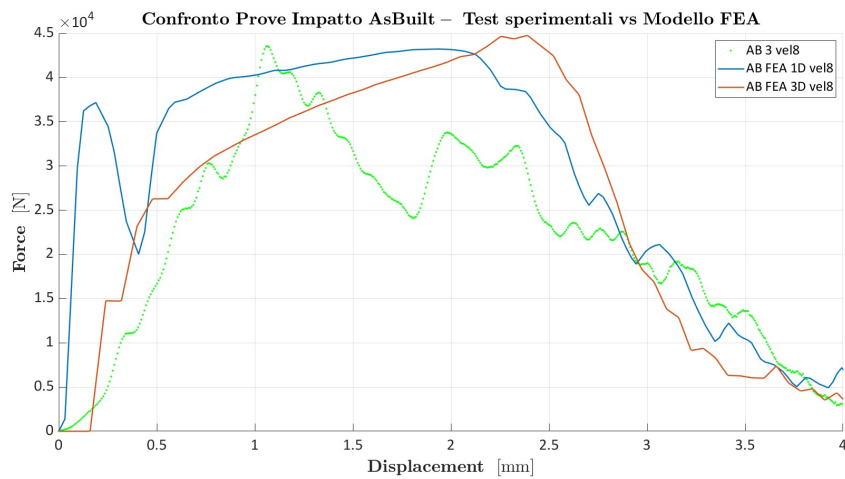


Figura 6.28: Confronto forza-spostamento prova d’impatto As-Built a velocità 8 m/s

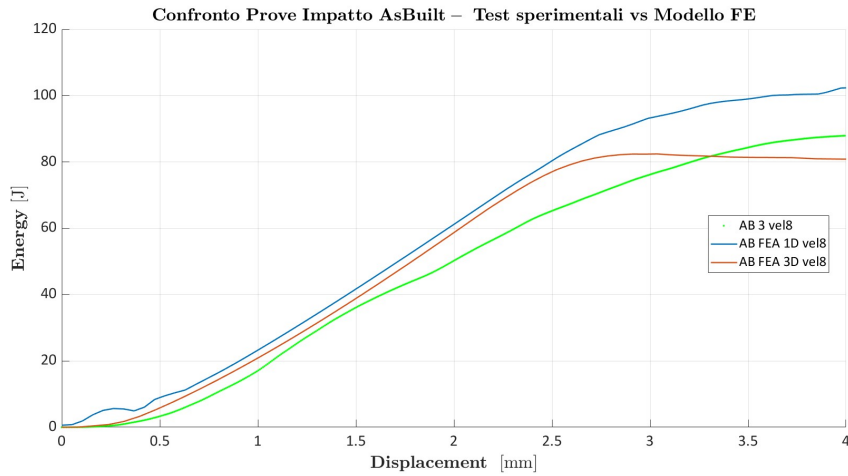


Figura 6.29: Confronto energia-spostamento prova d'impatto As-Built a velocità 8 m/s

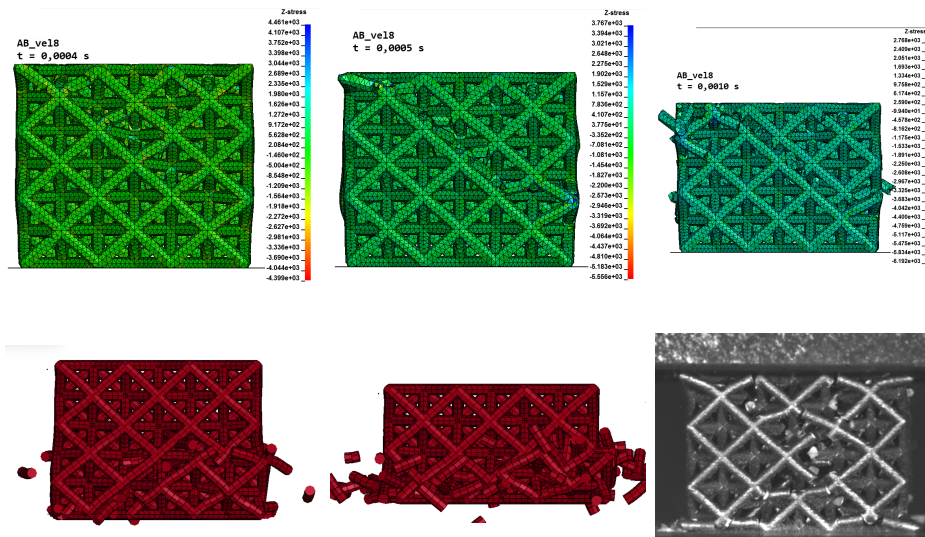


Figura 6.30: Sequenza immagini impatto FEA 3D (in alto) e 1D (in basso) As-Built a velocità 8 m/s

### 6.3.3 Risultati Simulazioni test d'impatto HT200

Per i risultati della simulazione della prova d'impatto con material card HT200 valgono le considerazioni fatte per As-Built: anche in questo caso è possibile validare il modello FE utilizzato. Anche in questo caso la distinzione tra i vantaggi proposti dai due modelli non è così netta, soprattutto se si confrontano i risultati numerici con quelli sperimentali, dove le curve forza spostamento non sono perfettamente

sovrapponibili e per questo un modello FE risulta più o meno rispondere fedelmente in base alla curva sperimentale considerata ( *Figure 6.31 e 6.34*). L'andamento delle curve energia-spostamento numeriche risulta coerente con quanto mostrato nelle curve sperimentali ( *Figure 6.32 e 6.35*). Ad ogni modo, dato il minor impiego computazionale richiesto dal modello 1D è possibile utilizzare quest'ultimo come modello di riferimento per le prime analisi numeriche, giungendo al massimo ad una sovrastima, con errore percentuale basso, dell'assorbimento energetico reale del provino.

Come avviene in As-Built, anche nel caso delle simulazioni HT200 per entrambe le velocità di prova, il modello 1D rappresenta meglio il cedimento della struttura reale rispetto al modello 3D. Quest'ultimo è caratterizzato dalla sola frattura delle celle superiori, non giungendo a rottura completa; nel modello 1D invece sono visibili le fratture in diagonale a 45° riscontrabili nei test sperimentali ( *Figure 6.33 e 6.36*)

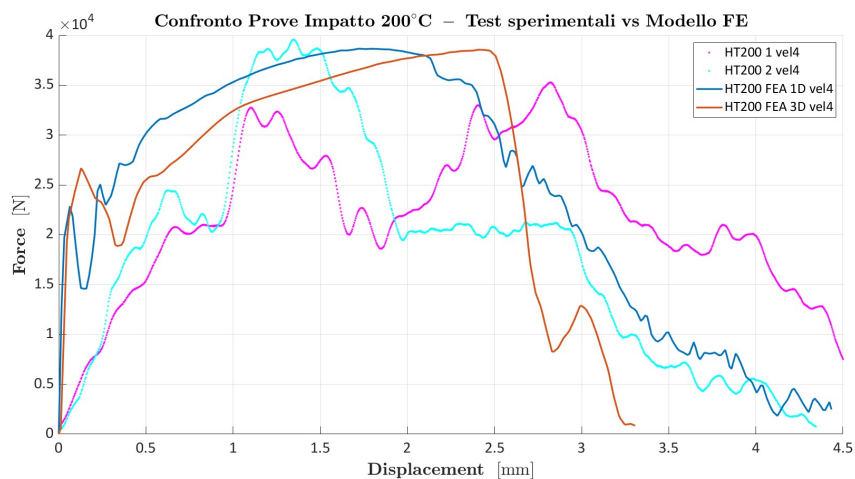


Figura 6.31: Confronto forza-spostamento prova d'impatto HT200 a velocità 4 m/s

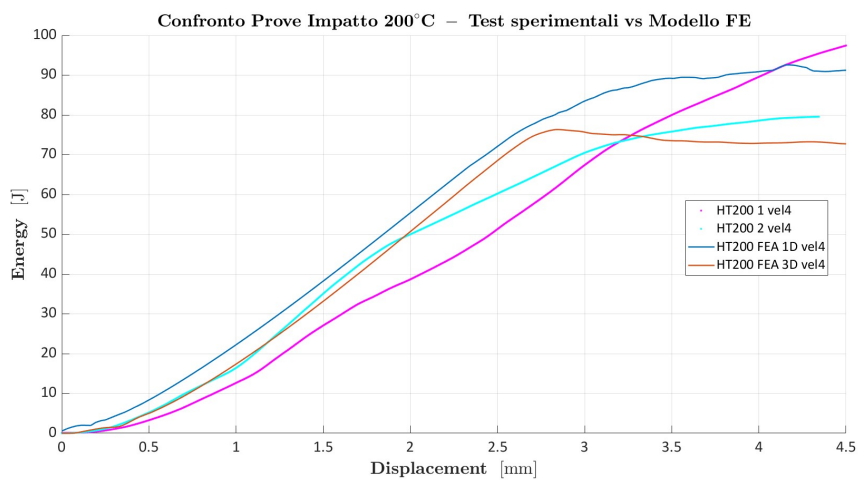


Figura 6.32: Confronto energia-spostamento prova d'impatto HT200 a velocità 4 m/s

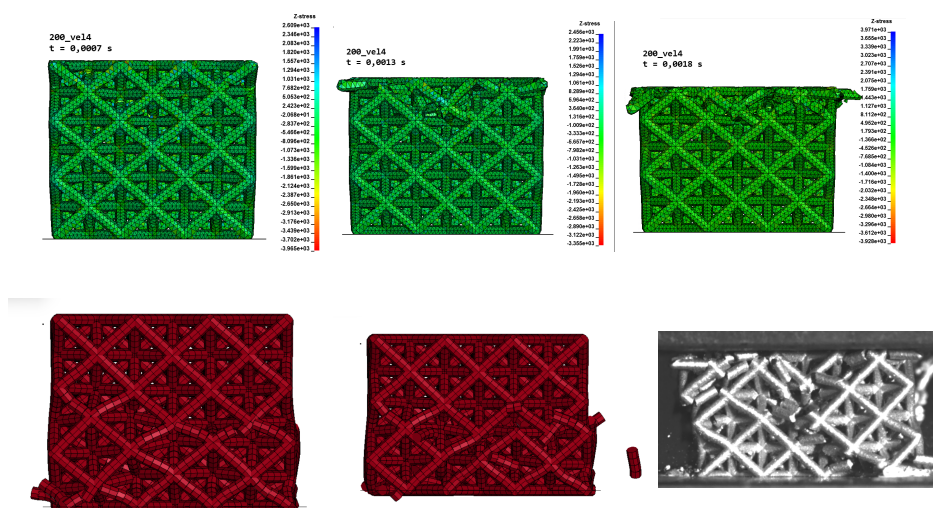


Figura 6.33: Sequenza immagini impatto FEA HT200 3D (in alto) e 1D (in alto) a velocità 4 m/s



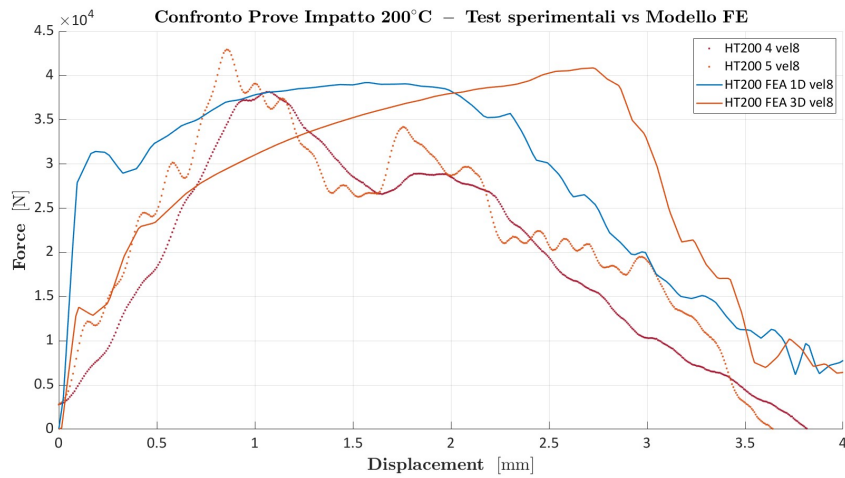


Figura 6.34: Confronto forza-spostamento prova d’impatto HT200 a velocità 8 m/s

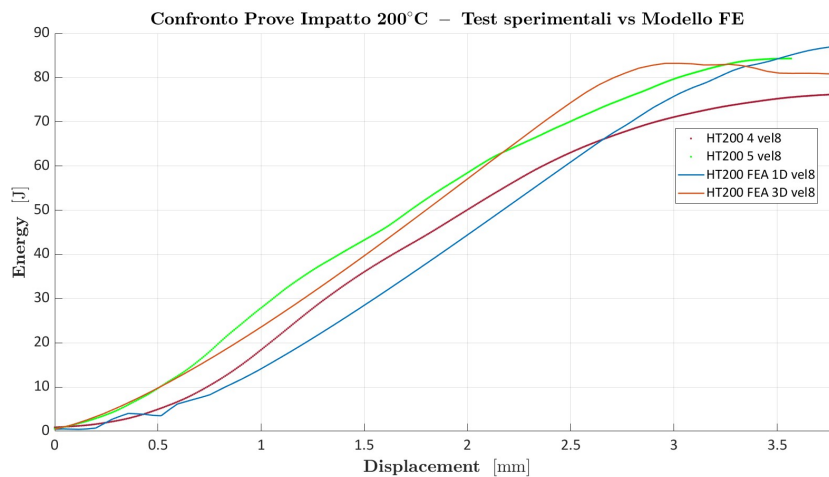


Figura 6.35: Confronto energia-spostamento prova d’impatto HT200 a velocità 8 m/s

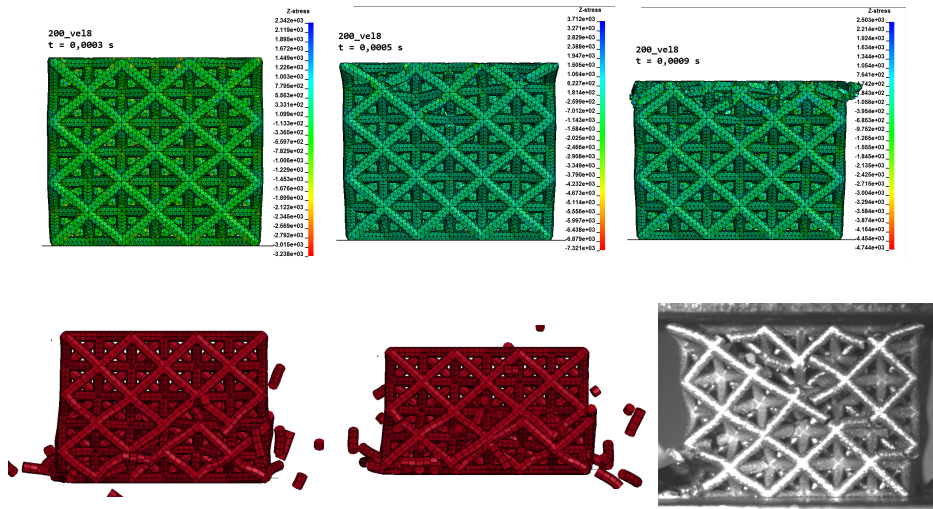


Figura 6.36: Sequenza immagini impatto FEA HT200 3D (in alto) e 1D (in basso) a velocità 8 m/s

### 6.3.4 Risultati simulazioni test d'impatto HT300

In seguito alle prime simulazioni del modello FE, che riproduce il comportamento del provino trattato a 300°C, si è notato che l'analisi numerica sovrastimava il risultato sperimentale sia per la forza massima raggiunta sia per l'energia. In particolare, il picco della forza corrispondeva ad una deformazione elevata, determinando valore dell'energia superiore a quello sperimentale. Per migliorare la correlazione tra test e simulazioni, si è pensato quindi di eseguire ulteriori analisi variando il parametro fail (valore di deformazione oltre il quale si verifica la rottura dell'elemento considerato). Il valore del fail è stato ottimizzato confrontando la curva forza-spostamento numerica con quelle sperimentali. Nello specifico, si è passati da un valore fail pari a 0,43, ricavato dalle prove di trazione, al valore fail pari 0,3. Si sottolinea che, nonostante questa variazione, la curva forza-spostamento ottenuta dal modello FE 3D non riproduce fedelmente la curva sperimentale (*Figure 6.37 e 6.40*), in quanto le curve sperimentali presentano diversi picchi a differenza della curva numerica 3D che presenta un picco pronunciato ad una deformazione maggiore rispetto a quella corrispondente al picco sperimentale. Tuttavia, sono stati riscontrati dei miglioramenti significativi soprattutto per quanto riguarda l'energia assorbita, che risulta ora più vicina per entrambi i modelli ai valori ottenuti nei test sperimentali (*Figure 6.38 e 6.41*). Inoltre è possibile affermare che in termini di energia il modello 1D sembra ripercorrere molto accuratamente gli andamenti delle energie di impatto sperimentali. Risulta quindi più appropriato utilizzare il modello FE 1D per simulare il comportamento del provino trattato a 300°C. Le immagini (*Figure 6.39 e 6.42*) ricavate dalle diverse simulazioni mostrano un'iniziale deformazione plastica in direzione diagonale a 45° seguita da una rottura delle beam, in disaccordo con

quanto mostrato dalle immagini dei test sperimentali (*Figure 6.18 e 6.21*), dove si ha un impacchettamento delle celle dovuto alla deformazione plastica. Le modalità di rottura riportate dal modello 1D invece risultano molto più simili ai risultati dei test sperimentali.

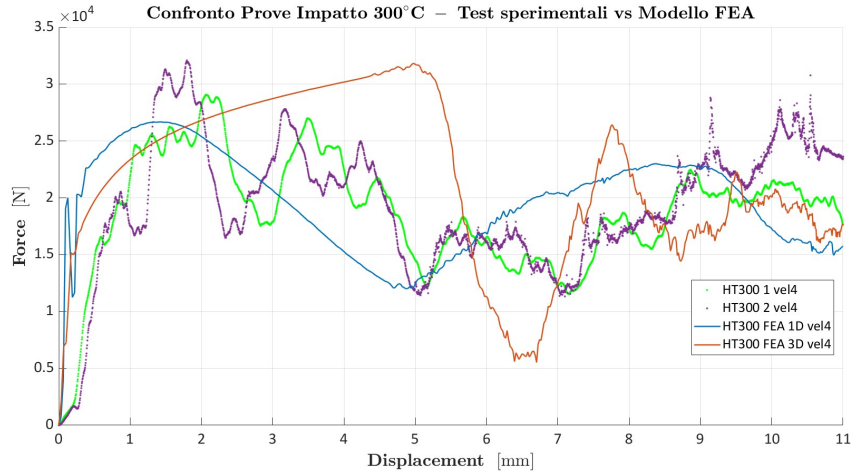


Figura 6.37: Confronto forza-spostamento prova d’impatto HT300 a velocità 4 m/s

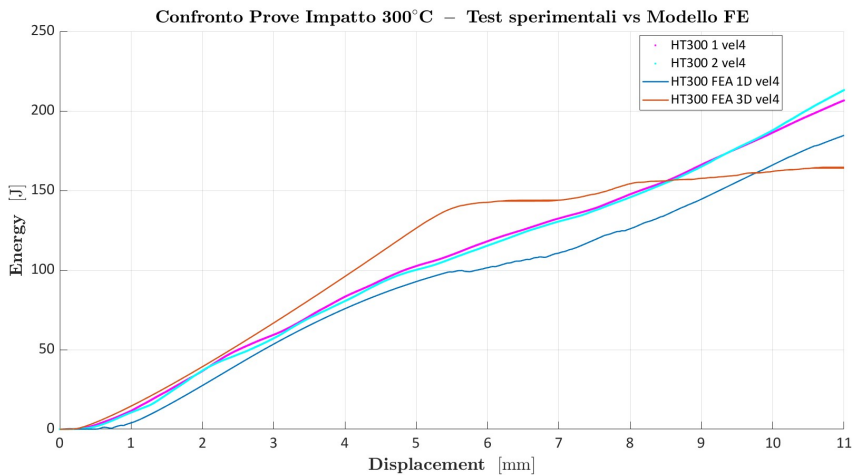


Figura 6.38: Confronto energia-spostamento prova d’impatto HT300 a velocità 4 m/s

## Prove d'impatto

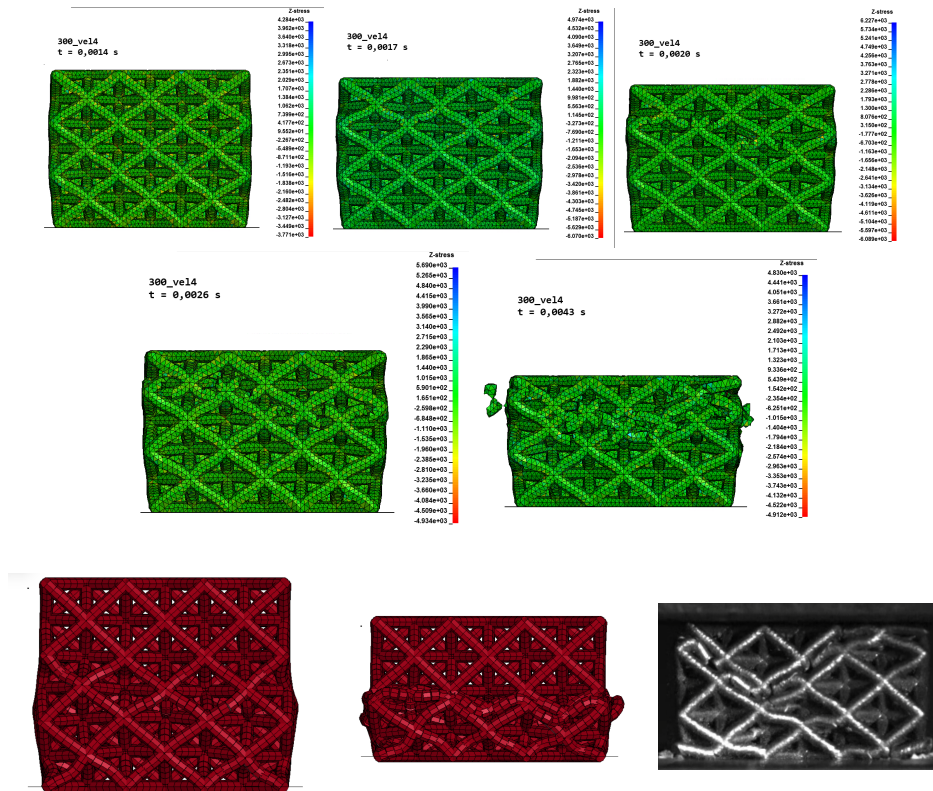


Figura 6.39: Sequenza immagini impatto FEA 3D (in alto) e 1D (in basso) HT300 a velocità 4 m/s

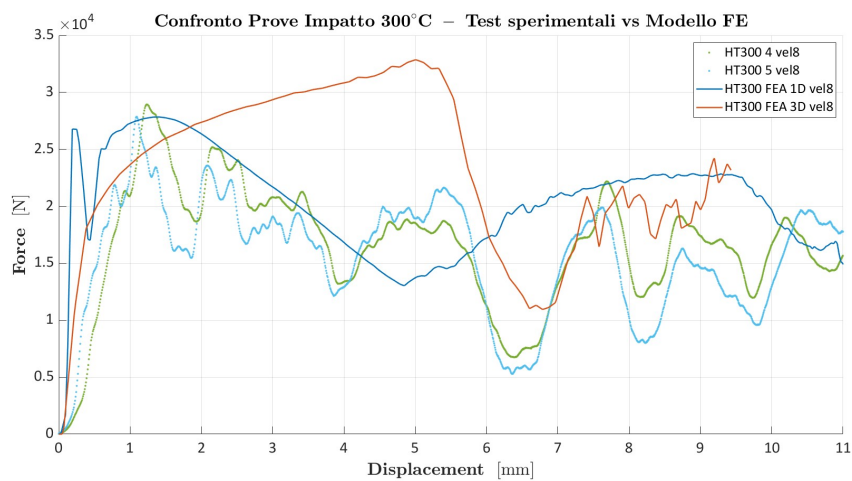


Figura 6.40: Confronto forza-spostamento prova d'impatto HT300 a velocità 8 m/s

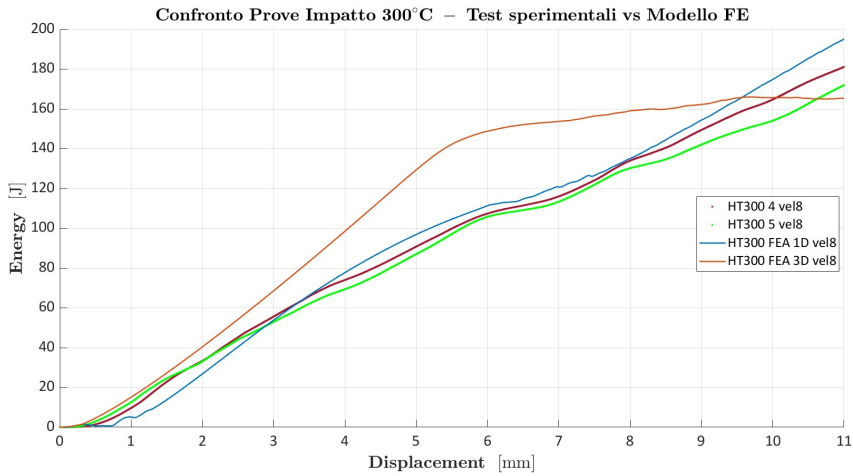


Figura 6.41: Confronto energia-spostamento prova d’impatto HT300 a velocità 8 m/s

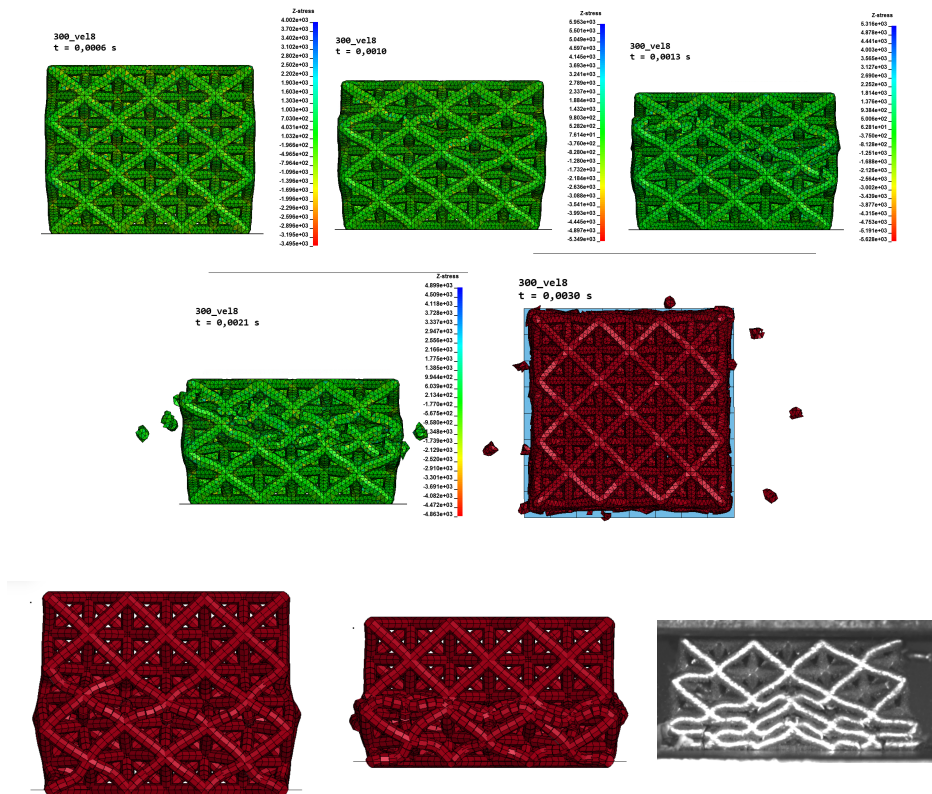


Figura 6.42: Sequenza immagini impatto FEA 3D(in alto) e 1D (in basso) HT300 a velocità 8 m/s

### **Conclusioni sui modelli FE per prova d'impatto**

Dopo aver analizzato i diversi risultati ottenuti, è possibile fare un confronto generale tra i modelli utilizzati. Le diverse analisi agli elementi finiti hanno evidenziato che i due modelli 1D e 3D mostrano valori di forza massime comparabili con i risultati sperimentali. In linea generale, il modello 1D si è dimostrato più accurato nell'approssimare le deformazioni osservate sperimentalmente e, allo stesso tempo, ha garantito un notevole risparmio in termini di tempo di calcolo: per As-Built e Ht200 2 minuti contro i 25 minuti richiesti dal modello 3D, per HT300 sono richiesti 5 minuti contro i 35 minuti per il modello 3D; le simulazioni 1D sono state lanciate con risorse disponibili per LS-Dyna di 4 CPU e MEMORY 20 m, mentre le simulazioni 3D con 24 CPU e MEMORY 222 m. Questo suggerisce che il modello 1D può rappresentare una scelta più vantaggiosa, in termini soprattutto computazionali. Si è visto inoltre come il modello 1D, seppur con qualche lieve sovrastima, riproduce bene l'assorbimento di energia subito dal provino. Tuttavia, potrebbero essere utili ulteriori analisi per migliorare la valutazione delle forze, in maniera tale che anche l'andamento delle curve forza-spostamento numeriche sia perfettamente riconducibile ai risultati sperimentali. In particolare, sarebbe opportuno continuare a lavorare sul modello 3D del HT300 in maniera tale da riprodurre in modo più accurato l'andamento della curva sperimentale e la modalità di cedimento, che include una deformazione plastica accentuata prima dell'impacchettamento delle celle. Il miglioramento in vista di una rappresentazione più fedele della modalità di cedimento può essere estesa anche ai modelli per As-Built e HT200.

# Capitolo 7

## Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha permesso di analizzare il comportamento di strutture lattice realizzate in lega di alluminio AlSi10Mg, in tre diverse configurazioni: As-Built e sottoposta a due diversi trattamenti termici di ricottura a basse e medie temperature, 200°C e 300°C. Di tali configurazioni sono state ricavate le curve tensione-deformazione quasi-statica attraverso una prova di trazione con tecnica DIC (Digital Image Correlation). Ai test sperimentali effettuati in laboratorio, sono seguite le analisi agli elementi finiti che hanno permesso di validare modelli con l'obiettivo di prevedere i comportamenti statici e dinamici delle strutture lattice. Le prime analisi effettuate sono state le scansioni tomografiche Micro-CT che hanno mostrato la numerosità e le dimensioni dei difetti presenti nei diversi provini analizzati. Utilizzando questi dati e uno script MATLAB, che considera la loro variabilità, è stato possibile sviluppare un modello FE in grado di tenere conto della presenza dei difetti. In questo modo è stato possibile effettuare un confronto tra i dati sperimentali e i risultati numerici di diversi modelli (modello FE 1D e 3D in cui si trascurano i difetti e modello 1D con difetti). In linea generale, si è visto come la dimensione dei difetti per i diversi trattamenti termici non varia di molto e che per le strutture 2x2x2 il picco di distribuzione delle dimensioni si pone tra i 100 e 150  $\mu\text{m}$ , mentre per le strutture 3x3x3 il picco è intorno al valore di 50  $\mu\text{m}$ . Dal punto di vista sperimentale è evidente l'ottima ripetibilità ottenuta nei test effettuati per ogni materiale. Le prove di compressione quasi-statica effettuate su struttura lattice 2x2x2 e 3x3x3 hanno mostrato come le due strutture presentano un comportamento sovrapponibile per ciascun materiale, con curve Tensione-Deformazione simili. I provini As-Built e HT200 presentano andamenti delle curve tensione deformazione molto simili tra loro, con l'unica differenza delle tensioni massime ottenute, che risultano minori nel provino HT200 (40 MPa contro i 44 MPa dell'As-Built). I provini trattati a 300°C presentano tensioni massime inferiori ai casi precedenti (30 MPa) ma deformazioni finali raggiunte molto elevate, circa il 50% prima dell'innesco del fenomeno della densificazione. Quanto detto è riscontrabile anche nel confronto delle modalità di cedimento della struttura per

i tre diversi materiali: i provini As-Built e HT200 mostrano inizialmente fratture in diagonale a  $45^\circ$  seguite da una rottura completa delle celle della struttura, i provini HT300 invece mostrano elevata deformazione plastica che porta ad un impacchettamento delle celle. Le stesse modalità di rottura sono riscontrabili anche nei test d'impatto. Tramite le prove d'impatto è stato inoltre possibile valutare l'effetto dello strain-rate. In generale, per i diversi trattamenti termici, si osserva che all'aumentare della velocità della prova corrisponde un incremento della forza massima applicata al provino. Inoltre, l'energia assorbita dal provino durante le prove d'impatto risulta superiore a quella assorbita nelle prove di compressione quasi-statica. Per le prove di compressione quasi statica si è visto che tutti i modelli FE riproducono correttamente l'andamento generale della curva tensione-deformazione sperimentale, ma solo il modello in cui sono presenti i difetti stima in modo corretto la tensione massima raggiunta. È consigliabile proseguire l'analisi sui dati della deformazione, in maniera tale da avere risultati migliori per quanto riguarda il raggiungimento della deformazione di rottura nei diversi materiali analizzati: la deformazione plastica nei modelli 3D risulta inferiore rispetto a quella osservata nei test sperimentali, poiché la struttura cede anticipatamente, dopo aver subito deformazioni plastiche di entità minore rispetto a quelle rilevate nei test e con maggiori punti di frattura. Le modalità di rottura riscontrate nei test sperimentali (fratture in diagonale a  $45^\circ$  per As-Built e HT200 e deformazione plastica accentuata in diagonale a  $45^\circ$  per HT300) vengono invece ben rappresentate nei modelli FE 1D.

Analizzando le prove d'impatto, le curve forza-spostamento dei modelli FE non replicano fedelmente i risultati sperimentali: i picchi rilevati nei test sperimentali risultano attenuati nelle curve numeriche. Tuttavia, l'energia assorbita risultante nelle simulazioni si dimostra molto coerente con quella reale. Passando alle modalità di cedimento, i modelli 1D e 3D rispondono diversamente all'applicazione del carico: nei test sperimentali, a fine prova, si ottengono rotture complete per le strutture lattice realizzate in As-Built e HT200 e impacchettamenti senza distacco per le strutture in HT300, ciò viene ben rappresentato nei modelli 1D, mentre nei modelli FE si ottengono parti solo parzialmente interessate da rottura per As-Built e HT200 e deformazioni plastiche poco accentuate per HT300.

Sono state inoltre effettuate analisi della microstruttura con tecnica EBSD, mostrando che il trattamento termico comporta un aumento delle dimensioni dei grani cristallini di alluminio all'interno del provino. Risulta evidente che variazioni di microstruttura comportano delle differenti proprietà meccaniche della lega in seguito ai diversi trattamenti termici. La presenza di grani più grandi permette di aumentare significativamente l'allungamento a rottura, come avviene nel caso del provino trattato a  $300^\circ\text{C}$ , ottenendo un aumento della duttilità del materiale a discapito del carico di rottura.

In conclusione, i risultati ottenuti possono considerarsi come la base di partenza per la progettazione di componenti in struttura lattice realizzati in diversi materiali



e hanno mostrato come la scelta di un opportuno trattamento termico permetta di migliorare notevolmente le capacità di assorbimento di energia in presenza di impatti. Come possibili sviluppi futuri, si potrebbero condurre studi mirati a esplorare la potenzialità del trattamento termico a 300°C, poiché è emerso che, nelle prove d'impatto, il provino è in grado di assorbire una maggiore quantità di energia, pari a più del doppio di quanto ottenuto nelle condizioni As-Built e HT200.

# Ringraziamenti

Così è finito questo percorso al politecnico, che ha dato e tolto tanto, tornassi indietro a 6 anni fa rifarei la stessa scelta. Quante lacrime e disperazioni hanno visto le aule studio in questi anni, ma anche attimi di leggerezza nei corridoi e nelle pause caffè essenziali.

Ringrazio i professori Andrea Tridello e Carlo Boursier Niutta che mi hanno aiutato in questo lavoro, li ringrazio per non avermi mai messo fretta anche se spesso sarebbe servito, mi hanno fatto capire che l'obiettivo finale era comune e non solo mio o solo loro, che era un rapporto di collaborazione alla pari, anche se diciamo che tutta io trovo ancora strano il grande entusiasmo di fronte ad una prova di compressione. Chiedo scusa a questa tesi se l'ho accolta nel periodo più brutto che mi sia capitato, se forse non sono riuscita a darle il mio 100%. Mi sono sentita come quel provino lattice alla fine della prova d'impatto: sai che non puoi ricostruirlo perché ormai alcuni pezzi sono andati, eppure l'idea di provarci c'è. Ma vorrei anche ringraziarla perché durante questi mesi ho capito che quando pensi di essere arrivata al limite della pazienza, hai sempre la voglia di provarne un'altra di simulazione sperando vada meglio.

Infine ringrazio me stessa (è scontato lo so) e coloro che mi sono stati accanto, supportandomi e sopportandomi durante questo percorso universitario, vi voglio bene.

# Bibliografia

- [1] Luca Iuliano. *Slide del corso di Tecniche per la Fabbricazione Additiva, Politecnico di Torino*.
- [2] Yuhua Li et al. “High Mechanical Performance of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing”. In: *Metals* 14 (ott. 2024), p. 1165. DOI: [10.3390/met14101165](https://doi.org/10.3390/met14101165).
- [3] Tianyu Yu et al. “Structure-property relationship in high strength and light-weight AlSi10Mg microlattices fabricated by selective laser melting”. In: *Materials & Design* 182 (2019), p. 108062. ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108062>.
- [4] Chen Siqi et al. “Annealing behavior of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 2635 (nov. 2023), p. 012036. DOI: [10.1088/1742-6596/2635/1/012036](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2635/1/012036).
- [5] Carlo Boursier Niutta, Raffaele Ciardiello e Andrea Tridello. “Experimental and Numerical Investigation of a Lattice Structure for Energy Absorption: Application to the Design of an Automotive Crash Absorber”. In: *Polymers* 14 (mar. 2022), p. 1116. DOI: [10.3390/polym14061116](https://doi.org/10.3390/polym14061116).
- [6] Giovagnoli M. “On the process-microstructure-properties relationship of a laser additively manufactured AlSi10Mg alloy”. In: *PhD thesis, Università degli studi di Ferrara* (2021).
- [7] Biao Zhang et al. “Mechanical characterization of lattice structures fabricated by selective laser melting via an image-based finite cell method with a damage model”. In: *Materials & Design* 244 (2024), p. 113168. ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113168>.
- [8] Hegaxon. *VG Studio*. 2025. URL: <https://www.volumegraphics.com/> (visitato il giorno 2 mar. 2025).
- [9] Y. Murakami. *Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions*. Elsevier, 2002.
- [10] Ansys. *LS-DYNA*. 2025. URL: <https://lsdyna.ansys.com/> (visitato il giorno 2 mar. 2025).

## BIBLIOGRAFIA

---

- [11] S.I. Shakil et al. “Additive manufactured versus cast AlSi10Mg alloy: Microstructure and micromechanics”. In: *Results in Materials* 10 (2021), p. 100178. ISSN: 2590-048X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100178>.
- [12] Oxford. *EBSD*. 2025. URL: <https://www.ebsd.com/ebsd-explained/what-is-ebsd> (visitato il giorno 4 mar. 2025).
- [13] Presi. *Mecatech 250*. 2025. URL: <https://www.presi.com/en/product/mecatech-250-spc/> (visitato il giorno 7 mar. 2025).
- [14] Paolo Matteis. *Appunti del corso di Materiali per l'industria meccanica, Politecnico di Torino*.