

Università degli studi di Napoli Federico II



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base  
Dipartimento di Ingegneria Industriale

**DOTTORATO DI RICERCA**

**IN**

**Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine**

**(XXXIII CICLO)**

Progettazione di strutture lattice in acciaio inossidabile 17-4PH: influenza dei parametri di processo sulle proprietà meccaniche, caratterizzazione del materiale e strategie di simulazione.

**COORDINATORE DEL DOTTORATO**

Ch.mo Prof. Michele Grassi

**Relatore**

Prof. Luca Esposito

**Candidato**

Ing. Alcide Bertocco

2020/2021



# SOMMARIO

Il mondo dell'ingegneria industriale, al giorno d'oggi, sempre più spesso incontra la necessità di realizzare componenti caratterizzati dall'elevato rapporto tra proprietà meccaniche e peso o con proprietà meccaniche non ottenibili utilizzando i materiali tradizionali. In campo biomedicale, ad esempio, la realizzazione di protesi, di innesti ossei e dentali richiede l'utilizzo di metamateriali che abbiano una risposta variabile in funzione del ruolo che svolgono. L'utilizzo dei materiali tradizionali, così come delle tecnologie tradizionali, riduce fortemente il range di variazione delle proprietà meccaniche ottenibili. Spesso vincoli di ingombro, di resistenza alla corrosione del materiale base e reologici, risultano prerequisiti che non consentono possibilità di manovra al progettista meccanico. Con lo sviluppo della Stampa 3D o *Additive Manufacturing (AM)*, di materiali sia polimerici che metallici che ceramici, si è resa possibile la realizzazione di componenti aventi proprietà geometriche tali da poter soddisfare questa richiesta. In tutti questi ambiti, l'utilizzo di strutture cellulari (*Lattice Structures*) va incontro alle esigenze descritte, proponendosi come soluzione, di non facile implementazione, in tutti quei casi in cui le proprietà meccaniche specifiche o la necessità di avere proprietà *ad hoc* la fanno da padrone. Nella progettazione delle strutture lattice gli ingombri potrebbero essere dettati da vincoli di assemblaggio mentre la scelta del materiale, da vincoli di resistenza alla corrosione o di interazione con l'ambiente circostante. In questo caso la cella elementare e la densità relativa con cui realizzare la struttura resterebbero libera scelta del progettista, dandogli quindi controllo sulla variazione delle proprietà meccaniche del componente in un ampio range.

La forte complessità geometrica, intrinseca nelle strutture lattice, rende la loro realizzazione particolarmente complessa anche per le tecnologie *AM* e la loro risposta in funzione dello stato sollecitativo non è facilmente prevedibile. Non esistono ad oggi tecniche di progettazione normative né tantomeno linee guida generali. I software più utilizzati per la progettazione di strutture lattice non tengono conto di come la tecnologia *AM* influenzi in maniera non trascurabile la risposta meccanica dei solidi cellulari,

rendendo così queste strutture molto poco impiegate in ambito industriale nonostante le opportunità che offrono. Per queste ragioni il mondo della ricerca si sta prodigando negli ultimi anni per approfondirne il comportamento e rendere così più affidabile la loro messa in esercizio.

In questo lavoro di dottorato sono stati approfonditi svariati aspetti circa la progettazione di strutture lattice in acciaio inossidabile 17-4PH stampate con tecnologia SLM (*Selective Laser Melting*). Si è partiti dall'individuare i corretti parametri di stampa valutandone l'influenza sulle proprietà meccaniche delle strutture lattice. Si è caratterizzato il materiale 17-4PH stampato in funzione dello stato sollecitativo e dell'orientazione di stampa. Le informazioni derivanti da queste prime due fasi sono state utilizzate per progettare due diverse tipologie di strutture lattice il cui comportamento meccanico è stato caratterizzato sia in regime quasi statico che dinamico. Utilizzando poi i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale condotta sia sul materiale base che sulle strutture lattice, sono state sviluppate due diverse tecniche di modellazione agli elementi finiti che potrebbero dare al progettista il supporto necessario per effettuare una progettazione affidabile delle strutture lattice.

**INDICE**

<b><u>INDICE</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>INDICE DELLE FIGURE</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b><u>INDICE DELLE TABELLE</u></b>	<b><u>10</u></b>
<b><u>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE AL LAVORO DI TESI</u></b>	<b><u>11</u></b>
1.1 DEFINIZIONE DEL PROBLEMA	12
1.2 APPROCCIO E PROCEDURA UTILIZZATI	12
1.3 ORGANIZZAZIONE DEL LAVORO	13
<b><u>CAPITOLO 2 ADDITIVE MANUFACTURING</u></b>	<b><u>14</u></b>
2.1 STORIA DELLA STAMPA 3D	14
2.2 MANIFATTURA SOTTRATTIVA ED ADDITIVA	15
2.3 IL PROCESSO	18
2.4 TECNOLOGIE PRODUTTIVE & MATERIALI	20
2.5 ASPETTI ECONOMICI	26
2.5.1 BENEFICI E COSTI DELL'ADDITIVE MANUFACTURING	28
2.6 INTERESSE PER L'ADDITIVE MANUFACTURING	32
2.6.1 IN ITALIA	36
<b><u>CAPITOLO 3 LE STRUTTURE LATTICE</u></b>	<b><u>41</u></b>

---

<b>3.1</b>	<b>PROPRIETÀ DELLE STRUTTURE LATTICE</b>	<b>41</b>
3.1.1	LA DENSITÀ RELATIVA	44
3.1.2	PROPRIETÀ ELASTICHE DELLE STRUTTURE LATTICE PERIODICHE	47
<b>3.2</b>	<b>ASSORBIMENTO DI ENERGIA NEI MATERIALI CELLULARI</b>	<b>52</b>
 <b><u>CAPITOLO 4</u> <u>LA STAMPA DELLE STRUTTURE LATTICE</u></b>		<b><u>56</u></b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>MATERIALI E METODI</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>VERIFICA DEL PARAMETRO STANDARD: JOB I</b>	<b>61</b>
4.3.1	RISULTATI	64
<b>4.4</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI DI STAMPA: JOB II</b>	<b>67</b>
4.4.1	RISULTATI	69
<b>4.5</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>76</b>
 <b><u>CAPITOLO 5</u> <u>CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE BASE</u></b>		<b><u>79</u></b>
<b>5.1</b>	<b>MATERIALI E METODI</b>	<b>79</b>
5.1.1	GEOMETRIA DEI PROVINI	79
5.1.2	TRAZIONE UNIASSIALE	81
5.1.3	TRAZIONE UNIASSIALE IN TEMPERATURA	82
5.1.4	BARRA DI HOPKINSON	84
<b>5.2</b>	<b>RISULTATI</b>	<b>87</b>
5.2.1	TRAZIONE UNIASSIALE	88
5.2.2	TRAZIONE UNIASSIALE IN TEMPERATURA	88
5.2.3	BARRA DI HOPKINSON	90
<b>5.3</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>95</b>
 <b><u>CAPITOLO 6</u> <u>TEST STRUTTURE LATTICE</u></b>		<b><u>98</u></b>
<b>6.1</b>	<b>MATERIALI E METODI</b>	<b>98</b>

---

<b>6.2</b>	<b>RISULTATI</b>	<b>102</b>
6.2.1	DIMENSIONI E DENSITÀ RELATIVA	102
6.2.2	COMPRESSIONE	103
6.2.3	BARRA DI HOPKINSON	106
6.2.4	TEST BALISTICI	112
<b>6.3</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>114</b>
 <b><u>CAPITOLO 7</u></b>		
<b><u>IL MODELLO FEM</u></b>		<b><u>117</u></b>
<b>7.1</b>	<b>IL MODELLO COSTITUTIVO</b>	<b>119</b>
7.1.1	COMPORAMENTO QS	120
7.1.2	EFFETTO TEMPERATURA	124
7.1.3	EFFETTO STRAIN RATE	127
<b>7.2</b>	<b>IL MODELLO LATTICE</b>	<b>130</b>
7.2.1	COMPRESSIONE QS	130
7.2.2	GLI SPARI	138
 <b><u>CAPITOLO 8</u></b>		
<b><u>CONCLUSIONI</u></b>		<b><u>146</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAFIA</u></b>		<b><u>149</u></b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 - I 5 step dell' Additive Manufacturing [12] .....	20
Figura 2.2 - Schema generale di un apparato PBF .....	21
Figura 2.3 - Rappresentazione schematica apparato DED [15].....	22
Figura 2.4- Schema generale di un apparato di fotopolimerizzazione laser.....	22
Figura 2.5 - Schema generale apparato di Sheet Lamination .....	23
Figura 2.6 - Schema generale apparato di Binder Jetting.....	24
Figura 2.7 - Schema generale apparato di Material Jetting .....	24
Figura 2.8 - Schema generale apparato FDM.....	25
Figura 2.9 - Economia di scala e tecnologie produttive .....	28
Figura 2.10 - Trend delle ricerche Google per il termine "3D Printing" .....	33
Figura 2.11 - Confronto trend di ricerca tra 3D Printing (blu) e Milling (rosso) .....	33
Figura 2.12-Risultati del sondaggio condotto dalla Gartner, Inc. circa le motivazioni per cui le aziende stanno implementando sistemi di Stampa3D nel loro apparato tecnologico. .....	35
Figura 2.13-Risultati sondaggio de circa le motivazioni per cui non vengono implementate tecnologie di Stampa 3D nella propria azienda .....	36
Figura 2.14-Dimensione totale del mercato relativo all'AM con proiezione fino al 2027. .....	36
Figura 2.15 Uso di tecnologie digitali in Italia per dimensioni delle Aziende [8]. .....	39
Figura 2.16- Uso delle tecnologie digitali in Italia per territori [8]. .....	39
Figura 2.17- Uso delle tecnologie digitali in Italia per settore [8]. .....	40
Figura 2.18-Produzione manifatturiera italiana per area geografica [8].....	40
Figura 3.1-Rigidezza dei materiali noti in funzione della loro densità [25]......	42

Figura 3.2- Estensione delle proprietà meccaniche grazie all'utilizzo delle schiume:(a)densità;(b)conducibilità termica;(c)Modulo elastico;(d)resistenza a compressione [24].	43
Figura 3.3-Confronto tra solido cellulare e con porosità isolata [24].	45
Figura 3.4-Curva Stress-Strain per una struttura bending-dominated [26].	50
Figura 3.5- Curva Stress-Strain per una struttura stretching-dominated [26].	52
Figura 3.6-Curve stress-strain per un solido monolitico ed uno cellulare dello stesso materiale. Energia assorbita per unità di volume in corrispondenza dello stress massimo.	53
Figura 3.7-Risposta stress strain di strutture lattice con diversa densità di energia sottoposte a compressione.	54
Figura 4.1-Processo di generazione delle melts pool [40].	58
Figura 4.2-Formazione di agglomerati di polveri adese alla struttura principale.	59
Figura 4.3-Polveri acciaio 17-4PH	60
Figura 4.4-Progettazione del primo job	63
Figura 4.5-Primo piano di stampa	63
Figura 4.6- Realizzazione Job I	64
Figura 4.7-Processo di stampa e di smaltimento del calore Q in travi con asse perpendicolare (sx) e parallelo (dx) al piano di stampo	65
Figura 4.8-Formazione di satellites nelle strutture stampate	66
Figura 4.9-Progettazione e codifica piano di stampa	68
Figura 4.10- Struttura simile alla 4 con inclinazione delle struts di: blu 0°, verde 35,3°, giallo 45°, rosso 90 ° [35].	68
Figura 4.11-Realizzazione Job II	70
Figura 4.12-Analisi dimensionale P1	71
Figura 4.13-Struttura 1 al variare dei parametri di stampa	71
Figura 4.14-Analisi dimensionale P2	72
Figura 4.15-Struttura 2 al variare dei parametri di stampa	72
Figura 4.16-Analisi dimensionale P3	73
Figura 4.17-Struttura 3 al variare dei parametri di stampa	73
Figura 4.18-Analisi dimensionale P4	74

---

Figura 4.19-Struttura 4 al variare dei parametri di stampa.....	74
Figura 4.20-Curve di compressione normalizzate.....	76
Figura 5.1-Geometria provini.....	80
Figura 5.2-Terzo job di stampa.....	81
Figura 5.3-Apparato per test quasi statici di trazione.....	82
Figura 5.4-Apparato per test quasi statici di trazione in temperatura.....	83
Figura 5.5-Split Hopkinson Bar frazionata.....	85
Figura 5.6-Provino interposto tra barra incidente e trasmittente.....	85
Figura 5.7-Approfondimento barra di Hopkinson frazionata.....	86
Figura 5.8-Risultati test di trazione a temperatura ambiente.....	88
Figura 5.9-Risultati test di trazione in temperatura.....	89
Figura 5.10-Influenza della temperatura sulla risposta meccanica del materiale.....	90
Figura 5.11-Valori di strain rate raggiunti durante i test sui provini stampati in direzione X.....	91
Figura 5.12-Risultati test alla barra di Hopkinson per i provini stampati in direzione X.....	92
Figura 5.13-Valori di strain rate raggiunti durante i test sui provini stampati in direzione XZ.....	92
Figura 5.14-Risultati test alla barra di Hopkinson per i provini stampati in direzione XZ.....	93
Figura 5.15-Valori di strain rate raggiunti durante i test sui provini stampati in direzione Z.....	93
Figura 5.16-Risultati test alla barra di Hopkinson per i provini stampati in direzione Z.....	94
Figura 5.17-Influenza dell'orientazione di stampa sulla risposta dinamica alla barra di Hopkinson.....	94
Figura 5.18-Frames del processo di deformazione e rottura dei provini testati alla barra di Hopkinson.....	95
Figura 5.19-Confronto tra test di trazione quasi statico, quasi statico in temperatura e dinamico.....	96
Figura 6.1-Cannone a gas utilizzato per i test balistici.....	99

Figura 6.2-Celle elementari utilizzate: a sx la diamond e a dx la rhombic dodecahedron .....	100
Figura 6.3-Progettazione CAD delle tre diverse tipologie di provino con cella Diamond. ....	101
Figura 6.4-Provini stampati di tipo 1), 2) e 3) con cella Diamond.....	102
Figura 6.5-Risultati analisi dimensionale .....	102
Figura 6.6-Compressione uniassiale su provini di tipo 1 .....	104
Figura 6.7-Confronto test di compressione uniassiale su provini di tipo 1 diamond e rhombic dodecahedron .....	104
Figura 6.8-Compressione uniassiale su provini di tipo 3. ....	105
Figura 6.9-Compressione provino D3 .....	105
Figura 6.10-Confronto compressioni uniassiali tra provini tipo 1 e tipo 3.....	106
Figura 6.11-Livelli di strain rate raggiunti per i provini di tipo R3 .....	107
Figura 6.12-Livelli di strain rate raggiunti per i provini di tipo D3 .....	107
Figura 6.13-Curve stress strain ingegneristici per provini R3.....	108
Figura 6.14- Curve stress strain ingegneristici per provini D3.....	109
Figura 6.15-Paragone curve stress strain tra provini R3 e D3 per il livello di strain rate più alto .....	109
Figura 6.16-Paragone curve stress strain tra provini R3 e D3 per il livello di strain rate più basso .....	110
Figura 6.17-Confronto test di compressione quasi statica e dinamico a $550s^{-1}$ per cella rhombic dodecahedron .....	111
Figura 6.18-Confronto test di compressione quasi statica e dinamico a $550s^{-1}$ per cella diamond.....	111
Figura 6.19-Sequenza frames di schiacciamento dei provini D3 (in alto) e R3 (in basso) .....	112
Figura 6.20-Sequenza frames dello sparo su provini D3 (in alto) e R3 (in basso).....	113
Figura 6.21-Analisi FEM sparo .....	114
Figura 6.22-Confronto test di compressione quasi statici (QS) e dinamici (Dyn) .....	115
Figura 7.1-Discretizzazione cella diamond mediante elementi tridimensionali.....	118
Figura 7.2-Fitting curva di trazione QS- XZ .....	120

Figura 7.3-Modello FEM test di trazione .....	121
Figura 7.4-Risultati simulazione QS .....	122
Figura 7.5-Curve forza-spostamento FEM e sperimentale per test QS.....	123
Figura 7.6-Confronto curva spostamento FEM e sperimentali in tutte e 3 e direzioni di stampa.....	124
Figura 7.7-Inviluppo curva QS-T-XZ .....	125
Figura 7.8- Fitting curva di trazione QS-T- XZ .....	126
Figura 7.9-Curve forza-spostamento FEM e sperimentale per test QS-T .....	127
Figura 7.10-Fitting curva con effetto strain rate sui test sperimentali per i due livelli di strain rate analizzati (L e H). .....	128
Figura 7.11-Confronto dati sperimentali e FEM .....	129
Figura 7.12-Confronto tra i risultati ottenuti mediante l'utilizzo degli elementi B33 e B31. ....	131
Figura 7.13-Tensione di Von Mises ottenuta mediante l'utilizzo di elementi beam B33 .....	132
Figura 7.14-Tensione di Von Mises ottenuta mediante l'utilizzo di elementi beam B31 .....	132
Figura 7.15-Condizioni al contorno modello FEM .....	133
Figura 7.16-Inspessimento sezioni al nodo .....	134
Figura 7.17-Modello FEM provino D1 .....	135
Figura 7.18-Confronto risultati FEM e sperimentali per compressioni quasi-statiche tipo D1 .....	136
Figura 7.19-Confronto intersezione struts per cella diamond (blu) e rhombic dodecahedron (verde).....	137
Figura 7.20-Elementi con sezione maggiore per la cella rhombic dodecahedron.....	137
Figura 7.21-Confronto risultati FEM e sperimentali per compressioni quasi-statiche su cella rhombic dodecahedron.....	138
Figura 7.22- Trasformazione di un reticolo periodico (a) con un continuo equivalente (b)tramite omogeneizzazione e rispettive celle elementari [56].....	139
Figura 7.23-Modello FEM del test balistico.....	141
Figura 7.24-Risultati tipo dei test balistici [57].....	142

Figura 7.25-FEM: Velocità della sfera nel tempo .....	143
Figura 7.26-Confronto frames dell'impatto FEM e sperimentale.....	143
Figura 7.27-FEM: bilancio energetico.....	144
Figura 7.28-FEM: andamento posizione della sfera nel tempo.....	144

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 - Materiali e tecnologie di stampa [12].....	26
Tabella 2.2-Pro e Contro delle tecnologie AM.....	32
Tabella 3.1- Costanti per la stima della densità relativa per cella elementare Rhombic dodecahedron e Diamond .....	47
Tabella 3.2-Celle elementari rigide e loro meccanismo di deformazione .....	49
Tabella 4.1- Composizione chimica nominale delle polveri di acciaio 17-4PH [wt%] .	59
Tabella 4.2-Caratteristiche meccaniche acciaio 17-4PH riportate dal produttore di polveri .....	61
Tabella 4.3-Set di parametri comunemente utilizzati per la stampa di componenti bulk	62
Tabella 4.4-Descrizione strutture del Job I.....	62
Tabella 4.5-Descrizione strutture Job II .....	68
Tabella 4.6-Set di parametri utilizzati nel Job II .....	69
Tabella 4.7-Valori del Contour Offset.....	77
Tabella 5.1-Codifica e descrizione provini per test a trazione quasi statica e temperatura ambiente .....	82
Tabella 5.2- Codifica e descrizione provini per test a trazione quasi statica e in temperatura .....	83
Tabella 5.3-Codifica e descrizione dei provini per test dinamici .....	87
Tabella 6.1-Descrizione e dimensione nominali strutture lattice .....	101
Tabella 6.2-Misure Volume Fraction .....	103
Tabella 6.3-Specifiche spari e risultati .....	113
Tabella 7.1-Costanti ottimizzate su test QS .....	123
Tabella 7.2-Costanti ottimizzate su test QS-T.....	126
Tabella 7.3-Costanti ottimizzate sui test alla barra di Hopkinson.....	129

# Capitolo 1

## Introduzione al Lavoro di Tesi

Nell'ambito dell'ingegneria industriale si riscontra sempre più spesso la necessità di realizzare strutture con un elevato rapporto tra proprietà meccaniche e peso. Con lo sviluppo della Stampa 3D o *Additive Manufacturing (AM)*, di materiali sia polimerici che metallici che ceramici, si è resa possibile la realizzazione di componenti aventi geometria tale da poter soddisfare questa richiesta. I settori che stanno approfittando maggiormente delle opportunità fornite da questa nuova tecnologia sono quello biomedicale, aerospaziale ed automobilistico. In campo biomedicale, ad esempio, la realizzazione di protesi ed innesti ossei e dentali richiede l'utilizzo di metamateriali che abbiano proprietà altamente variabili in funzione del ruolo che svolgono. Nel settore aerospaziale, così come nel motorsport in generale, è invece l'elevato rapporto tra proprietà meccaniche e peso, che si può ottenere attraverso un'adeguata progettazione, a far sì che l'*Additive Manufacturing* sia sempre più di interesse e di utilizzo. Infine, nell'*automotive*, l'utilizzo della Stampa 3D si ascrive principalmente alla possibilità di liberare il progettista da molti dei vincoli legati alle tecnologie produttive tradizionali e dalla possibilità di progettare elementi sacrificali con elevata capacità di assorbimento d'urto, basso peso e che siano capaci di distribuire le forze nelle zone che si ritengono più adeguate per la sicurezza dei passeggeri. In tutti questi ambiti, l'utilizzo di strutture cellulari (*Lattice Structures*) va incontro alle esigenze descritte, proponendosi come soluzione, di non facile implementazione, in tutti quei casi in cui le proprietà meccaniche specifiche o la necessità di avere proprietà *ad hoc* la fanno da padrone.

## 1.1 Definizione del problema

L'utilizzo di strutture cellulari (*Lattice Structures*) va incontro alle esigenze sempre maggiori di realizzare componenti caratterizzati dall'elevato rapporto tra proprietà meccaniche e peso o con proprietà meccanica non ottenibili utilizzando i materiali tradizionali. Nella progettazione delle strutture lattice gli ingombri potrebbero essere dettati da vincoli di assemblaggio mentre la scelta del materiale, da vincoli di resistenza alla corrosione o di interazione con l'ambiente circostante. In questo caso la cella elementare e la densità relativa con cui realizzare la struttura resterebbero libera scelta del progettista, dandogli quindi controllo sulla variazione delle proprietà meccaniche del componente in un ampio range. La forte complessità geometrica, intrinseca nelle strutture lattice, rende la loro realizzazione particolarmente complessa anche per le tecnologie *AM*. Inoltre, è ben noto che i componenti stampati con tecnologie additive (come la SLM) mostrino proprietà meccaniche variabili in funzione dell'orientazione di stampa [1–4]. Ad oggi, non esistono tecniche di progettazione normate né tantomeno linee guida generali per la produzione di componenti *AM*. I software più utilizzati per la progettazione di strutture lattice non tengono conto di come la tecnologia *AM* influenzi in maniera non trascurabile la risposta meccanica dei solidi cellulari, rendendo così queste strutture molto poco impiegate in ambito industriale nonostante le grandi opportunità che offrono.

## 1.2 Approccio e procedura utilizzati

L'obiettivo di questa attività di ricerca è quello di approfondire il comportamento delle strutture lattice, caratterizzando nello specifico quelle stampate in 17-4PH, di sviluppare una linea guida per la loro progettazione che possa portare a ritenerle affidabili e di sviluppare modelli FEM che possano essere utilizzati non solo per verificare e confermare determinate proprietà delle *lattice* ma anche per prevederne la risposta.

Per raggiungere questo obiettivo sono stati approfonditi sia il comportamento del materiale stampato che l'influenza dei parametri di stampa sulla risposta delle strutture lattice in 17-4PH. Attraverso una campagna sperimentale si sono caratterizzate le proprietà delle strutture lattice sia in regime quasi-statico che dinamico. Sulla base dei risultati ottenuti dalla campagna sperimentale si è sviluppato un modello agli elementi

finiti che permettesse di replicare il comportamento della struttura in esame, utilizzandolo poi per calcolare le rimanenti proprietà non ottenute sperimentalmente estendendo la conoscenza sul metamateriale in esame. Queste proprietà sono state utilizzate per costruire un modello ben più complesso, validato valutandone la sua convergenza con i risultati ottenuti da test balistici. Il test balistico sottopone la struttura indagata ad uno stato tensionale multiassiale, con un forte effetto strain rate e temperatura. Il confronto tra i risultati ottenuti al FEM e quelli sperimentali, data la complessità del fenomeno, è stato utilizzato per validare il lavoro svolto, confermando che l'iter progettuale proposto sia valido e quindi applicabile non solo a casi di interesse scientifico ma bensì anche a quelli di interesse industriale.

Applicando la metodologia proposta, conoscendo le proprietà del materiale stampato, con soli pochi test di compressione si potrebbero simulare in maniera affidabile fenomeni anche molto complessi.

### 1.3 Organizzazione del lavoro

Il lavoro può essere complessivamente suddiviso in quattro macroaree:

- 1) Scelta dei parametri di stampa;
- 2) Caratterizzazione del materiale base;
- 3) Caratterizzazione in compressione del comportamento delle strutture lattice;
- 4) Sviluppo modelli FEM.

Nella prima fase è stata studiata l'influenza dei parametri di processo sulla stampabilità e sulla risposta meccanica delle strutture lattice. È stato così individuato il set di parametri ritenuto ottimo per realizzare le strutture cellulari di interesse (Capitolo 4), utilizzato poi per realizzare la produzione di provini *bulk* per la caratterizzazione del materiale base ottenuto per SLM (Capitolo 5).

È stata condotta una variegata campagna di sperimentazione su strutture lattice con cella *Diamond* e *Rhombic Dodecahedron* in 17-4PH (Capitolo 6) ed i risultati ottenuti sono stati utilizzati per sviluppare i modelli FEM proposti (Capitolo 7).

# Capitolo 2

## Additive Manufacturing

In questo capitolo si è fornita una panoramica sul mondo della Stampa 3D, partendo dalla sua storia fino ad arrivare ai possibili sviluppi futuri. Sono state inoltre descritte le varie tipologie di processi tecnologici e materiali utilizzabili. Inoltre, è stato analizzato il contesto economico e come questa nuova tecnologia stia diventando via via sempre di maggiore interesse in Italia e nel mondo.

### 2.1 Storia della Stampa 3D

La nascita ufficiale dell'Additive Manufacturing risale al 1982, quando l'Ing. Chuck Hull ideò la stereolitografia. Questo era un processo attraverso il quale, utilizzando un laser, veniva solidificato un sottile strato di un liquido polimerico fotosensibile. La SLA-1 è stato il primo apparato *AM* commercializzato (SLA è l'acronimo di StereoLithography Apparatus) ed è stato sviluppato nel 1987 dalla 3D System, fondata dallo stesso Chuck Hull [5].

Nel 1986 Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase (e altri ricercatori), studiando la stereolitografia, idearono la Selective Laser Sintering, un processo simile a quello in precedenza scoperto, ma il fotopolimero liquido è sostituito da un termoplastico in polvere [6].

Nel 1988 Scott Crump brevettò la Fused Deposition Modeling (FDM), tecnologia che consiste nell'estrudere un filo di materiale termoplastico contenuto in una bobina attraverso un ugello portato ad alta temperatura. L'ugello muovendosi prima nel piano e spostandosi poi

verso l'alto permette la stratificazione del materiale, realizzando così la geometria tridimensionale.

Nel 1991 furono commercializzate tre tecnologie AM tra cui: FDM da Stratasys, Solid Ground Curing (SGC) from Cubital, and Laminated Object Manufacturing (LOM) from Helisys.

Nel 1995, per la prima volta si fusero polveri di metallo per realizzare oggetti tridimensionali con una densità paragonabile a quella ottenibile mediante le tecnologie tradizionali. Tale risultato fu possibile attraverso la tecnica del Selective Laser Melting, sviluppata dai tedeschi del Fraunhofer Institute.

Nel 2002 venne sviluppato l'Electron Beam Melting, tecnologia che utilizzando un fascio di elettroni, opportunamente focalizzato e accelerato, permettere prima di fondere e poi raffreddandosi, di solidificare uno strato di polvere metallica.

## 2.2 Manifattura Sottrattiva ed Additiva

La tecnologia *AM* è una tecnica produttiva attraverso la quale, aggiungendo materiale strato dopo strato, vengono generati oggetti tridimensionali (semilavorati o prodotti finiti). Questa tecnologia si contrappone alle cosiddette tecnologie tradizionali, le quali consentono la produzioni di componenti attraverso la rimozione di materiale dal pieno (tornitura, fresatura, foratura ecc.) [7]. Lo sviluppo delle tecnologie additive è stato veicolato anche dalla forte crescita dei settori digitale ed informatico che ha permesso la comunicazione tra macchinari e computer attraverso un rapido ed efficiente scambio di dati. L'AM ha portato un'innovazione radicale nel settore manifatturiero portando cambiamenti in ambito socioeconomico oltre che tecnico: ci si è svincolati dai limiti geometrici ottenibili tramite le tecnologie tradizionali; è cambiata la gestione delle scorte in magazzino e quindi della logistica in generale; si è data la possibilità di andare incontro ad un mercato che richiede sempre più la personalizzazione del prodotto; è cambiata l'organizzazione della produzione; si sono richieste quindi nuove figure professionali nel campo della manifattura e dell'artigianato e si è dato nuovo spazio all'azione creativa dei singoli cittadini. Gli aspetti tecnici e gestionali hanno fatto sì che le tecnologie AM trovino il loro maggiore impiego nei seguenti casi [7,8]:

- produzioni in cui è la tecnologia migliore, cioè quando permette di abbattere i costi e realizzare oggetti con caratteristiche tecniche migliorate per ottenere standard qualitativi unici, non raggiungibili con tecniche tradizionali;
- produzioni in cui la tecnologia è competitiva in termini di costi solo se si modifica il design dell'oggetto che deve essere realizzato. Le modifiche al design consentono di massimizzare le potenzialità dell'AM senza compromettere (o migliorare) le caratteristiche tecniche dell'oggetto;
- produzioni dove la tecnologia non è competitiva in termini assoluti ma può essere economicamente vantaggiosa perché: i) il pezzo stampato in 3D è più costoso, ma l' AM (per la sua flessibilità, la velocità di produzione senza bisogno di stampi o altre attrezzature) permette di "immagazzinare" file al posto dei prodotti, riducendo così il capitale vincolato a magazzino e costi delle scorte; ii) l' AM può consentire di resistere alla mancanza improvvisa e imprevista di componenti per la produzione in linea; iii) l' AM consente la riprogettazione costruttiva di pezzi più efficienti (e più costosi) che aiutano ad aumentare la produttività degli impianti industriali esistenti.

I settori oggi maggiormente coinvolti sono, oltre alla prototipazione in genere, l'aerospaziale, l'automotive, il biomedicale, il packaging ed infine, ma non meno importante, la gioielleria.

Gianni Potti scrive nel libro “Fabbrica 4.0, la rivoluzione della manifattura digitale”[9,10]:

*“Oggi è in corso la quarta rivoluzione industriale: dall'inizio del 21° secolo, stiamo vivendo una trasformazione digitale - cambiamenti associati con l'innovazione nel campo della tecnologia digitale in tutti gli aspetti della società e dell'economia...*

*Tuttavia, mentre alcune aree vedranno veloci e dirimpenti modifiche, altre cambieranno*

---

*lentamente e costantemente. Un altro passo "evolutivo". In entrambi i casi, quel che è certo, è che non si torna indietro! Si va verso il cosiddetto the new normal, ovvero questo è già il nuovo mondo. I nostalgici del passato sono serviti. In questa nuova evoluzione, gli oggetti fisici sono perfettamente integrati nella rete delle informazioni. Internet si combinerà sempre più con le macchine intelligenti, processi produttivi e processi per formare una sofisticata rete. Il mondo reale si sta trasformando in un enorme sistema di informazioni."*

In questo nuovo mondo il manifatturiero ha un ruolo importante in quanto è il motore principale della crescita economica perché genera guadagni di produttività che poi si diffondono, attraverso i beni che produce, tra gli altri settori; crea posti di lavoro qualificati e meglio retribuiti; fa parte della ricerca e dell'innovazione, apportando benefici a tutto il sistema attraverso nuovi contenuti innovativi di manufatti utilizzati dagli altri settori (Paolazzi, 2015, Direttore Centro Studi Confindustria) [11].

Gli sviluppi tecnologici, insieme a quelli della produzione, consentono a prodotti e macchine di comunicare tra loro e scambiarsi comandi in modalità wireless, direttamente o tramite l'*Internet of Things*. Il risultato è un ambiente di produzione molto più flessibile, con un controllo meno centrale e un'intelligenza più integrata a livello locale nelle apparecchiature, in grado di ottimizzare l'efficienza della lavorazione.

In questo scenario produttivo si innesta la sfida strategica delle aziende che puntano a far parte del futuro della manifattura europea e cioè capire come pianificare i percorsi di sviluppo che favoriscano il progresso tecnologico nei sistemi produttivi, basandosi sulla diffusione delle tecnologie chiave di questa nuova Rivoluzione industriale nella sua struttura produttiva.

## 2.3 Il processo

Sebbene con il termine Additive Manufacturing si intenda una molteplicità di tecnologie produttive che verranno discusse in seguito, tutte seguono una procedura generica che accompagna il prodotto dalla fase di progettazione alla sua realizzazione. Deloitte raggruppa in 5 fasi il processo per la produzione additiva come mostrato nella Figura 2.1[12].

1. Progettazione CAD: il primo step per la realizzazione di un componente mediante tecnologia additiva è la realizzazione del modello 3D o modello CAD (Computer Aided Design). La scelta del materiale potrebbe essere definita in questo step, ma non è strettamente necessario.
2. File .stl : il passaggio successivo consiste nel convertire il modello CAD nel formato .stl. L'estensione .stl sta per (STereo Lithography interface format o acronimo di "Standard Triangulation Language" o in alternativa "Standard Tassellation Language") ed è un formato di file, binario o ASCII, nato per i software di stereolitografia CAD. È utilizzato nella prototipazione rapida (rapid prototyping) attraverso software CAD. Un file .stl rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli. Esso consiste delle coordinate X, Y e Z ripetute per ciascuno dei tre vertici di ciascun triangolo, con un vettore per descrivere l'orientazione della normale alla superficie. Il formato STL presenta dei vantaggi quali la semplicità, in quanto risulta molto facile da generare e da processare, mentre a suo sfavore presenta una geometria approssimata e la sua struttura dati, che pur risultando semplice, può presentare la ripetizione dello stesso vertice più volte.
3. Slicing: la fase di slicing consiste nell'acquisizione delle informazioni contenute nel file .stl per poi suddividere la geometria tridimensionale (l'oggetto che si vuole realizzare ) in fette (*slices*) di spessore opportuno. Come già accennato in

precedenza, con il termine Additive Manufacturing si intende proprio il processo produttivo che realizza la geometria desiderata mediante la sovrapposizione di sottili strati di materiale. Questa fase è di cruciale importanza in quanto è qui che si decidono l'orientazione del pezzo da stampare ed i parametri tecnologici con cui farlo.

4. Produzione del componente: il file contenete le informazioni generate nella fase di slicing viene fornito all'apparato AM il quale, dopo aver deciso il materiale con cui realizzare la parte, si occupa della sua effettiva produzione.
  
5. Post processing: l'ultimo step del processo produttivo è quello relativo alla fase di post processing. Dopo che la parte è stata stampata ci sono diverse tipologie di trattamenti che si possono realizzare sul componente: i) superficiali; ii) realizzazione di specifiche features; iii) trattamenti termici. Quali tra questi deve essere effettuato dipende tanto dal progetto che si sta seguendo quanto dalle caratteristiche del materiale che si è utilizzato e dalla specifica tecnologia AM adoperata.

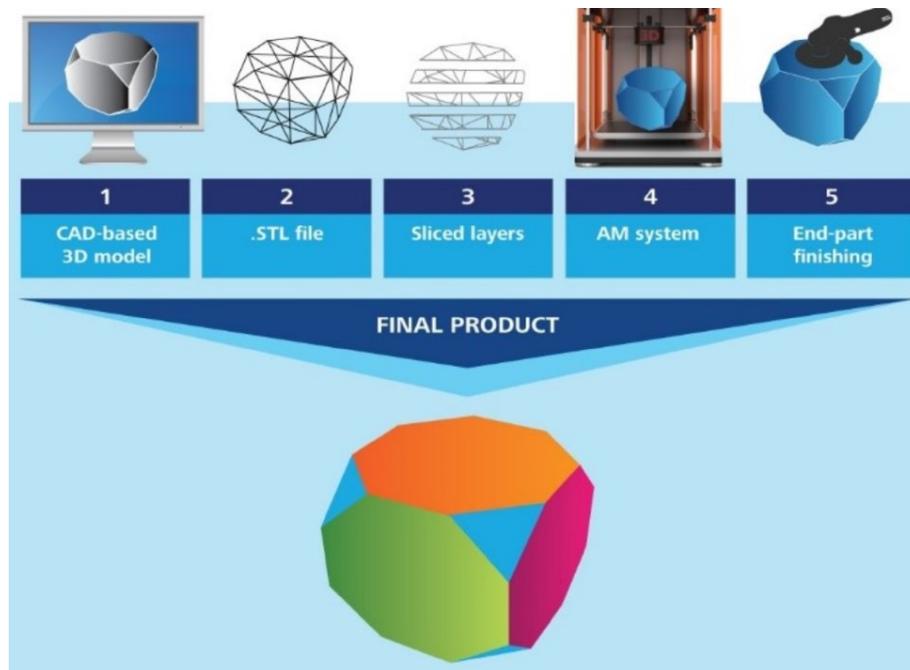


Figura 2.1 - I 5 step dell' Additive Manufacturing [12]

## 2.4 Tecnologie Produttive & Materiali

Tra le tecnologie AM ad oggi più utilizzate nell'ambito industriale c'è sicuramente la PBF (Power Bed Fusione). Questi apparati si basano sul concetto di focalizzare energia termica direttamente su di un'area scelta, fondendo le polveri del materiale scelto e legandole insieme. Oltre alla PBF, esistono altre 6 macrocategorie di tecnologie AM per un totale quindi di 7. Alcune di queste hanno delle sottocategorie con peculiarità differenti, ma ascrivibili sempre alla stessa tecnologia di base[13]:

1. Power Bed Fusion (PBF): questo metodo di produzione additiva utilizza un laser o un fascio di elettroni per fondere e legare insieme polvere di materiale. Dopo aver scansionato selettivamente uno strato di polveri, uno nuovo ne viene steso sul precedente dal roller, scansionandolo di nuovo con il laser lì dove serve. In questa seconda fase è importante che le polveri colpite, fondendo e successivamente solidificando, leghino sia con le polveri adiacenti nel piano che con gli strati sottostanti, creando la continuità metallurgica. Le tecnologie PBF

più comuni ed utilizzate sono la Electron Beam Melting (EBM), Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS), e la Direct Metal Laser Sintering (DMLS). In Figura 2.2 è riportato lo schema generico di funzionamento di un apparato PBF.

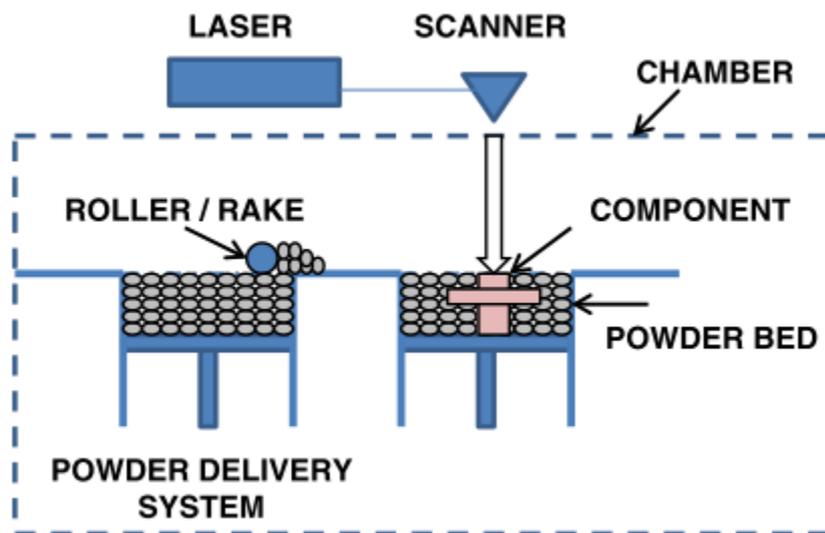


Figura 2.2 - Schema generale di un apparato PBF

2. Directed Energy Deposition (DED): la tecnica DED consiste nella fusione del materiale di apporto (polvere o filo) tramite una fonte di energia focalizzata in una regione definita. La fonte di energia fonde contemporaneamente parte della polvere depositata e il substrato, generalmente costituito da un materiale simile a quello in costruzione[14]. In Figura 2.3 è riportato lo schema generale di un apparato DED.

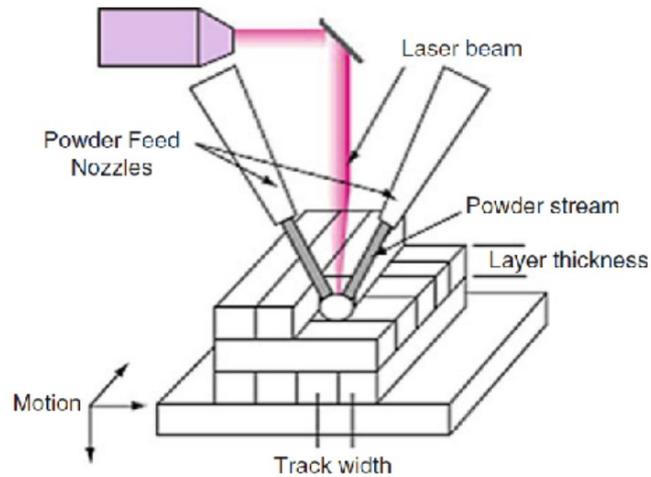


Figura 2.3 - Rappresentazione schematica apparato DED [15]

3. VAT Polymerization: questa tecnologia usa una sorgente di energia per la polimerizzazione selettiva di un sottile profilo di resina strato dopo strato. A seconda che della sorgente possiamo avere diversi processi produttivi, tra i quali i più famosi sono: Stereolitografia laser; Stereolitografia DLP(tramite proiettori); Stereolitografia LCD(tramite schermi LCD retroilluminati).In Figura 2.4 è riportato come esempio lo schema generale di un apparato con sorgente laser.

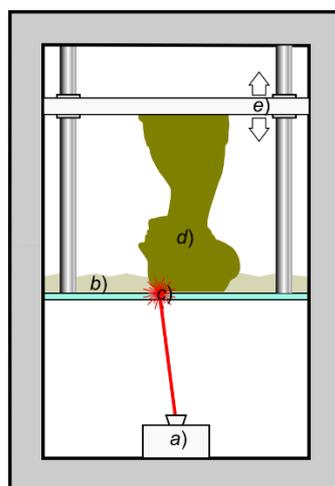


Figura 2.4- Schema generale di un apparato di fotopolimerizzazione laser.

4. Sheet Lamination : la Sheet Lamination è una metodologia di produzione additiva (AM) in cui sottili fogli di materiale (solitamente forniti tramite un sistema di rulli di alimentazione) vengono uniti insieme strato per strato, spesso attraverso saldatura ultrasonica, per formare un unico pezzo che viene tagliato in un oggetto 3D. La produzione di oggetti laminati (LOM) e il consolidamento ad ultrasuoni (UC) sono entrambi esempi di tecniche di Sheet Lamination. Sono quasi sempre richieste operazioni di post processing e finitura superficiale. Figura 2.5 è riportato lo schema di un apparato LOM.

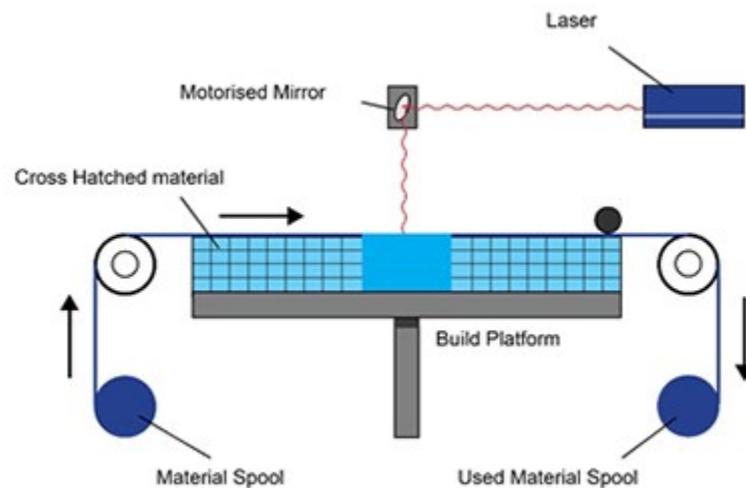


Figura 2.5 - Schema generale apparato di Sheet Lamination

5. Binder Jetting: come anche per altri casi esaminati, con il termine Binder Jetting si intendono diverse tipologie di processi produttivi. Questa famiglia di processi AM è molto simile a quella PBF ma a differenza di questa non è usata una sorgente esterna per fondere il materiale in polvere. La tecnologia sfrutta un letto di polveri, simile a quello impiegato dalle tecnologie SLS, SLM ed EBM che vengono distribuite su un piano di stampa tramite una spatola o un rullo in uno spessore variabile, che ne determina la risoluzione di stampa nella direzione "Z". Tramite una testa a getto, simile a quella utilizzata nelle comuni stampanti ink-jet, vengono rilasciate minuscole gocce di materiale legante, che ne determina la risoluzione

sul piano X-Y, che hanno la funzione di legare le particelle di polvere. Alla fine di questo processo il piano di stampa si abbassa, viene rilasciato un altro strato di polvere sul quale viene stampato un nuovo *layer*. Il processo viene reiterato fino alla deposizione di tutti gli strati necessari a realizzare l'oggetto. In Figura 2.6 è riportato lo schema generale di apparato per Binder Jetting.

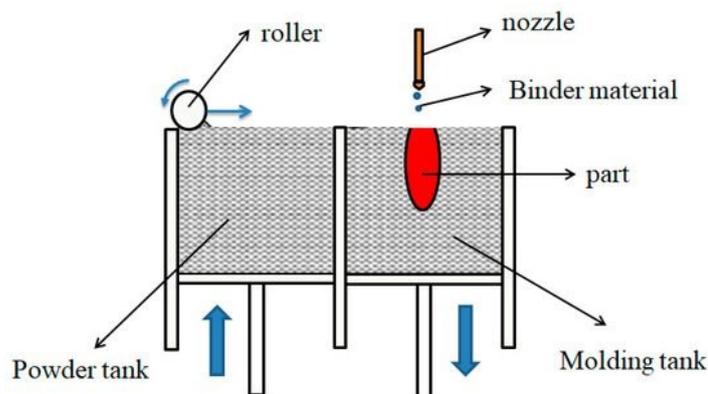


Figura 2.6 - Schema generale apparato di Binder Jetting

6. Material Jetting – questa tecnologia consiste nel depositare un fotopolimero liquido sul substrato o sui layer precedentemente stampati mentre una luce ultravioletta ne provoca la solidificazione. La luce ed il materiale si muovono simultaneamente in modo da provocare la cura istantanea del fotopolimero. In Figura 2.7 lo schema esplicativo dell'apparato descritto.

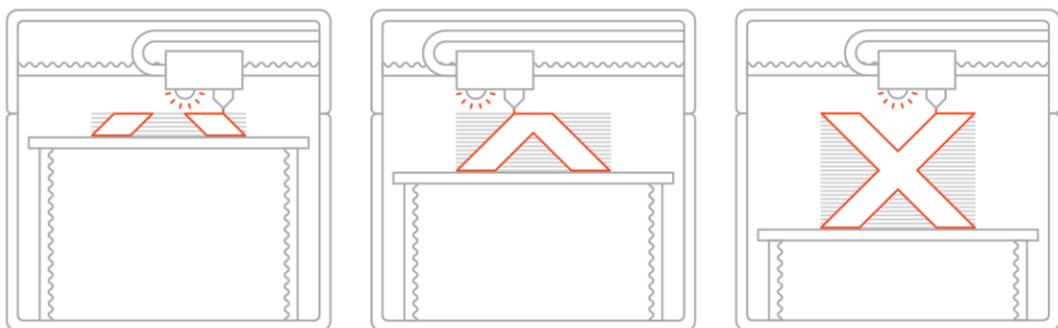


Figura 2.7 - Schema generale apparato di Material Jetting

7. **Material Extrusion:** questa è una delle tecnologie più diffuse di *AM* che prevede l'estrusione del materiale attraverso un ugello portato ad alta temperatura. Il materiale, attraversando l'ugello, viene fuso e depositato sul piano XY "disegnando" il profilo desiderato. Una volta terminata questa fase, l'ugello si sposta verso l'alto e deposita un nuovo layer. Il processo più comune di questa categoria è certamente quello FDM (Fusion Deposition Modeling) che grazie alla sua semplicità di utilizzo ed economicità delle macchine lo rende il più utilizzato nel mondo dell'hobbistica privata. In Figura 2.8 è riportato lo schema di stampa per un processo FDM.

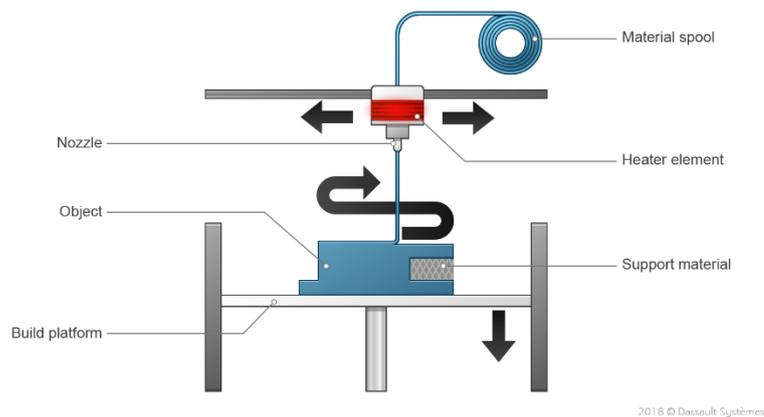


Figura 2.8 - Schema generale apparato FDM

Per ognuna delle 7 macrocategorie descritte ci possono essere differenti materiali compatibili per la realizzazione delle stampa 3D. I materiali di più comune impiego sono certamente le plastiche e i polimeri in generale. Negli ultimi anni, il forte sviluppo tecnologico ha fatto sì che anche i materiali metallici e ceramici diventassero di interesse nel mondo AM. In Tabella 2.1 sono riportati i differenti materiali utilizzabili relativamente ad i vari processi tecnologici descritti.

Technology	Polymers	Metals	Ceramics	Composites
Stereolithography	●			●
Digital light processing	●			
Multi-jet modeling (MJM)	●			●
Fused deposition modeling	●			
Electron beam melting		●		
Selective laser sintering	●	●	●	●
Selective heat sintering	●			
Direct metal laser sintering		●		
Powder bed and inkjet head printing <sup>13</sup>	●	●	●	●
Plaster-based 3D printing			●	●
Laminated object manufacturing <sup>14</sup>	●	●	●	●
Ultrasonic consolidation		●		
Laser metal deposition		●		●

Tabella 2.1 - Materiali e tecnologie di stampa [12].

## 2.5 Aspetti Economici

Il primo grande cambiamento che l'AM sta apportando all'economia è dovuto al fatto che ha un impatto sulla produzione riducendo il Minimum Efficient Scale (MES), cioè il punto in cui il costo medio di ciascuna unità di produzione è ridotto al minimo. Dove il MES è alto (cioè, dove sono necessari grandi costi di capitale per avviare la produzione) il numero di impianti di produzione sarà piccolo. In alcuni casi, l'AM può consentire ai consumatori di soddisfare le loro esigenze individuali senza i significativi investimenti in manodopera o capitale richiesti in precedenza. La ricerca supporta questa conclusione. Numerosi studi economici dimostrano che il MES per le tecnologie AM può essere raggiunta a volumi unitari bassi, a partire da uno. Questa prestazione in termini di costi contrasta con quella dei metodi di produzione tradizionali che devono affrontare costi iniziali più elevati per l'attrezzatura e la configurazione [16,17].

L'impatto delle tecnologie AM sull'economia di scopo può superare il loro cattivo rendimento in termini di economia di scala. Infatti, l'AM è nota per essere estremamente versatile nella sua capacità di produrre diverse configurazioni di prodotto con tempi e costi di cambio ridotti[18]. L'economia di scopo si riferisce alla flessibilità intrinseca di un'unità di capitale. In particolare, le economie di scopo offrono vantaggi consentendo la produzione di più prodotti finali diversi utilizzando le stesse attrezzature, materiali e

---

processi. In molti casi, non sono necessarie modifiche agli strumenti per spostare il dispositivo AM dalla produzione di un oggetto alla produzione ad un altro completamente diverso (cioè, l' AM potrebbe produrre in sequenza una spada e poi un vomere senza alterare l'attrezzatura di produzione) [16,17]. L'implicazione dei cambiamenti alle economie di scala e di scopo che l'AM ha apportato, è che i produttori possono essere in grado di produrre prodotti con costi di capitale notevolmente inferiori. Queste conclusioni hanno implicazioni pratiche dirette per i manager. In sostanza, consente loro di valutare l'applicabilità dell'AM alle loro operazioni inquadrando la scelta in relazione al suo impatto sulla catena di fornitura di un'azienda e / o sui suoi prodotti. In altre parole, le aziende possono utilizzare l'AM per riconsiderare il modo in cui spostano i prodotti attraverso le loro catene di approvvigionamento e possono utilizzare queste tecnologie per creare nuovi prodotti o riprogettare i processi per realizzare prodotti già esistenti [19].

In Figura 2.9 è riportato ad esempio un grafico di confronto fra i costi produttivi con AM e tecnologie tradizionali in funzione della quantità di parti prodotte[20]. La figura illustra un insieme di curve di costo per AM e metodi di produzione tradizionali tratti da studi esistenti. Le curve dei costi illustrano la variazione del costo medio per ciascuna unità incrementale di produzione. Il punto di pareggio tra due approcci di produzione alternativi si verifica quando queste curve si incrociano. La Figura 2.9 illustra il raggiungimento del MES (Minimum Efficient Scale) per la produzione AM, in questo caso, a un'unità. In sostanza, la curva del costo medio è piatta, suggerendo che il costo marginale non cambia con il volume. Metodi di produzione più tradizionali possono ancora offrire vantaggi in termini di costi a volumi più elevati, come suggerito dalla curva dei costi in calo. La ricerca conclude che la produzione AM, utilizzando una varietà di materiali, può fornire un'alternativa efficiente per cicli di produzione di piccole e medie dimensioni [16,19].

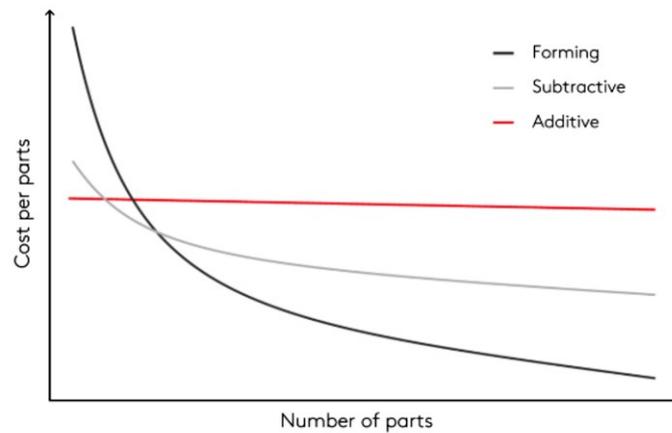


Figura 2.9 - Economia di scala e tecnologie produttive

### 2.5.1 Benefici e costi dell'Additive Manufacturing

I costi di produzione possono essere classificati in due modi[21]. Il primo coinvolge quei costi che sono "well-structured" come la manodopera, il materiale e i costi della macchina, mentre il secondo comporta costi "ill-structured" come quelli associati a errori di costruzione, configurazione della macchina e magazzino. In letteratura, si tende a concentrarsi maggiormente su quelli ben strutturati dell'AM rispetto ai mal strutturati; tuttavia, alcuni dei vantaggi più significativi e dei risparmi sui costi nell'AM possono essere nascosti in quelli mal strutturati. Inoltre, potrebbe essere utile considerare l'AM nel contesto della lean production.

Un concetto chiave della produzione snella è l'identificazione dei rifiuti, classificati in sette categorie:

- 1) Sovrapproduzione: si verifica quando si produce di più di quanto attualmente richiesto dai clienti;
- 2) Trasporto: il trasporto non apporta alcuna modifica al prodotto ed è fonte di rischio per il prodotto;
- 3) Rilavorazione / Difetti: i difetti scartati comportano uno spreco di risorse o costi aggiuntivi per la correzione del difetto;

- 4) Elaborazione eccessiva: si verifica quando viene svolto più lavoro del necessario;
- 5) Movimento: il movimento non necessario si traduce in un inutile dispendio di tempo e risorse;
- 6) Magazzino: è simile a quello della sovrapproduzione e comporta la necessità di ulteriore movimentazione, spazio, persone e scartoffie per gestire il prodotto aggiuntivo;
- 7) Attesa: quando i lavoratori e le attrezzature sono in attesa di materiale e parti, queste risorse vengono sprecate.

La produzione additiva può influire su un numero significativo di queste categorie. Ad esempio, può ridurre significativamente la necessità di grandi scorte, che è un costo significativo nella produzione. Nel 2011, era stata stimata una media di \$ 208 miliardi (o l'equivalente del 14% del fatturato annuo) detenuto in magazzino per la produzione a media e alta tecnologia con un costo stimato di \$ 52 miliardi (o il 3% del fatturato). La riduzione delle scorte libera il capitale e riduce le spese[22]. Inoltre, per cercare di comprendere i vantaggi e gli svantaggi dell'adozione dell'AM, il magazzino e il trasporto sono due fattori importanti. All'inizio del 2011, c'erano 537 miliardi di dollari di scorte nell'industria manifatturiera italiana, pari al 10% delle entrate di quell'anno. Le risorse spese per produrre e conservare questi prodotti avrebbero potuto essere utilizzate altrove se le necessità di magazzino fossero state ridotte. I fornitori spesso soffrono di elevati costi di stoccaggio e distribuzione. La produzione additiva offre la possibilità di produrre parti su richiesta. Ad esempio, nell'industria dei pezzi di ricambio, un tipo specifico di parte viene ordinato di rado; tuttavia, quando viene ordinato, è necessario abbastanza rapidamente, poiché i macchinari e le attrezzature inattivi in attesa di parti sono piuttosto costosi[8]. Essere in grado di produrre queste parti su richiesta utilizzando le tecnologie AM riduce la necessità di mantenere un ampio inventario e ne elimina i costi associati. Per quanto riguarda il trasporto, l'Additive Manufacturing consente la produzione di più parti contemporaneamente nello stesso luogo, rendendo possibile la realizzazione di un intero prodotto. La produzione tradizionale spesso include la produzione di parti in più sedi, dove potrebbero essere presenti svariate scorte di ognuna di esse.

---

L'AM può anche portare alcuni cambiamenti nella supply chain (catena di approvvigionamento): questa include acquisti, operazioni, distribuzione e integrazione. L'acquisto implica l'approvvigionamento da fornitori di prodotti. La riduzione della necessità di queste attività può comportare una riduzione dei costi. Alcune grandi aziende e rivenditori devono in gran parte del loro successo alla gestione efficace della loro catena di approvvigionamento. La loro capacità di sfruttare la tecnologia per innovare il modo in cui tracciare il magazzino e rifornire gli scaffali, ha portato loro una conseguente riduzione dei costi. La produzione additiva può avere impatti significativi sulla supply chain della produzione, riducendone la necessità di gestione. Questa tecnologia ha il potenziale per avvicinare i produttori ai consumatori, riducendo gli anelli nella catena di approvvigionamento [22]. Inoltre, sempre Douglas e Stanley (2014) in [22] sostengono che se l'AM riduce il numero di anelli nella catena di fornitura e avvicina la produzione ai consumatori, questo porterà una riduzione della vulnerabilità a disastri e interruzioni di produzione. Confrontando la produzione tradizionale con l'AM, si può vedere che nella prima, i fornitori di risorse materiali consegnano ai produttori di parti e componenti, che potrebbero consegnare parti e componenti l'uno all'altro e quindi a un impianto di assemblaggio. Da lì il prodotto assemblato viene consegnato a un rivenditore o distributore. Un'interruzione in uno qualsiasi dei punti della produzione o dell'assemblaggio può comportare l'interruzione delle consegne a tutti i rivenditori o distributori se non c'è ridondanza nel sistema. La produzione additiva con produzione localizzata non presenta la stessa vulnerabilità. In primo luogo, potrebbe non esserci alcun assemblaggio di parti o componenti; in secondo luogo, un'interruzione della produzione non ha alcun impatto sui rivenditori ed i distributori.

Altro aspetto fondamentale è che fornendo libertà geometrica, l'AM consente di realizzare prodotti utilizzando meno materiale ma mantenendo le prestazioni necessarie. I prodotti possono essere realizzati rispettando gli standard qualitativi strettamente necessari piuttosto che superare spesso sensibilmente il livello di prestazioni necessario. Attualmente, tuttavia, il prezzo dei materiali di base da utilizzare in processi AM può spesso superare quelli della produzione tradizionale.

Come discusso in precedenza, il metallo e la plastica sono i materiali primari utilizzati per questa tecnologia. Nel lavoro [23] viene mostrato che il costo del solo materiale

---

necessario per la realizzazione di un componente metallico realizzato con leghe di alluminio, era di € 2,59 per parte utilizzando la produzione tradizionale e € 25,81 per parte utilizzando la sinterizzazione laser selettiva; quindi, il materiale per la produzione additiva era quasi dieci volte più costoso. I costi dei materiali per l'AM sono significativi; tuttavia, le tecnologie possono spesso essere complementari, adottandole l'una accanto all'altra e massimizzandone i vantaggi. Oltre al costo dei materiali, il costo della macchina è uno di quelli più significativi coinvolti nell'AM. Il prezzo medio di vendita di un sistema AM industriale è stato di \$ 73.220 nel 2011 come scritto in uno dei report annuali più importanti del settore (Wohlers Report, 2012); inoltre permangono grandi differenze tra i costi per i sistemi per lavorare polimeri e metalli.

Anche il tempo di produzione è una componente significativa per quanto riguarda la stima del costo di componenti realizzati in AM. Ci sono due approcci alla stima del tempo di costruzione: il primo è l'analisi dettagliata e il secondo è l'analisi parametrica. L'analisi dettagliata utilizza la conoscenza del funzionamento interno di un sistema, mentre l'analisi parametrica utilizza le informazioni sul tempo di processo e sulle sue caratteristiche, come lo spessore dello strato. Le stime dei tempi di realizzazione tendono ad essere variabili in funzione della tecnologia AM considerata e del materiale utilizzato.

Infine, tra i fattori che potrebbero influenzare i costi e i benefici dell'AM vi sono il consumo di energia e la manodopera. Il consumo di energia è un fattore importante nel considerare il costo dell'AM rispetto ad altri metodi di produzione, focalizzandosi soprattutto sull'analisi dei costi del componente realizzato in AM dalla A alla Z. Di solito nel considerare questa voce di costo si tende a tenere conto solamente di quello di funzionamento della stampante e di finitura finale. Per quanto riguarda la manodopera, questa tende ad essere solo una piccola parte del costo complessivo. La manodopera potrebbe includere la rimozione del prodotto finito o il riempimento della materia prima. Ruffo et al. (2006) in [16] stimano il costo della manodopera tra il 2% e il 3% di quello complessivo. È importante notare che la manodopera aggiuntiva è incorporata negli altri costi come il costo del materiale e il costo della macchina, poiché anche questi articoli richiedono manodopera per la produzione. La Tabella 2.2 riassume i principali vantaggi e costi dell'AM discussi sopra.

<b>PRO</b>	<b>CONTRO</b>
<b>Complessità geometrica realizzabile</b>	<b>Autoproduzione: rischio per l'industria manifatturiera</b>
<b>Personalizzazione del prodotto</b>	<b>Costi elevati di acquisto di impianti professionali</b>
<b>Riduzione costi di produzione:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niente più linee di produzione</li> <li>• Riduzione degli sprechi</li> </ul> Magazzino ridotto	<b>Costo elevato della materia prima</b>
<b>Capacità di produrre meccanismi già assemblati:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Riduzione dei costi di assemblaggio</li> </ul>	<b>Tempi di produzione lunghi con bassi volumi realizzabili</b>
<b>Economia di scopo</b>	<b>Nessuna economia di scala</b>
<b>Riduzione dell'impatto ambientale:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sprechi ridotti</li> <li>• Riduzione del peso dei componenti</li> </ul>	<b>Controllo qualità più complesso e non standardizzato</b>

Tabella 2.2-Pro e Contro delle tecnologie AM

## 2.6 Interesse per l'Additive Manufacturing

Nonostante la stampa 3D sia nata negli anni '80 con Chuck Hull, che ne è considerato il padre, questa tecnologia viene vista come estremamente innovativa e recente. Questo accade perché è stato solo negli ultimi anni, con lo sviluppo dell'informatica e della digitalizzazione, che l'AM si è proposto come reale alternativa alle tecnologie produttive tradizionali. Per avere un'idea di quanto sia aumentato l'interesse per la manifattura additiva viene proposto un grafico ricavato con "google trends" che normalizza rispetto a 100 il numero di ricerche effettuate su uno specifico argomento. Se pur approssimativo come metodo di analisi, quanto mostrato rende pienamente l'idea di quanto negli ultimi anni sia aumentato l'interesse per questo settore. In Figura 2.10 è riportato il grafico relativo alle ricerche effettuate nel mondo con il termine *3D Printing* mentre, in Figura 2.11, è riportato lo stesso grafico a confronto, ad esempio, con il termine *milling* (fresatura). Da queste due figure si riesce a capire chiaramente che la stampa 3d suscita

sempre più interesse nel mondo e di come risulti ormai al pari delle tecnologie tradizionali. Va sottolineato inoltre che, mentre le tecnologie tradizionali, risultano di interesse puramente tecnico, la Stampa 3D con la sua versatilità interessa anche ad una platea non del settore industriale manifatturiero.

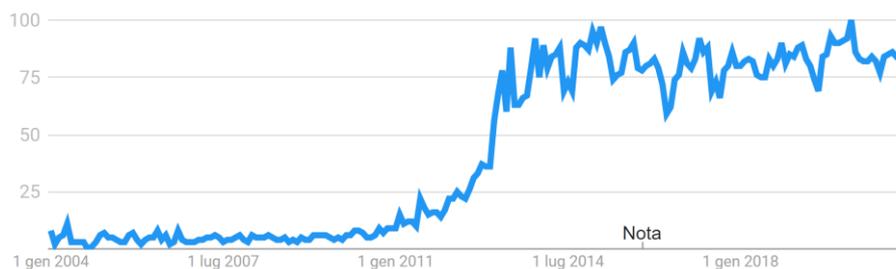


Figura 2.10 - Trend delle ricerche Google per il termine "3D Printing"

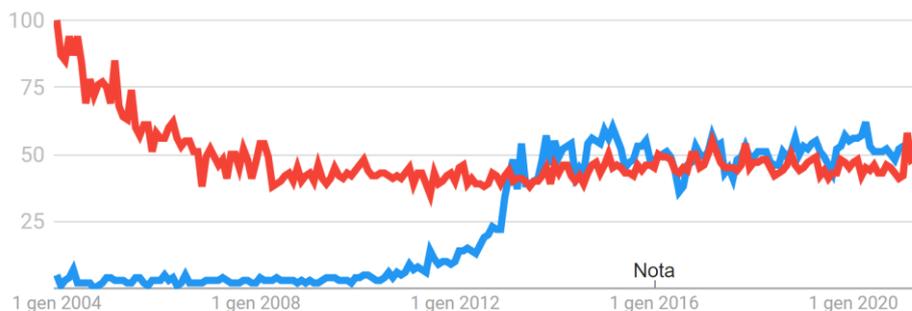


Figura 2.11 - Confronto trend di ricerca tra 3D Printing (blu) e Milling (rosso)

Gartner, Inc. è una società di consulenza e ricerca americana che fornisce informazioni relative alla all'Information Technology e nel 2015 ha condotto un sondaggio sull'AM su ampia scala. Quello che è emerso da questo sondaggio è stato che circa il 60% delle organizzazioni ha affermato che gli elevati costi di avvio sono un fattore fondamentale che sta ritardando l'implementazione l'utilizzo della stampa 3D in ambito industriale, tuttavia, è stato anche rilevato che i primi utenti ad utilizzare questa tecnologia stanno trovando chiari e svariati vantaggi; "La stampa 3D attrae un'ampia gamma di aziende e consumatori e, sebbene la tecnologia sia già in uso in svariati settori, dal medico all'aerospaziale, i costi rimangono la preoccupazione principale per gli acquirenti". L'indagine mostra anche che la prototipazione (24,5%), lo sviluppo del prodotto (16,1%)

---

e l'innovazione (11,1%) sono i tre motivi più comuni per cui le aziende internazionali si stanno avvicinando alla stampa 3D (Figura 2.12).

In Figura 2.13 sono riportati i risultati di un sondaggio condotto dalla Price waterhouse Coopers (PwC), con l'obiettivo di indagare le motivazioni per cui non vengono utilizzati nelle proprie aziende sistemi AM. Analizzando le risposte risulta, a differenza di prima, che sia l'incertezza della qualità del prodotto finito a farla da padrone con il 40,7% delle risposte, poi l'inesperienza nel settore con il 45.3% e solo al terzo posto con il 31.5% sia il costo eccessivo degli impianti AM. In Figura 2.14 sono riportati i risultati del report annuale prodotto dalla SmarTech, fornitore leader di ricerche di mercato e analisi nel settore della Stampa 3D. Nel grafico è presentato l'andamento degli ultimi anni e le previsioni per gli anni futuri dell'intero mercato del settore AM, espresso in \$USM (milioni di dollari). È inoltre possibile vedere come il mercato sia suddiviso e come ogni singola categoria contribuisca a formare il totale. Il valore del settore AM è passato da 4.1B\$ nel 2014 a quasi 14B\$ nel 2020 con un incremento di oltre il 200% in 6 anni e con una previsione di circa 40B\$ nel 2027 (+1000%).

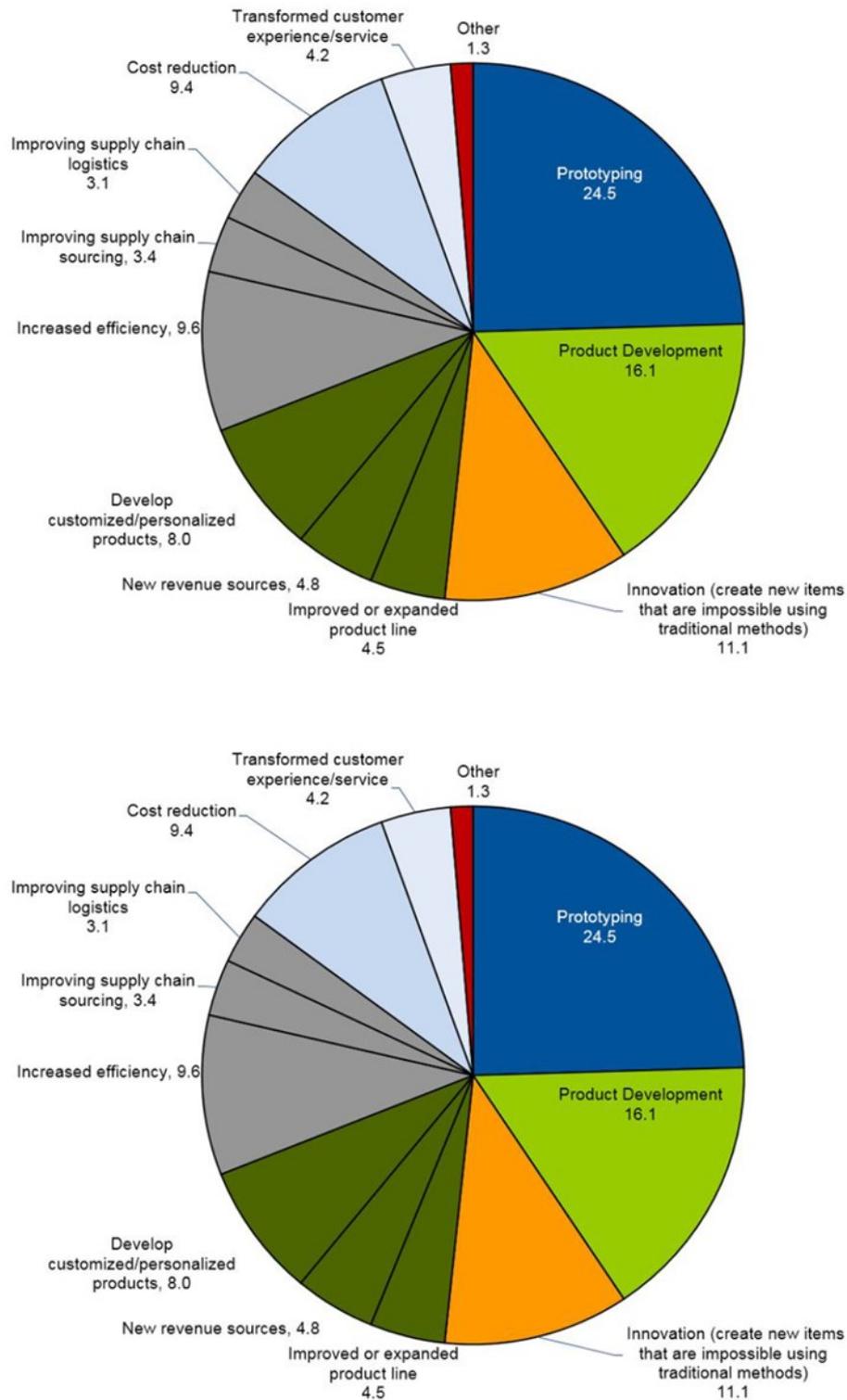


Figura 2.12-Risultati del sondaggio condotto dalla Gartner, Inc. circa le motivazioni per cui le aziende stanno implementando sistemi di Stampa3D nel loro apparato tecnologico.

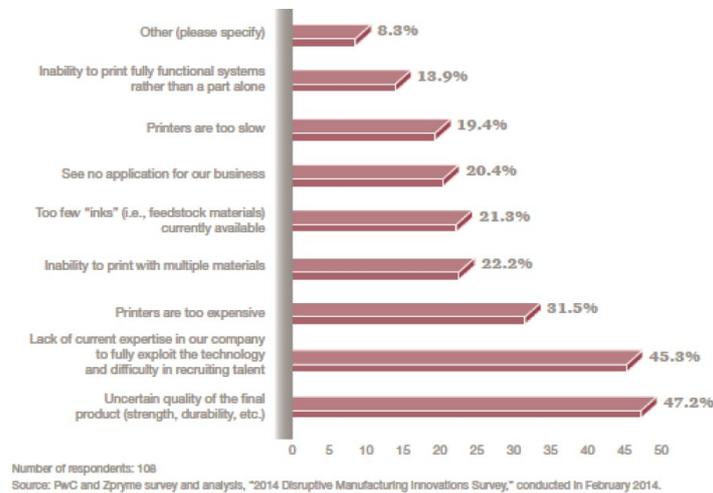


Figura 2.13-Risultati sondaggio de circa le motivazioni per cui non vengono implementate tecnologie di Stampa 3D nella propria azienda

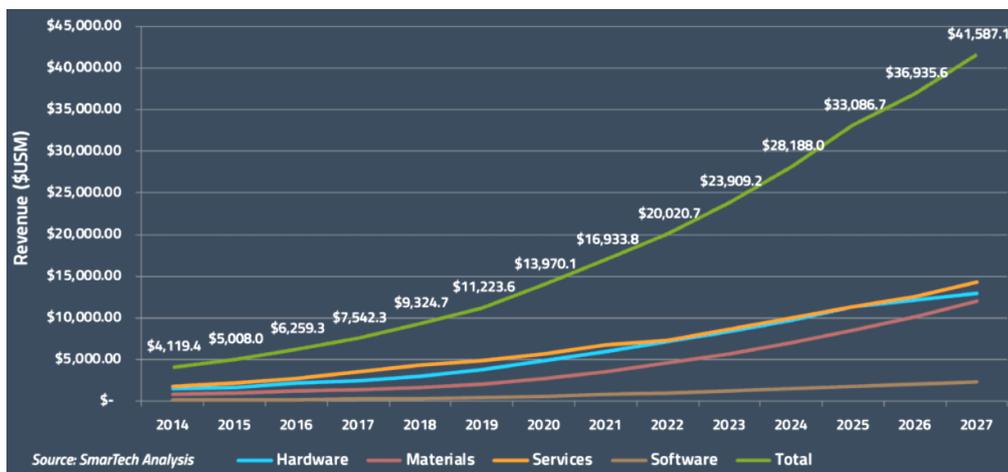


Figura 2.14-Dimensione totale del mercato relativo all'AM con proiezione fino al 2027.

## 2.6.1 In Italia

Poiché la stampa 3D è particolarmente utile nella produzione di articoli unici e complessi o piccole serie, di medio / alto valore, potrebbe essere adatta a migliorare la competitività di molte industrie del Made in Italy che producono articoli di pregio in piccole quantità, come ad esempio strumenti musicali, oggetti di design, decorazione e arredamento, gioielli e orologi, moda (scarpe, abbigliamento, accessori per abbigliamento), ristrutturazioni (mobili, statue, dettagli architettonici, auto, moto, barche), industria

motociclistica, automobilistico, aerospaziale, ingegneria meccanica e nuovi materiali, industria medica (protesi dentarie, dentale, apparecchi acustici), architettura e edilizia, industria alimentare (dolci, pasta), marketing, articoli promozionali e giocattoli (regali, gadget).

La tradizionale manualità degli artigiani italiani, unita alla loro fantasia e alla loro creatività, con il contributo delle nuove tecnologie e dei nuovi materiali possono permettere di fare un salto di qualità e rilanciare la manifattura italiana creando occupazione e sviluppo, promuovendo il lavoro autonomo giovanile e creando un artigianato digitale avanzato. La stampa 3D è un fenomeno in forte crescita, già abbastanza diffuso in Italia, con ulteriori potenzialità di sviluppo. Un esempio dello sviluppo italiano della stampa 3D è Sharebot, una start up nata in un garage a Nibionno, in provincia di Lecco, nel 2012, con l'idea di cavalcare il paradigma "della stampa 3D fai da te". Oggi Sharebot ha installato circa 2mila stampanti 3D in Italia (la maggior parte) e all'estero con un catalogo popolato da diversi modelli che sfruttano tecnologie di stampa come Fused Deposition Modeling (FDM), estrusione di filamenti termoplastici (FFF) e raggi UV - per stampare oggetti di piccole dimensioni (10x10 cm) e più grandi (70x20 cm). Considerando l'utilizzo delle stampanti 3D, le aziende italiane, alla fine del 2014, avevano in funzione circa 5mila stampanti professionali, pari a circa il 4% di quelle installate a livello globale. L'Italia, ad esempio, è al livello di Gran Bretagna e Francia, sopra la Spagna e appena sotto la Germania, che detiene una quota di mercato del 9% ed è leader mondiale se si considera solo l'AM dei metalli. Questi dati sono coerenti con i risultati di un recente studio con il quale il Rise Lab13 ha analizzato sette tecnologie considerate ultra-innovative (tra cui l'Internet of Things e la realtà aumentata) di un campione di circa cento aziende manifatturiere italiane (nell'industria prevalentemente meccanica e strumentale). La ricerca ha dimostrato in particolare come la stampa 3D sia di gran lunga la tecnologia più consolidata e ampiamente utilizzata. Circa un quarto delle aziende intervistate sta infatti effettuando analisi di fattibilità tecnico-economica finalizzate all'implementazione della stampa 3D, e una parte analoga la utilizza già quotidianamente per supportare la ricerca e sviluppo (prototipazione rapida) e la produzione per apparecchiature di supporto e piccole serie di componenti finiti.

---

I benefici ottenuti dalle aziende manifatturiere che hanno già abbracciato la stampa 3D hanno confermato che l'impatto di questa tecnologia è già significativo, oltre che misurabile: si ha una sostanziale riduzione del time-to-market dei prodotti (in alcuni casi anche di 30 %) e dei costi di produzione, un miglioramento delle prestazioni in esercizio e una riduzione dei materiali di scarto. Per contro, gli investimenti principalmente in macchinari e attrezzature e competenze sembrano frenare uno sviluppo ancora più massiccio del fenomeno. Considerando le stime del "Primo rapporto sull'impatto delle tecnologie digitali nel sistema manifatturiero italiano", realizzato dalla Fondazione Nord Est e Prometeia per la Fondazione Make in Italy, su un campione di mille aziende rappresentative del Made in Italy con ricavi oltre il milione di euro, la stampa 3D e la robotica iniziano a radicarsi, rendendole più competitive sul mercato internazionale: circa una su tre utilizza già queste tecnologie. Il progresso tecnologico, se esteso a tutte le piccole e medie imprese del Made in Italy, può valere 8,6 miliardi di euro di crescita annua del valore della produzione industriale, 39mila nuovi posti di lavoro e un ulteriore valore aggiunto di 4,3 miliardi di euro (Longo, 2015 per il giornale Repubblica). Il rapporto si propone di mostrare il grado di penetrazione delle nuove tecnologie della manifattura digitale nel sistema produttivo italiano. Le analisi hanno lo scopo di evidenziare come le nuove tecnologie produttive siano in grado di migliorare, nel medio termine, le performance aziendali italiane nei settori del Made in Italy.

Per quanto riguarda la distribuzione geografica delle imprese italiane che lavorano per il Made in Italy, si può affermare che il 77% della produzione è concentrato nelle regioni del nord. Infatti, in queste regioni il 56,3% delle aziende italiane ha la propria sede, e la loro dimensione è circa il doppio rispetto a quelle attive nel resto del paese.

La capacità delle imprese Italiane di soddisfare una domanda mondiale sempre più diversificata e complessa ha sostenuto la crescita dell'export negli ultimi anni. Il fatturato estero rappresenta circa il 46% del fatturato del settore, dando un contributo essenziale al saldo del totale manifatturiero (119 miliardi di euro nel 2014). Considerando nel dettaglio la diffusione delle tecnologie AM nel settore (Figura 2.15), il report Make in Italy (2015) afferma che il 25,8% delle aziende utilizza la stampa 3D e/o scanner 3D; tale quota raggiunge il 33,3% tra le grandi imprese (ricavi superiori a 50 milioni).

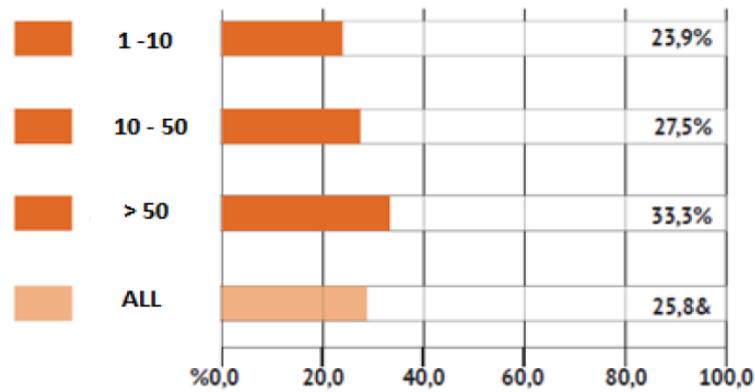


Figura 2.15 Uso di tecnologie digitali in Italia per dimensioni delle Aziende [8].

A livello geografico sono distribuite sul territorio nazionale come riportato in Figura 2.16

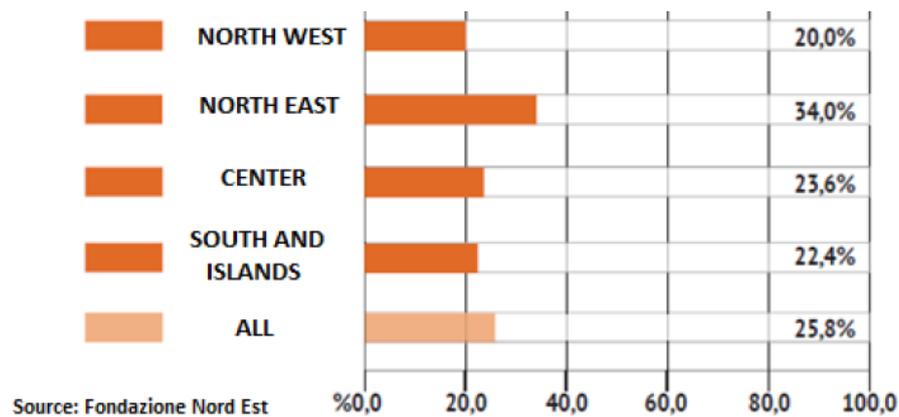


Figura 2.16- Uso delle tecnologie digitali in Italia per territori [8].

La ricerca mostra che l'utilizzo della scansione 3D e della stampa 3D tra le aziende italiane è più diffuso nell'industria dei gioielli e delle pietre preziose oltre che nel settore dentale (42,6%), seguito dal settore delle macchine e dei trasporti (32,4%).

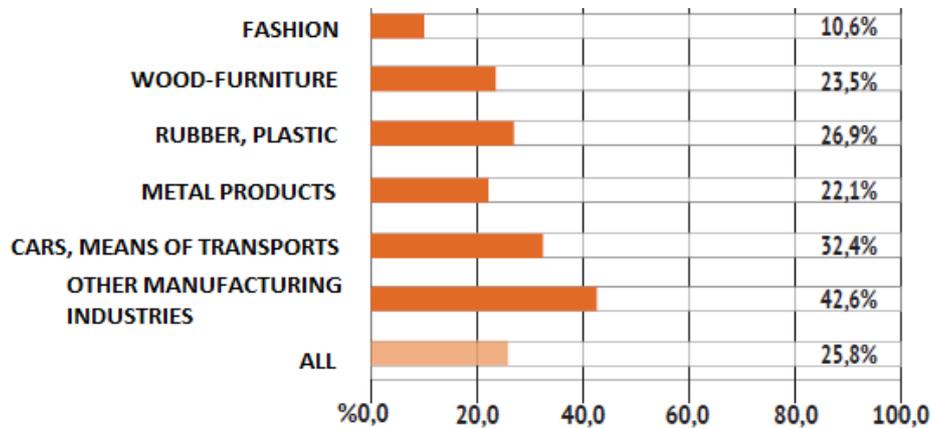


Figura 2.17- Uso delle tecnologie digitali in Italia per settore [8].

In Figura 2.18 è riportata la produzione manifatturiera italiana divisa per aree geografiche e dalla quale si può osservare il netto divario tra Nord e Sud in termini di produttività. Confrontandola però con la Figura 2.16 si può notare invece come queste nuove tecnologie siano molto meglio distribuite sul territorio nazionale e che quindi queste possano rappresentare un'occasione per le regioni meno produttive per colmare il *gap* che ormai da anni separa il Sud e le isole rispetto al Nord Italia.

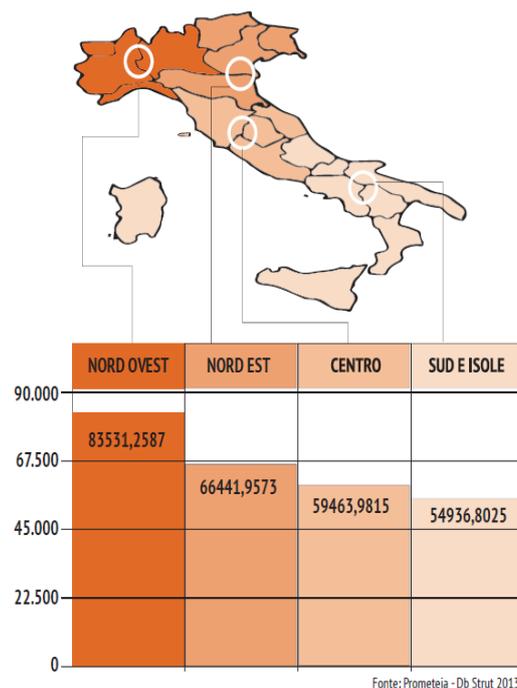


Figura 2.18-Produzione manifatturiera italiana per area geografica [8].

# Capitolo 3

## Le Strutture Lattice

Il termine cella deriva dal latino ed indica un piccolo compartimento, uno spazio chiuso. Il nostro interesse però non è tanto per le celle singole ma bensì per gli agglomerati di celle, in latino *cellarium* ma più note per noi come *lattice structures* o *cellular solids*. Con questi termini si intendono celle assemblate insieme, condividendo spigoli o intere facce, riempiendo lo spazio tridimensionale. Materiali del genere sono molto comuni in natura: legno, sughero, spugne e coralli.

Gli esseri umani hanno fatto uso di questi materiali per secoli e solo negli ultimi anni, grazie al forte sviluppo tecnologico, si è iniziato a produrre materiali cellulari fatti ad hoc. Una delle strutture di questo tipo più semplici ma di applicazione vastissima sono gli honeycomb. Prendendo ispirazione dalla struttura degli alveari delle api è stato sviluppato un materiale fatto da celle prismatiche affiancate con il fine di realizzare componenti struttura dal peso contenuto e con proprietà particolari. Altro esempio possono essere le schiume, sia metalliche che ceramiche che polimeriche, molto utilizzate sia in ambito strutturale per l'assorbimento di energia cinetica che per l'isolamento sia termico che acustico [24].

### 3.1 Proprietà delle strutture lattice

La necessità di sviluppare ed utilizzare strutture lattice o più in generale metamateriali nasce dal fatto che i materiali classici non riescono a soddisfare la richiesta di determinate caratteristiche meccaniche. Come si può vedere dalla Figura 3.1 i materiali monolitici

metallici si piazzano nell'angolo in alto a destra del grafico, caratterizzati da elevate densità e moduli elastici. Muovendosi lungo la diagonale, nel verso delle densità decrescenti, si incontrano in ordine: materiali compositi, polimeri, materiali naturali e schiume. Quello che però è ancor più importante notare in questa figura è che ci sono due grosse aree nelle quali non sono presenti materiali e sono le due aree indicate con HOLE. Questo vuol dire che ad esempio non è possibile trovare tra quelli rappresentati in figura un materiale dalla bassa densità e l'elevato modulo di elastico. Le strutture lattice si piazzano proprio in questa regione, riuscendo a garantire elevate rigidezze con basse densità. Essendo queste strutture e non materiali veri e propri vengono classificate come metamateriali. Un metamateriale è un materiale creato artificialmente con proprietà peculiari che lo differenziano dagli altri materiali. Le sue caratteristiche macroscopiche non dipendono solo dalla sua struttura molecolare, ma anche dalla sua geometria realizzativa. In altri termini, un metamateriale guadagna le sue proprietà dalla sua struttura piuttosto che direttamente dalla sua composizione chimica. Questi sono solitamente composti da aggregati di celle ordinate o stocastiche. Riassumendo, le strutture lattice possono essere categorizzate come metamateriali che si posizionano nell'angolo in alto a sinistra dello spazio densità-modulo elastico.

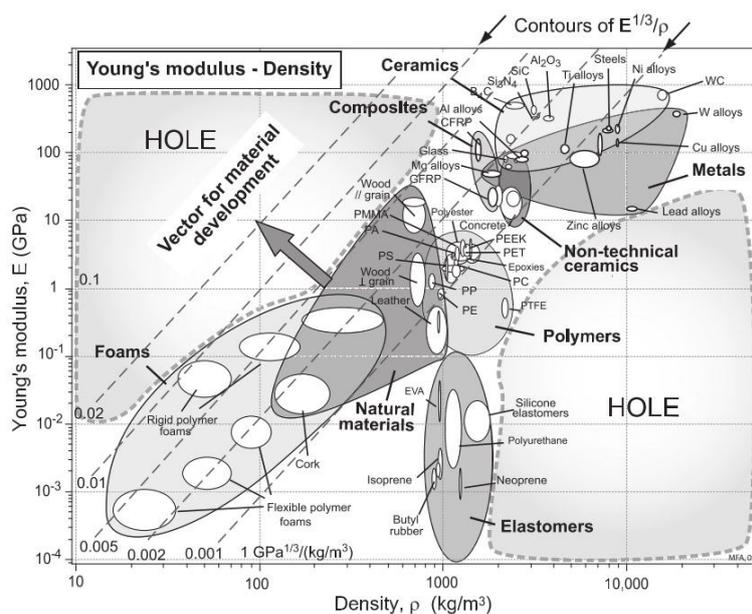


Figura 3.1-Rigidità dei materiali noti in funzione della loro densità [25].

In Figura 3.2 è riportata un'immagine presa dal libro "Cellular solids" di L.J.Gibson e M.F.Ashby [24], ritenuto il manuale per eccellenza per lo studio e l'approfondimento delle strutture cellulari. In questa immagine si può apprezzare come attraverso l'utilizzo delle schiume si possano estendere i range di variazione per alcune proprietà che altrimenti resterebbero confinate in campi molto meno ampi.

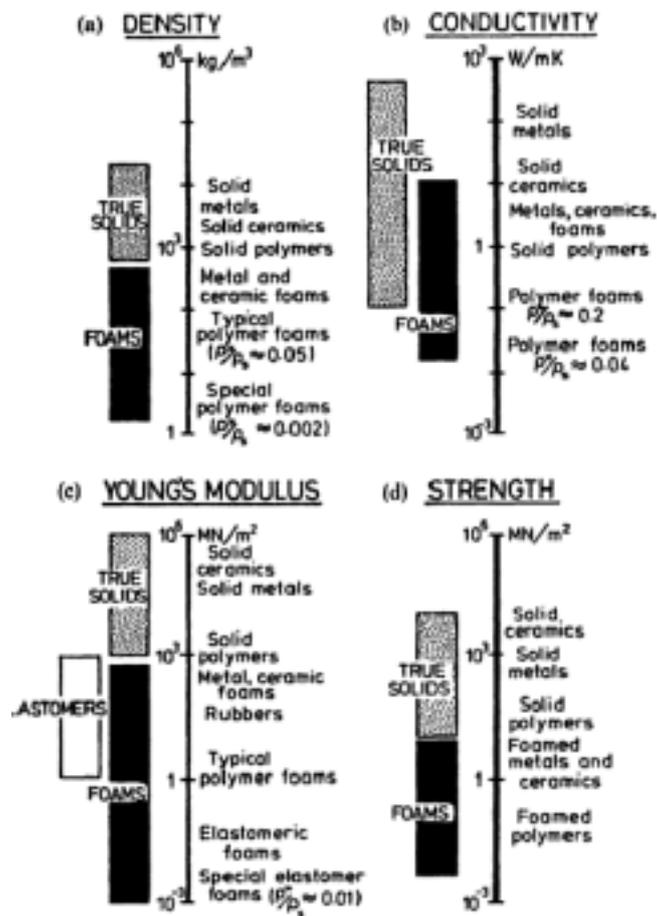


Figura 3.2- Estensione delle proprietà meccaniche grazie all'utilizzo delle schiume: (a) densità; (b) conducibilità termica; (c) Modulo elastico; (d) resistenza a compressione [24].

Nei materiali cellulari si ha un'alternanza di materia e spazio vuoto ed a seconda di come sia distribuito questo materiale si possono classificare come *open cell* o *closed cell*: nei primi il materiale è contenuto nella facce che formano la singola cella mentre nei secondi negli spigoli. In questo lavoro di dottorato più che sulle schiume ci si è soffermati sullo

---

studio e sulla caratterizzazione delle strutture lattice che, in base a quanto detto, possono essere classificate come un reticolo di nodi interconnesso da travi (*struts*) e quindi categorizzate come *open cell*. Le strutture lattice possono essere a loro volta categorizzate come periodiche o stocastiche: quelle periodiche possono essere ottenute dalla ripetizione di una cella unitaria nelle varie direzioni mentre le stocastiche invece sono un assemblato di celle senza alcuna simmetria [26]. La curva di compressione ottenuta a partire da un test uniassiale di compressione consente di determinare se il comportamento delle strutture lattice è *bending-dominated* o *stretch-dominated*. Nelle strutture *bending-dominated* le struts che compongono il reticolo, se sottoposte ad un carico di compressione uniassiale, sono sollecitate principalmente a flessione mentre nel caso delle *stretch-dominated* si comporterebbero come puntoni.

### 3.1.1 La densità relativa

Gibson e Ashby in [24] affermano che l'unica e più importante proprietà che descrive una struttura lattice è la sua densità relativa  $(\frac{\rho^*}{\rho_s})$ . Questa altro non è che la densità della struttura lattice  $\rho^*$  diviso quella del materiale di cui è composta  $\rho_s$ . Alcune *low-density-foam* hanno raggiunto valori di densità relativa pari anche a 0.001. Al crescere della densità relativa le struts che compongono la struttura diventano più tozze e la porosità interna decresce; superato il valore di 0.3 si ha transizione di comportamento da struttura cellulare a solido con porosità isolata (Figura 3.3). Il complemento a 1 della densità relativa sarà chiamato porosità  $(1 - \frac{\rho^*}{\rho_s})$

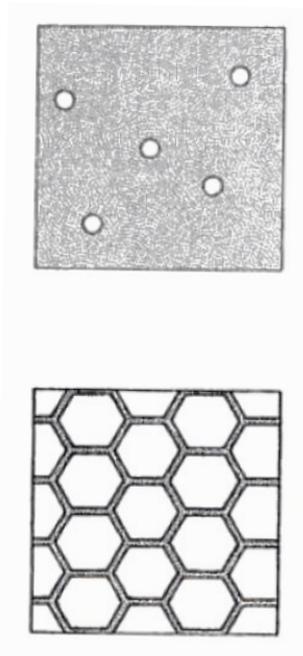


Figura 3.3-Confronto tra solido cellulare e con porosità isolata [24].

In [24] vengono proposte delle formulazioni analitiche per correlare la densità relative e le dimensioni caratteristiche delle celle che costituiscono il solido cellulare. Se indichiamo con  $t$  lo spessore delle struts o delle pareti che costituiscono le celle e con  $l$  la dimensione del bordo della cella e se  $t \ll l$  (densità relativa  $< 0.3$ ) allora si può scrivere:

per gli honeycombs,

$$C_1 \frac{t}{l} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1)$$

per le strutture *open-cells*,

$$C_2 \left(\frac{t}{l}\right)^2 = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2)$$

per le strutture *closed-cells*,

$$C_3 \frac{t}{l} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3)$$

dove  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  sono costanti numeriche, prossime all'unità, che dipendono dalla cella elementare che si sta considerando. Queste costanti si possono determinare a valle di una campagna sperimentale, calibrando i risultati per svariati valori della densità relativa. Al crescere però della densità relativa le espressioni proposte tendono a sovrastimarla a causa del conteggio doppio dei vertici e degli spigoli condivisi delle celle. Viene quindi proposta una correzione per la correlazione tra geometria e densità relativa che tenga conto di questo fenomeno, ed in particolare:

per gli honeycombs,

$$C_4 \frac{t}{l} (1 - D_1 \frac{t}{l}) = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (4)$$

per le strutture *open-cells*,

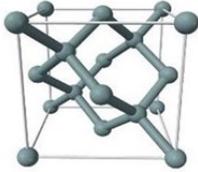
$$C_2 \left(\frac{t}{l}\right)^2 (1 - D_2 \frac{t}{l}) = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad o \quad C_2 \left(\frac{t}{l}\right)^2 - C_6 \left(\frac{t}{l}\right)^2 = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (5)$$

per le strutture *closed-cells*,

$$C_7 \frac{t}{l} (1 - D_3 \frac{t}{l} (1 - D_4 \frac{t}{l})) = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (6)$$

In Tabella 3.1 sono riportati i valori calcolati sperimentalmente delle costanti per la cella *Diamond* e *Rhombic Dodecahedron*.

Tabella 3.1- Costanti per la stima della densità relativa per cella elementare Rhombic dodecahedron e Diamond

<b>Rhombic Dodecahedron</b>		$C_2 = 8,16$ $C_6 = 8$	
		[27]	
		$C_2 = 8,16$	[28]
		$C_2 = 8,16$ $C_6 = 9,54$	[28]
<b>Diamond</b>		$C_2 = 1,02$	[29]
		$C_2 = 1,02$ $C_6 = 0,40$	[30]
		$C_2 = 4,08$ $C_6 = 3,21$	[27]
		$C_2 = 6,28$	[28]
		$C_2 = 6,28$ $C_6 = 4,89$	[28]

### 3.1.2 Proprietà elastiche delle strutture lattice periodiche

Come detto nel paragrafo precedente le strutture lattice possono essere classificate in funzione del loro modo di deformarsi. In questo paragrafo si cercherà di spiegare le differenze delle strutture lattice periodiche in termini di proprietà elastiche [31].

#### IL CRITERIO DI MAXWELL

Maxwell formulò una regola basata sulla topologia delle celle elementari, considerate composte da travi e cerniere, affinché queste risultino rigide [32]. Qualora una lattice non rispetti la legge di Maxwell sarà classificata come *meccanismo* mentre nel caso contrario come *struttura*. Considerando una struttura lattice tridimensionale, composta da  $b$  travi e  $j$  nodi, la legge di Maxwell si esplicita nella seguente forma:

$$M = b - 3j + 6 \quad (7)$$

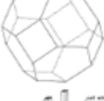
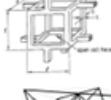
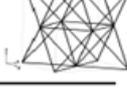
Se  $M \geq 0$ , la struttura è rigida e si può classificare in questo caso sia come *bending-dominated* che come *stretching-dominated*. La Tabella 3.2 mostra alcune celle elementari con  $M \geq 0$  ed il loro principale meccanismo di deformazione.

Altra categoria molto interessante è quella delle lattice auxetiche, molto studiate anche in passato. La particolare geometria di queste strutture fa sì che rispondano complessivamente come un metamateriale con coefficiente di Poisson negativo [33], ovvero un materiale che si espande trasversalmente rispetto alla direzione in cui sta venendo tirato e che si contrae lateralmente durante una compressione. Con l'avvento delle tecnologie AM queste strutture hanno acquisito un'importanza crescente e stanno trovando sempre più riscontro in svariati campi di applicazione, tra cui quello biomedicale sembra esserne particolarmente interessato.

Prima di procedere con la descrizione delle proprietà elastiche di alcune tipologie di strutture bisogna fare alcune precisazioni circa il significato di stress e strain che si useranno in seguito. Abitualmente, quando si ha a che fare con strutture cellulari e ne si vuole descriverne il comportamento [34–36]:

- con il termine stress si indicherà il rapporto tra la forza istantanea applicata durante il test e l'ingombro trasversale iniziale del provino
- con il termine strain si intende la deformazione calcolata utilizzando i dati relativi allo spostamento della traversa della macchina di prova, corretti tenendo conto della sua rigidità.

Tabella 3.2-Celle elementari rigide e loro meccanismo di deformazione

Tetrahedron	Stretching-dominated	
Hexahedron	Bending-dominated	
Dodecahedron	Bending-dominated	
Rhombic dodecahedron	Bending-dominated	
Icosahedron	Stretching-dominated	
Tetraikaidecahedron	Bending-dominated	
Simplest foam model	Bending-dominated	
Octet-truss	Stretching-dominated	

### **PROPRIETA' ELASTICHE DELLE STRUTTURE BENDING-DOMINATED**

Gibson e Ashby [37] prendendo ad esempio la struttura di una schiuma semplice riuscirono a determinare analiticamente il comportamento elastico delle *bending-dominated open-cell*. Considerando questa schiuma composta da travi soggette a flessione, ed utilizzando la teoria di Eulero-Bernoulli, riuscirono a determinare una legge che permettesse di stimare la rigidezza di questa tipologia di strutture in funzione solo della loro densità relativa:

$$\frac{E}{E_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \quad (8)$$

dove  $E$  e  $\rho$  sono il modulo di Young e la densità della struttura cellulare, ed  $E_s$  e  $\rho_s$  sono il modulo di Young e la densità del materiale base. Dall'analisi di questa relazione si può affermare che nelle strutture *bending-dominated* la rigidità scala con il quadrato della densità relativa. E' possibile inoltre riuscire a prevedere anche il valore dello stress di plateau  $\sigma_{pl}$  (rappresentato in Figura 3.4) considerando sempre che la struttura collassi a causa della flessione delle struts che la compongono. Questo plateau si ha quando la forza esercitata fa sì che le sezioni soggette a flessione generino la condizione di cerniera plastica.

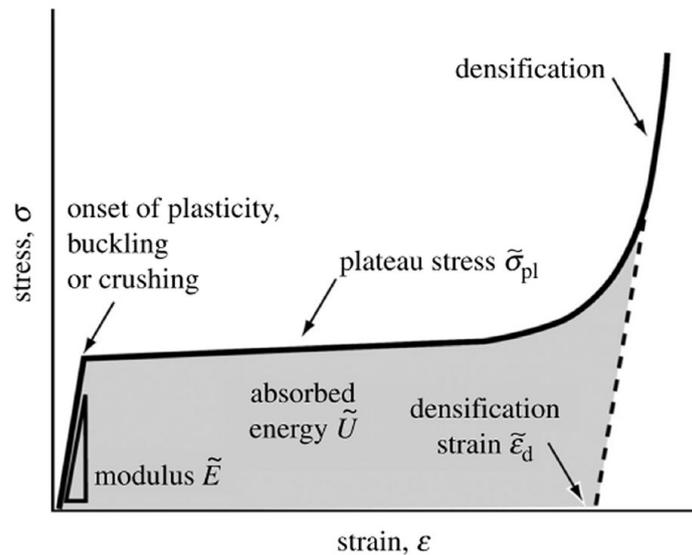


Figura 3.4-Curva Stress-Strain per una struttura bending-dominated [26].

Lo stress di plateau, normalizzato rispetto allo snervamento del materiale base  $\sigma_{y,s}$ , può essere espresso come:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{3/2} \quad (9)$$

In Figura 3.4 è riportato il diagramma tipico tensione-deformazione per un solido cellulare del tipo *bending-dominated* soggetto a compressione. Il diagramma è costituito da: una prima fase elastica; un più o meno lungo plateau corrispondente alla flessione

delle struts che compongono la struttura; la densificazione finale nella quale le struts, compresse, entrano in contatto.

### **PROPRIETA' ELASTICHE DELLE STRUTTURE STRETCHING-DOMINATED**

Utilizzando lo stesso approccio visto nel paragrafo precedente è possibile derivare anche le proprietà elastiche delle strutture *stretching-dominated*. La relazione che lega il modulo di Young e la densità relativa, può essere espressa come segue:

$$\frac{E}{E_s} \propto \frac{\rho}{\rho_s} \quad (10)$$

Il modulo di Young delle strutture *stretching-dominated* scala linearmente con la densità relativa. Il valore di plateau è supposto corrispondere al valore dello stress della prima strut che snerva e si può esprimere come:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \propto \frac{\rho}{\rho_s} \quad (11)$$

Se invece la struttura è composta da struts snelle e che quindi tendono ad andare in instabilità per carico di punta prima di snervare, considerando l'instabilità euleriana si può scrivere:

$$\frac{\sigma_{el}}{E_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \quad (12)$$

La snellezza delle struts che compongono la struttura governa il meccanismo di collasso ed è direttamente collegata alla densità relativa: le strutture con bassa densità relativa tendono a collassare per instabilità più facilmente di quelle con alta densità relativa. Per comprendere quanto detto basti pensare ad una struttura lattice periodica con dimensione della cella fissa e struts con diametro via via crescente; più il diametro delle struts cresce

più aumenterà il valore di densità relativa e meno snelle risulteranno le struts, allontanando così il fenomeno di instabilità per carico di punta.

In Figura 3.5 è riportato il grafico di una prova di compressione di una struttura *stretching-dominated*. Solitamente questo tipo di strutture risultano, a densità relativa fissata, più rigide e con un valore della tensione di snervamento più alta rispetto a quanto alle *bending-dominated*. Quando caricate in compressione, subito dopo la fine del tratto elastico segue una repentina caduta di carico che può essere seguita da un valore di plateau fino ad arrivare poi alla densificazione finale.

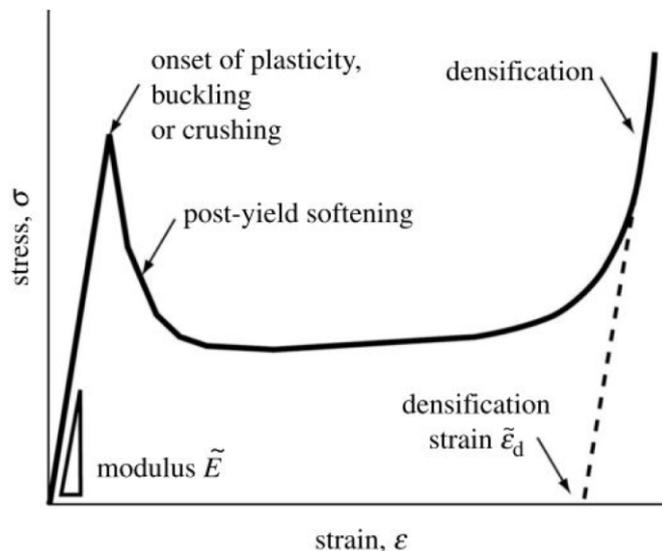


Figura 3.5- Curva Stress-Strain per una struttura *stretching-dominated* [26].

## 3.2 Assorbimento di energia nei materiali cellulari

L'ottima capacità delle strutture lattice nell'assorbire energia le rende particolarmente appetibili ogni qual volta sia necessario progettare componenti che abbiamo questo fine. In questi casi l'energia cinetica viene per lo più smaltita sotto forma di calore attraverso grandi deformazioni plastiche, fenomeni di viscoelasticità o attrito. La necessità di dover ridurre i picchi di forza dovuti ad un impatto può essere un esempio di casi in cui sia necessario utilizzare dispositivi che deformandosi permettono di attenuare gli impulsi in gioco. Le strutture lattice, ad esempio, deformandosi in compressione permettono di assorbire grandi quantità di energia e si propongono quindi come ottima soluzione a

problemi di questo tipo. Qualora in fase di progetto non sia ben chiara la direzione nella quale avverrà la deformazione della lattice allora è bene utilizzare strutture a comportamento isotropo come quelle con celle *Diamond* o schiume. In questi casi, non essendo prevedibile la direzione in cui può avvenire l'impatto, strutture di questo tipo sono capaci di assorbire buone quantità di energia indipendentemente dalla direzione in cui sono sollecitate. Quando invece la direzione di carico è ben chiara sarà allora possibile utilizzare strutture con caratteristiche di assorbimento ottimizzate solo nella direzione di interesse (come gli *Honeycomb*).

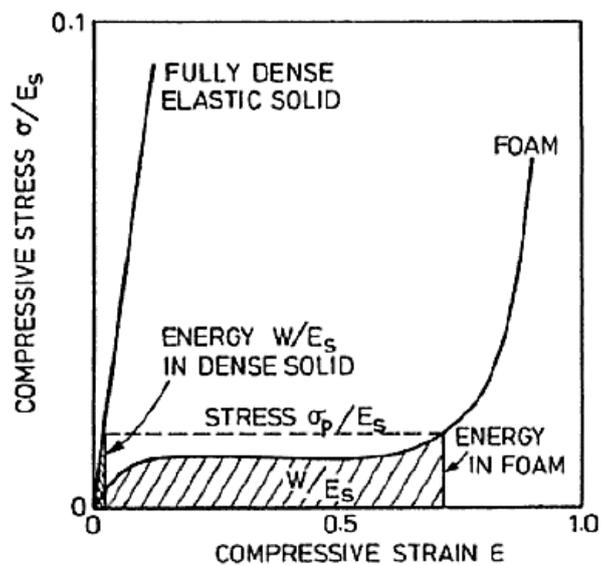


Figura 3.6-Curve stress-strain per un solido monolitico ed uno cellulare dello stesso materiale. Energia assorbita per unità di volume in corrispondenza dello stress massimo.

In generale, in un solido cellulare, l'energia può essere assorbita per deformazione plastica a flessione delle struts (o facce in caso di closed cells), per buckling o per creare nuove superfici di frattura ed in tutti questi casi il valore massimo della forza raggiunto sarà limitato dallo stress di plateau (Figura 3.6). Scegliendo opportunamente il materiale con cui realizzare il solido cellulare e il suo valore di densità relativa, è possibile far variare in un ampio range la risposta a compressione di queste strutture, ottimizzandola per ogni caso possibile.

Quando una struttura lattice viene compressa, viene compiuto lavoro dalle forze applicate su di essa. Il lavoro per unità di volume compiuto per deformare un solido cellulare fino ad un valore generico di  $\epsilon_1$ , altro non è che l'area sottesa dalla curva stress-strain fino proprio al valore di  $\epsilon_1$  (Figura 3.7). La quantità di energia che può essere assorbita da queste strutture rimanendo in campo elastico è davvero piccola ed è quindi il lungo valore dello stress di plateau a consentirne l'assorbimento di grandi quantità. Il valore dello stress di plateau dipende sia dal materiale di cui è costituito il solido cellulare che dal valore della densità relativa della struttura. Inoltre, anche i valori di strain rate raggiunti durante la deformazione può influenzarlo notevolmente.

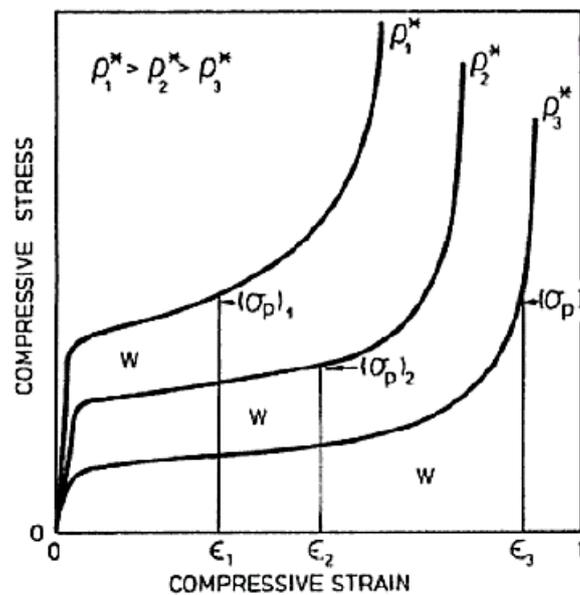


Figura 3.7-Risposta stress strain di strutture lattice con diversa densità di energia sottoposte a compressione.

Il lavoro fatto comprimendo una struttura open-cell è assorbito dalla lattice sottoforma di buckling elastico, plasticizzazione o frattura fragile delle struts. Ognuno di questi meccanismi comporta l'instaurarsi, a livello macroscopico e quindi di metamateriale, di un valore dello stress pressoché costante fino a quando la struttura non raggiungerà la densificazione finale. Il valore dell'energia assorbita per unità di volume può essere calcolato come segue:

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (13)$$

che nel caso in cui si abbia un netto valore di plateau diventa:

$$W \approx \sigma^* \cdot \varepsilon \quad (14)$$

con  $\sigma^*$  stress di plateau.

L'energia,  $W$ , e lo stress,  $\sigma^*$ , dipendono dallo strain-rate e dalla temperatura in maniera più o meno influente a seconda del materiale base e del tipo di cella utilizzata. Può capitare che nonostante il materiale base sia fortemente sensibile a questi due aspetti, la struttura lattice ad esso associato non ne risenta particolarmente.

# Capitolo 4

## La stampa delle strutture lattice

### 4.1 Introduzione

La realizzazione di strutture lattice periodiche, a causa della loro complessità geometrica, non è possibile mediante le tecnologie tradizionali ma bensì solo attraverso l'utilizzo di processi AM. La tecnologia utilizzata in questo lavoro è la SLM, nella quale una sorgente laser scannerizza e fonde polveri metalliche strato dopo strato, fino ad ottenere il componente desiderato. Prescindendo da cosa si stampa, questo processo è molto complesso a causa dei forti e localizzati gradienti termici, della necessità di utilizzare strutture di supporto e della resistenza termica delle polveri che circondano il componente. Le variabili in gioco che influenzano la qualità del prodotto finale è stato stimato che siano circa 130 [35]. La potenza del laser ( $P$ ), la velocità con cui questo scansiona le polveri ( $v$ ), l'altezza di strato utilizzato o *layer thickness* ( $t$ ), la distanza tra due vettori scannerizzati parallelamente o *hatch spacing* ( $h$ ), sono i parametri principali che governano un processo di stampa SLM e che influenzano direttamente la densità di energia ( $E$ ) trasferita dal laser alle polveri:

$$E\left(\frac{J}{mm^3}\right) = \frac{P(w)}{v\left(\frac{mm}{s}\right) \cdot t(mm) \cdot h(mm)} \quad (15)$$

La scelta e l'ottimizzazione di tutti questi parametri diventa ancor più complessa quando si devono stampare strutture lattice poiché: non è possibile utilizzare strutture di

supporto; la dimensione delle struts spesso è paragonabile al diametro del fascio laser; il wiper può danneggiare struts eccessivamente snelle. Molti ricercatori hanno approfondito lo studio della scelta ottimale dei parametri di stampa per la fabbricazione di strutture lattice e di come questi influenzino il risultato finale: nel lavoro [38] ad esempio è stata studiata la realizzazione con tecnologia SLM di strutture lattice in acciaio AISI 316L focalizzandosi sulla qualità della stampa delle struts al variare degli angoli di sbalzo; in [39] sono state studiate invece strutture lattice con celle di diverse dimensioni arrivando a concludere che le struts orizzontali non possono essere stampate con qualità accettabile.

In Figura 4.1 è mostrato il processo di generazione della *melt pool* lungo la direzione di crescita del componente in un processo DMLS. Il fascio laser ha distribuzione di potenza gaussiana e scannerizza le polveri metalliche generando le *melt pools* con forma emisferica. L'intensità del fascio è quindi maggiore al centro, dove si raggiunge la massima profondità e decresce dal centro verso i bordi del fascio, generando così la forma ad arco. Esiste una zona rifusa, affetta termicamente, intorno al bordo del laser che rende la *melt pool* più larga del diametro del fascio stesso [40]. Questo fa sì che siano fuse non solo le polveri direttamente colpite dal fascio laser ma anche quelle a loro adiacenti. Una diretta conseguenza di questo fenomeno è che nonostante l'*hatch spacing* sia maggiore della semilarghezza del fascio, si riesca comunque a garantire la sovrapposizione fra vettori scannerizzati parallelamente. Altro aspetto fondamentale è che la profondità della *melt pool* deve essere maggiore del *layer thickness* in modo da garantire la continuità metallurgica fra i vari strati. La dimensione della *melt pool* dipende sia dai parametri utilizzati per la stampa (che però in un range di variazione sensato non influiscono sensibilmente), che dallo spessore del *layer*, che dal diametro del fascio laser.

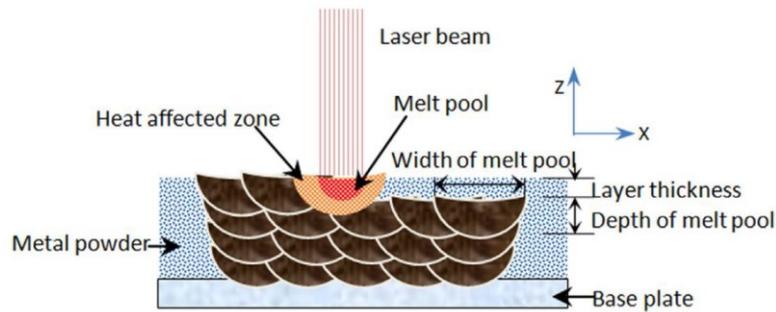


Figura 4.1-Processo di generazione delle melt pool [40].

I problemi che possono insorgere, tenendo conto di quanto detto sulla forma e sulle dimensioni della *melt pool*, sono essenzialmente due:

1. Essendo la *melt pool* abbastanza più larga (nel piano di scansione) del diametro del fascio laser, se si scannerizzasse il *contour* del pezzo da stampare esattamente nella sua posizione nominale otterrei una dimensione sicuramente maggiore. Per ovviare a questo problema si *'shifta'* opportunamente il fuoco del fascio laser verso l'interno del pezzo, in modo da compensare quanto appena detto.
2. La *melt pool* deve essere più profonda del *layer thickness* per poter garantire la perfetta fusione tra layer consecutivi: questo ha delle conseguenze negative sulla finitura superficiale del componente che si sta stampando; ogni volta che si stampa su un layer che poggia anche solo parzialmente sulle polveri (*stair stepping effect*), poiché il laser penetra più dell'altezza del layer, fonderà anche alcune polveri sottostanti, provocandone l'adesione alla struttura principale (Figura 4.2). Il modo più efficace per limitare questo inconveniente è diminuire il più possibile il *layer thickness* e la dimensione del fascio laser, perdendone però in produttività.

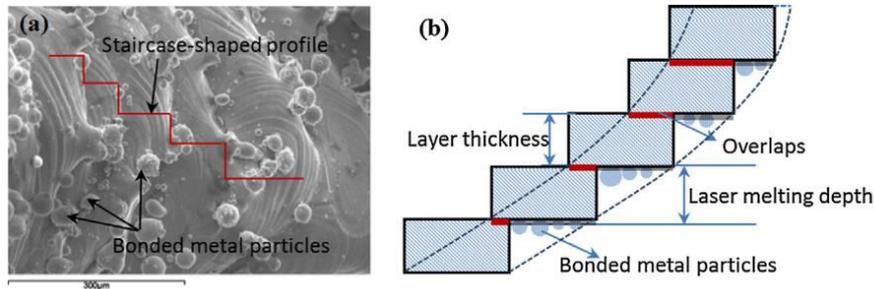


Figura 4.2-Formazione di agglomerati di polveri adese alla struttura principale

In questo capitolo saranno approfondite le problematiche relative alla stampa delle strutture lattice ed il procedimento che è stato seguito per la scelta dei migliori parametri per la loro realizzazione.

## 4.2 Materiali e Metodi

Il materiale che si è utilizzato e che sarà la base dell'intero lavoro di tesi è l'acciaio inossidabile 17-4 PH (AISI630). L'AISI 630 è noto anche con il nome commerciale 17-4 PH ed appartiene alla famiglia degli acciai PH (Precipitation Hardening, o indurenti per precipitazione) e di questo gruppo di acciai inossidabili è il più diffuso. Il 630 rappresenta un ottimo compromesso tra resistenza meccanica e resistenza alla corrosione. Quanto alla resistenza alla corrosione è confrontabile con gli acciai austenitici tipo AISI 304/304L e, per diverse applicazioni, con quelli tipo AISI 316/316L. La composizione chimica del materiale è riportata in Tabella 4.1 ed è in accordo con la normativa ASTM A564 / A564M – 13 UNS S17400 a [41].

Tabella 4.1- Composizione chimica nominale delle polveri di acciaio 17-4PH [wt%]

Fe	C	Mg	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
Balance	0-0,07	0-1,00	0-0,04	0-0,03	0-1,00	15,00- 17,50	3,00- 5,00	3,00- 5,00

Per essere utilizzabile come materiale base in processi di stampa 3D è necessario produrlo sottoforma di polveri metalliche. Questo è possibile grazie al processo di *gas atomization* che include una serie di fasi in cui un gas inerte è utilizzato per rompere un flusso di metallo fuso in particelle di polvere metallica. Un'immagine delle polveri utilizzate è

riportata in Figura 4.3. Queste risultano sferiche nella forma con una dimensione del diametro nel range di 15-45  $\mu\text{m}$ . La macchina utilizzata per la stampa dei provini oggetto di studio è una Concept Laser DMLS/SLM ed è stata messa a disposizione, così come le polveri, dalla società Sophia High Tech Srl. Il fornitore di polveri consiglia un trattamento termico di post-produzione che consiste in una ricottura alla temperatura di 1025 – 1055°C, seguita da un rapido raffreddamento in acqua o olio. Successivamente è consigliato portare il componente stampato ad una temperatura di 480°C per un'ora, per poi lasciarlo raffreddare a temperatura ambiente. Le proprietà del materiale, trattato come descritto, sono fornite dal produttore di polveri e riportate in Tabella 4.2.

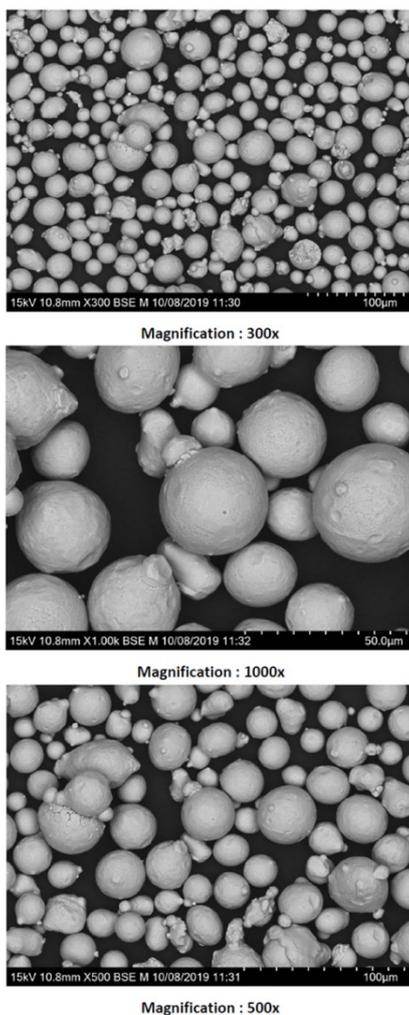


Figura 4.3-Polveri acciaio 17-4PH

I job di stampa sono stati realizzati in atmosfera inerte a base di azoto e con un percentuale di ossigeno controllata e contenuta nel range 0,2-0,8%.

Poiché le proprietà meccaniche dei componenti prodotti in AM sono fortemente influenzate dai parametri di stampa e poiché, come vedremo in questo capitolo, la stampa di strutture lattice richiede l'utilizzo di parametri particolari, si è deciso di procedere nel prossimo capitolo con la caratterizzazione del materiale attraverso opportuni test e di non utilizzare direttamente i dati delle caratteristiche meccaniche forniti.

Il lavoro che ci ha portato alla scelta di quello che sarà ritenuto il miglior set di parametri con cui stampare strutture lattice è stato articolato in due fasi:

1. E' stato stampato un primo *job* utilizzando il set di parametri comunemente usati in azienda per stampare componenti *bulk* per vedere come questi si adattassero alla stampa di strutture lattice.
2. Si è poi proceduto con la stampa di un secondo *job* con il fine di individuare il set di parametri migliori per la realizzazione di strutture lattice periodiche in 17-4PH. In questa seconda fase sono state condotte anche analisi dimensionali e test di compressione per raggiungere l'obbiettivo appena esposto.

I software CAD utilizzati per la progettazione delle strutture lattice sono stati nTopology e Netfabb della Autodesk.

I test di compressione sono stati condotti con macchina per test uniassiali Instron Serie 5582 attrezzata con una cella di carico da 100kN. Le misure dimensionali sono invece state condotte con micrometro laser MICRO-EPSILON.

Tabella 4.2-Caratteristiche meccaniche acciaio 17-4PH riportate dal produttore di polveri

Yield Point $R_{p0.2}$	Tensile Strength	Elongation A	Thermal Conductivity	Hardness
1170 MPa	1310 MPa	10%	16 W/mK	388HB

### 4.3 Verifica del parametro standard: Job I

Il set di parametri scelto per il primo piano di stampa è riportato in Tabella 4.3, fornito dalla casa produttrice della macchina e comunemente utilizzato in azienda per la stampa di componenti *bulk*.

Tabella 4.3-Set di parametri comunemente utilizzati per la stampa di componenti bulk

<b>Power [W]</b>	<b>Scan Speed [mm/s]</b>	<b>Hatch Space [mm]</b>	<b>Layer Thickness [mm]</b>	<b>Contour Offset [mm]</b>	<b>Energy Density [J/mm<sup>3</sup>]</b>
<b>370</b>	950	0.10	0.050	0,225	74

Questo primo test è stato pensato in modo tale da testare le capacità di stampa della macchina e come i parametri utilizzati comunemente si adattino alla realizzazione di strutture lattice. Queste come detto sono caratterizzate da numerose *struts* circolari convergenti nei nodi della struttura. Il diametro delle *struts*, la loro lunghezza, il rapporto diametro lunghezza e l'orientazione con cui sono stampate sono tutti elementi nevralgici per l'ottenimento di un'accettabile qualità di stampa. Relativamente alla loro orientazione, particolarmente problematica risulta la costruzione degli elementi con forte *overangle* e nello specifico quelli più problematici da stampare sono quelli aventi asse parallelo al piano di stampa (direzione X). Si ricorda inoltre che strutture di questo tipo devono essere stampate senza supporti, in quanto la loro rimozione risulterebbe impossibile. Per indagare tutte queste problematiche è stato quindi progettato il primo *job* che ha previsto la realizzazione di 26 diverse strutture tra lattice e non. In Tabella 4.4 è riportata la finalità per cui tutte le strutture sono state stampate, raggruppandole per caratteristiche topologiche mentre in Figura 4.4 ne è riportata la progettazione.

Tabella 4.4-Descrizione strutture del Job I

<b>Componenti Job I</b>	<b>DESCRIZIONE COMPONENTE</b>
<b>da 01 a 06</b>	Cella <i>grid</i> per testare le <i>struts</i> orizzontali e verticali. Densità delle celle molto alta. Diametri delle <i>struts</i> crescenti da 0.1 a 1 in modo da testare anche la risoluzione minima di stampa. Analisi del raccordo al nodo sugli ultimi.
<b>07 a 14</b>	Cella <i>grid</i> . Provini con <i>struts</i> molto lunghe e diversi diametri per testare la possibilità di stampare a sbalzo al variare dei diametri e del raccordo al nodo.
<b>15 a 17</b>	Cella <i>grid</i> . Lunghezza media nel caso in cui non riuscisse a stampare le <i>struts</i> dei provini da 6 a 14.
<b>18 a 20</b>	Cella X per testare la possibilità di stampare travi inclinate di diverse lunghezze e diametri.

<b>21 e 22</b>	Celle di particolare geometria con features variegate come test generico.
<b>23 a 26</b>	Celle con travi quasi solo unidirezionali per valutare grandi lunghezze verticali, grandi sbalzi e diverse inclinazioni di stampa.

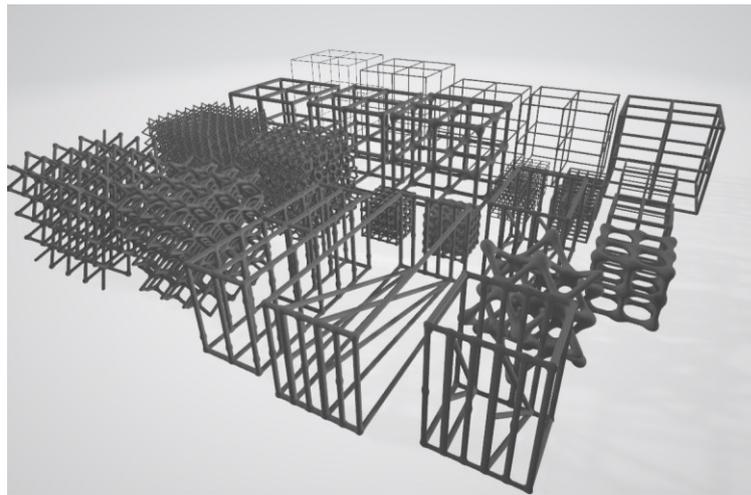


Figura 4.4-Progettazione del primo job

La Figura 4.5 mostra la descrizione e l’impiattamento di tutti i provini previsti nel primo Job.

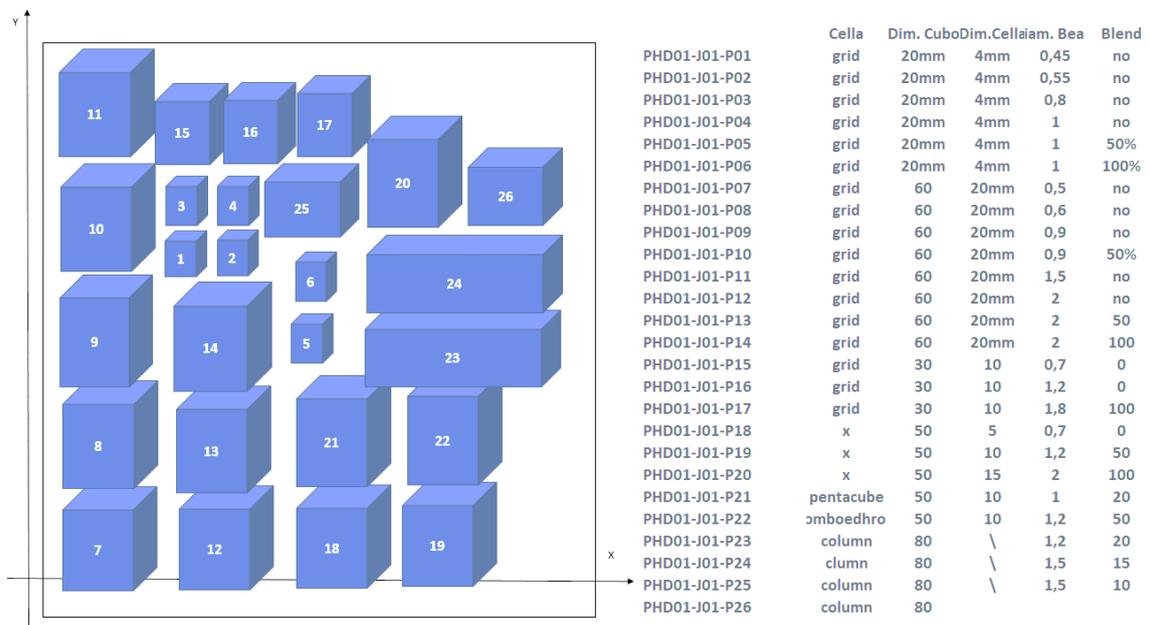


Figura 4.5-Primo piano di stampa

### 4.3.1 Risultati

Dei 26 provini facenti parte del *job* solo in 10 sono stati stampati completamente; tutti gli altri sono falliti prima di essere terminati.

Da questo risultato si possono trarre due conclusioni:

- La macchina non è stata in grado di stampare molte delle geometrie richieste per limiti di intrinseci alla tecnologia utilizzata.
- La macchina non è stata in grado di stampare molte delle geometrie richieste a causa di un set di parametri di stampa non idoneo.

In Figura 4.6 è mostrato il *job* in uscita dalla stampante.



Figura 4.6- Realizzazione Job I

Dall'analisi del *job* si è notato che i soli provini completamente stampati sono le strutture lattice con dimensione della cella contenuta. Tutte le altre strutture, progettate appositamente per valutare l'effettiva stampabilità di struts con grandi sbalzi e con elevati valori di snellezza, sono tutte fallite e da questo si può dedurre che sia un limite intrinseco della tecnologia produttiva. Nel caso della realizzazione di strutture con sbalzi elevati, durante la stampa delle struts in direzione X (parallele al piano di stampa), a causa dell'assenza di supporti, queste collassano sotto il loro stesso peso o vengo danneggiate dal wiper durante la stesura dei nuovi strati di polveri. In Figura 4.7 è rappresentata la

stampa di travi sia verticali che orizzontali a balzo. Nel primo caso ( $sx$ ) la stampa di un nuovo layer è pienamente supportata dal materiale solidificato precedentemente mentre, nel secondo caso ( $dx$ ), la stampa di un nuovo layer non è supportata. Nella realizzazione del layer a sbalzo il laser inizia a scansionare dalla colonna di sinistra, su cui legano le nuove polveri fuse, dopodiché scansionerà polveri non supportate fino ad arrivare al montante di destra su cui sarà effettuato il secondo punto di giunzione. Il layer così realizzato prende il nome di *bridge* e la sua realizzabilità è una delle *features* più complesse nel processo SLM. Quanto più sono lontani i due montanti (sbalzo maggiore) che fungono da punto di giunzione per il *bridge*, tanto più durante la sua stampa il materiale appena solidificato sarà soggetto a flessione causata dalla forza di gravità. Considerando inoltre che la dimensione del layer è di poche decine di micron, risulta quindi evidente che per sbalzi molto grandi il bridge collasserà sotto il suo stesso peso. A questo va aggiunto che se anche il *bridge* fosse realizzato correttamente, avrebbe comunque una sezione resistente molto ridotta e che non è detto riesca a resistere al passaggio del wiper senza danneggiarsi.

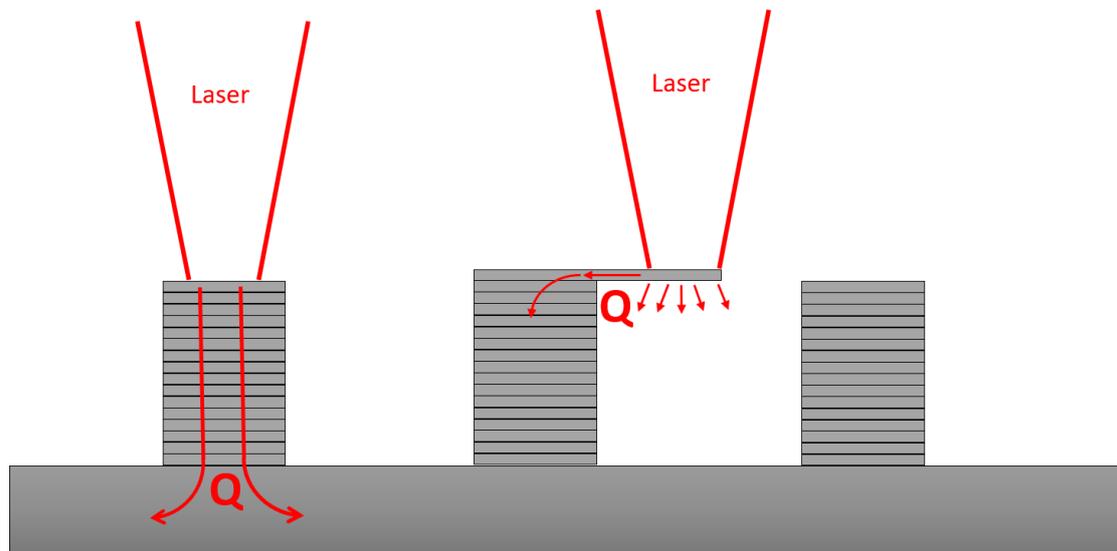


Figura 4.7-Processo di stampa e di smaltimento del calore  $Q$  in travi con asse perpendicolare ( $sx$ ) e parallelo ( $dx$ ) al piano di stampa

Tenendo conto di quanto detto ed analizzando quali strutture con cella cubica (grid) sono state stampate correttamente e quali no, si è giunti alla conclusione che per un layer

thickness di  $50\mu\text{m}$  il massimo rapporto tra diametro delle struts e dimensione di cella realizzabile è di circa  $1/10$ . Nel caso di utilizzo di un raccordo al nodo per le struts orizzontali si è visto che questo ha un effetto benefico sulla loro realizzazione riducendone, se pur leggermente, la dimensione dello sbalzo e aumentandone la resistenza. Come già accennato nell'introduzione, qualora le strutture siano state completamente stampate, c'è un altro problema che va considerato: la formazione di *satellites*. I *satellites* sono agglomerati di polveri che aderiscono alla struttura principale durante la stampa e sono un problema che affligge principalmente la realizzazione delle strutture lattice e questo perché la dimensione delle struts e del diametro del laser sono paragonabili. In Figura 4.8 sono mostrate alcune delle strutture completamente stampate e si può vedere come queste siano qualitativamente inaccettabili a causa della corposa formazione di questi agglomerati di polveri. Questi non influiscono solo sull'aspetto estetico delle strutture ma bensì ne variano pesantemente le proprietà meccaniche e la massa, oltre a poter fungere da innesco per la propagazione di cricche.

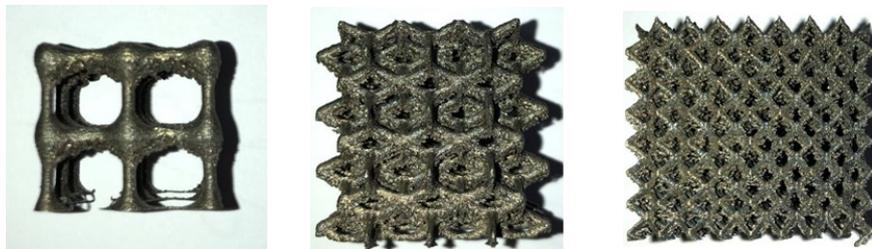


Figura 4.8-Formazione di satellites nelle strutture stampate

Oltre alle dimensioni paragonabili tra laser e struts che fa sì che il laser penetri ben oltre il perimetro da stampare, è anche lo smaltimento di calore che gioca un ruolo, se pur secondario, nella formazione di *satellites*. Nelle *beam* verticali, durante la stampa di un nuovo layer, essendo presente il materiale sottostante il calore trova sempre una strada semplice da percorrere verso il piatto di stampa e quindi viene smaltito rapidamente. Nelle *beam* orizzontali, ed in particolar modo nei primi strati di queste, il materiale sottostante è molto ridotto e per questo motivo il calore fa fatica a trovare materiale già stampato da percorrere verso il piatto, ristagna e diffonde verso le polveri circostanti che si addensano e restano attaccate alla struttura principale. Quanto detto è schematizzato in Figura 4.7. Il

discorso relativo al cattivo smaltimento di calore è supportato anche dall'evidenza che in prossimità dei nodi, zona dove il calore ristagna maggiormente, si ha una maggior quantità di *satellites*.

In base a quanto visto si è deciso quindi di realizzare un secondo job di stampa con l'obbiettivo di ricercare il set ottimale di parametri che permettesse la corretta stampa delle strutture lattice sia in termini dimensionali che di proprietà meccaniche.

#### 4.4 Ottimizzazione dei parametri di stampa: Job II

Rispetto a quanto visto in letteratura, nel nostro primo job sono stati usati sia un layer thickness che un diametro del fascio di dimensioni troppo prossime a quelle delle struts da stampare e questo spiega perché ci fossero così tante polveri adese alla struttura, specialmente nella parte sottostante le travi orizzontali (layer stampati direttamente sulle polveri). Nel secondo job si è quindi deciso di dimezzare l'altezza del layer, mantenendo costante il diametro del fascio per motivi di praticità. Il diametro del fascio laser è stato fissato a  $150\mu\text{m}$  e l'altezza del layer è stata ridotta a  $25\mu\text{m}$ .

Per determinare il set di parametri ottimo con cui stampare queste strutture sono state considerate quattro diverse tipologie di cella elementare e 6 diversi set di parametri, stampando un parallelepipedo lattice per ogni combinazione possibile tra struttura e set di parametri. In totale si sono stampati 24 provini. Si è proceduto poi con: i) analisi visiva, ii) analisi dimensionale, iii) test di compressione. Nella fase di misurazione delle *struts* per l'analisi dimensionale, sono state analizzate solo quelle verticali in quanto non affette dalla presenza dei *satellites* che ne avrebbero falsato la misurazione.

Le quattro tipologie di strutture scelte sono descritte in Tabella 4.5 e mostrate in Figura 4.9. La struttura 4 è come quella riportata in Figura 4.10 ma senza le *struts* di colore giallo.

Tabella 4.5-Descrizione strutture Job II

**Struttura n.1 (PHD01-J02-P01):**

- Grid, cella = 5mm;
- Diametro struts = 0.8mm;
- Volume Fraction =7.7%;
- No blend

**Struttura n.2 (PHD01-J02-P02):**

- Grid, cella=3mm;
- Diametro struts = 0.6mm;
- Volume Fraction =11%;
- Blend = 0.2mm;

**Struttura n.3 (PHD01-J02-P03):**

- rhombic dodecahedron, cella= 6mm;
- Diametro struts = 1 mm;
- Volume Fraction = 20.5%;
- Angolo struts = 26.5°
- Blend = 0.5mm

**Struttura n.4 (PHD01-J02-P04):**

- Simile a quella di Fig.1, cella =10mm;
- Diametro struts = 1.3mm;
- Volume Fraction = 12.8%;
- Blend = 0.5mm

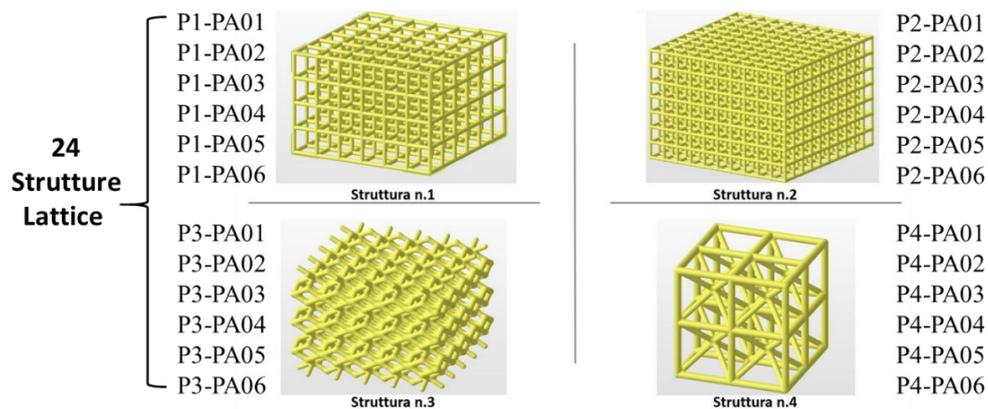


Figura 4.9-Progettazione e codifica piano di stampa

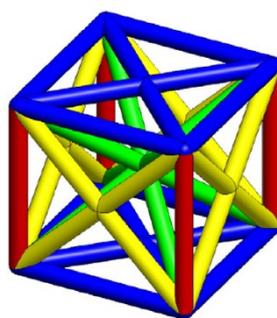


Figura 4.10- Struttura simile alla 4 con inclinazione delle struts di: blu 0°, verde 35,3°, giallo 45°, rosso 90 ° [35].

Le strutture n.1,2,4 sono le più difficile da stampare a causa della presenza delle *struts* orizzontali che, per quanto possibile, sarebbe sempre meglio evitare in fase di progetto. In queste tre strutture è stato inoltre analizzato l'effetto della dimensione della cella e quindi l'influenza dello sbalzo sulla stampabilità delle *struts* orizzontali. Nel lavoro [35] viene concluso addirittura che non sia possibile in nessun caso, e quindi considerando ogni effetto geometrico, stampare correttamente le travi orizzontali. La struttura n.3 è invece più facilmente stampabile in quanto presenta solo travi inclinate, se pur con un angolo rispetto all'orizzontale comunque basso. Si è deciso di stamparla in quanto strutture di questo tipo (*bending-dominated*) sono le più comunemente utilizzate nei casi in cui sia preponderante la necessità di massimizzare l'energia assorbita durante il loro schiacciamento.

In Tabella 4.6 sono riportati i sei set di parametri utilizzati in questo job ed in cui:

**PA01:** Parametro base per 25micron sviluppato dal fornitore.

**PA02:** Diminuzione densità di energia dovuta alla potenza

**PA03:** Diminuzione densità di energia dovuta alla velocità

**PA04:** Set proposto in [41]

**PA05:** Diminuzione densità di energia dovuta alla potenza e differente *contour offset*

**PA06:** Proposto ed analizzato nel lavoro [42]

Tabella 4.6-Set di parametri utilizzati nel Job II

Set Name	Power [W]	Scan Speed [mm/s]	Hatch Space [mm]	Contour Offset [mm]	Energy Density [J/mm <sup>3</sup> ]
PA01	200	1050	0,105	0,225	72,6
PA02	180	1050	0,105	0,225	65,3
PA03	200	1165	0,105	0,225	65,4
PA04	150	700	0,105	0,075	81,6
PA05	180	1165	0,105	0,075	58,9
PA06	130	900	0,105	0,040	55,0

In totale sono stati realizzati 24 provini cubici con 4 diverse tipologie di celle elementari e sei diversi set di parametri e la cui codifica è riportata in Figura 4.9.

#### 4.4.1 Risultati

In Figura 4.11 è mostrato il Job II in uscita dalla stampante.

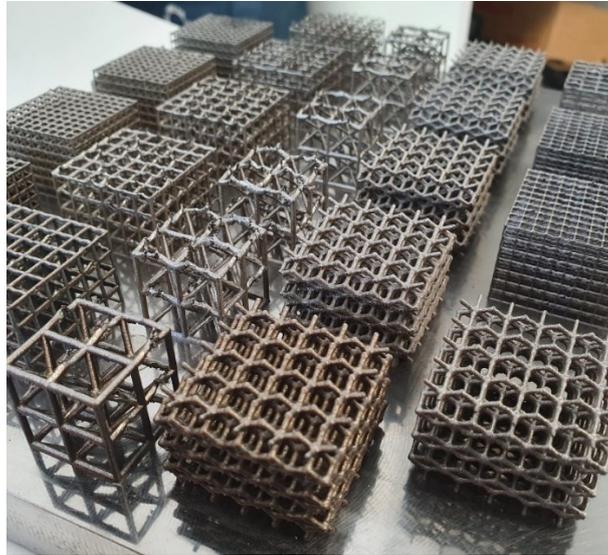


Figura 4.11-Realizzazione Job II

Da una prima analisi visiva, sia dell'intero job (Figura 4.11) che dei singoli provini, si nota immediatamente che i risultati ottenuti sono in media decisamente migliori rispetto a quelli del job precedente. La quantità di polveri adese alla struttura principale risulta fortemente diminuita o quasi scomparsa sulle travi inclinate. Restano comunque presenti *satellites* nella parte sottostante alle *struts* orizzontali. Le strutture caratterizzate da un'elevata snellezza delle travi orizzontali risultano quelle stampate peggio, con travi rotte o comunque con difettosità che le rendono inaccettabili. Nella sezione successiva saranno esaminati nel dettaglio i risultati relativi a tutte le strutture stampate.

### **ANALISI VISIVA E DIMENSIONALE**

Come già detto precedentemente, la struttura 1 è caratterizzata da una cella elementare di tipo *grid*, di 5mm e con un diametro delle *struts* di 0,8mm. Lo sbalzo risulta quindi piuttosto grande se paragonato al diametro delle *struts*. Le strutture stampate con i 6 diversi set risultano complessivamente riuscite male con molte *struts* rotte o comunque affette da fortissima difettosità (Figura 4.13). I campioni con i parametri PA01, PA02 e PA03 risultano stampati particolarmente male, con la maggior parte delle *struts*

fortemente difettate. In particolar modo quella stampata con il parametro PA02 risulta essere l'unica che non garantisce la complessiva continuità strutturale. Le altre due invece, se pur fortemente difettate, sembrano piuttosto solide. Le strutture stampate con i parametri PA04, PA05 e PA06 sono state visibilmente stampate meglio, con *struts* più spesse e una minor difettosità. In Figura 4.12 sono riportate le misurazioni fatte sulle *struts* verticali. Si nota come dei 6 set parametri utilizzati solo il 4 e il 5 siano quelli che producono *struts* delle dimensioni pari alla nominale. I primi 3 parametri sono sotto il valore nominale del 35% circa e l'ultimo lo supera dell'11%.

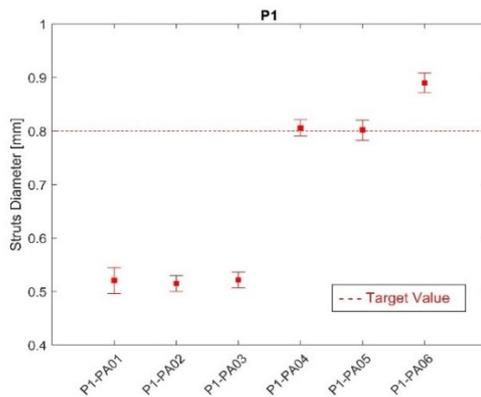


Figura 4.12-Analisi dimensionale P1

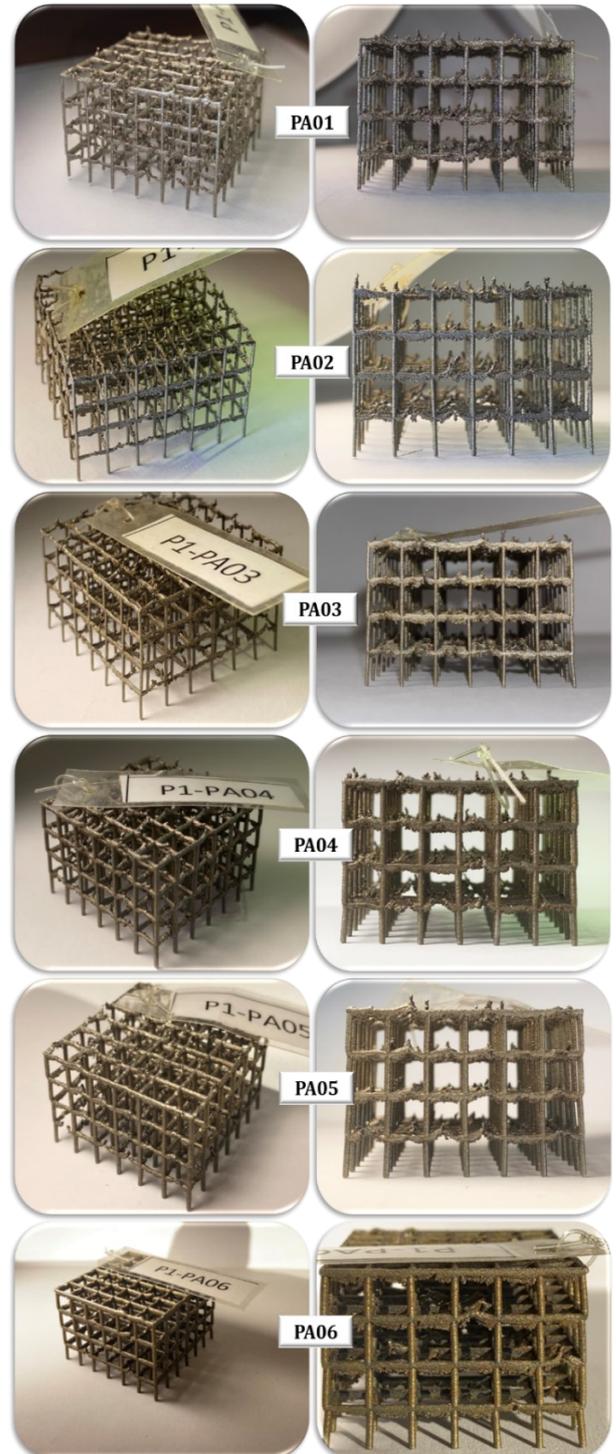


Figura 4.13-Struttura 1 al variare dei parametri di stampa

La struttura 2 è caratterizzata da una cella elementare di tipo *grid* di dimensione 3mm. Le *struts* sono spesse 0,6mm, ancora piuttosto snelle. Come si può vedere dalla Figura 4.15, i campioni risultano tutti stampati adeguatamente, mostrando una solida continuità strutturale. Nonostante le *struts* risultino più sottili rispetto al caso precedente, la difettosità è diminuita drasticamente, non mostrando travi spezzate. Da questo si evince ancor di più quanto la snellezza delle travi orizzontali giochi un ruolo chiave nella loro stampabilità. Una discreta quantità di *satellites* è presente se pur in maniera inferiore rispetto al primo job. In Figura 4.14 sono mostrati i risultati dell'analisi dimensionale. Si nota un trend del tutto simile a quanto osservato in precedenza.

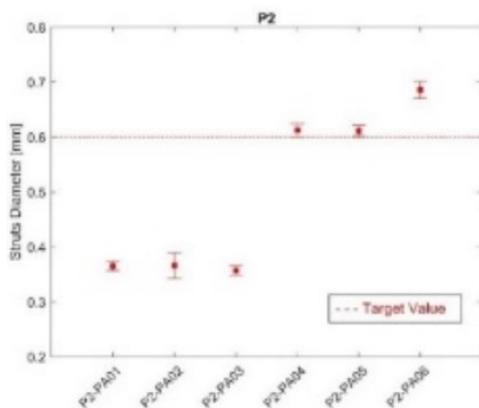


Figura 4.14-Analisi dimensionale P2

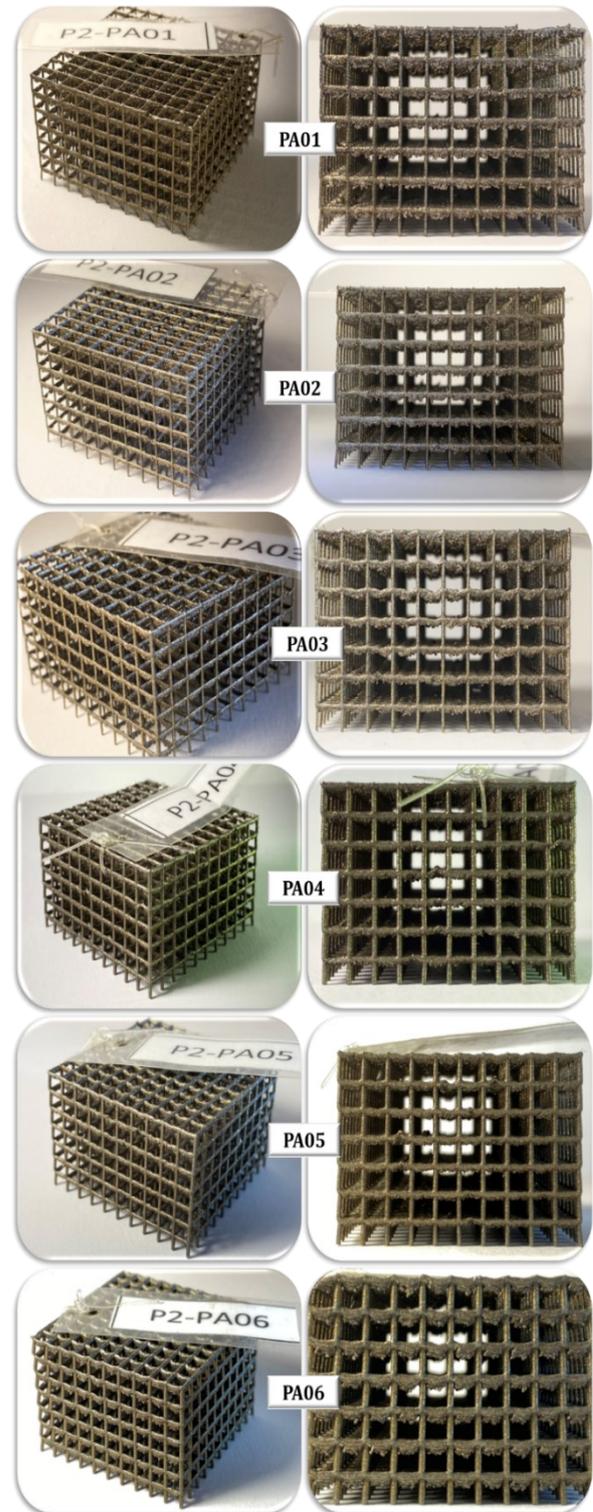


Figura 4.15-Struttura 2 al variare dei parametri di stampa

La struttura 3 è una *rhombic dodecahedron* con cella da 6mm e diametro delle *struts* di 1 mm. Rispetto all'orizzontale, l'angolo con cui sono stampate le *struts* è di  $26.5^\circ$ . I campioni sono stati stampati tutti correttamente (Figura 4.17), con bassa difettosità e scarsa presenza di satellites. In particolar modo, le strutture stampate con i primi tre set di parametri sembrano essere quelle stampate meglio. Dall'analisi dimensionale di Figura 4.16 si nota che la tendenza è sempre la stessa, con i primi tre set che danno risultati al di sotto del nominale, il quarto e quinto pari circa al nominale e il sesto al di sopra.

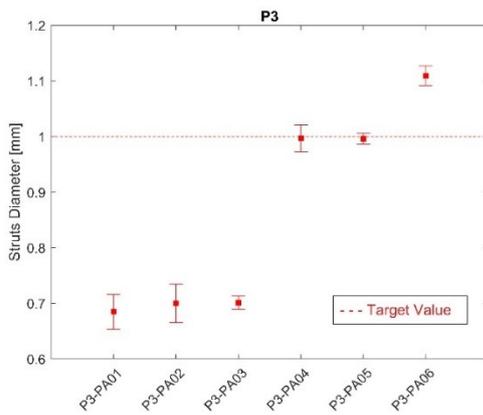


Figura 4.16-Analisi dimensionale P3

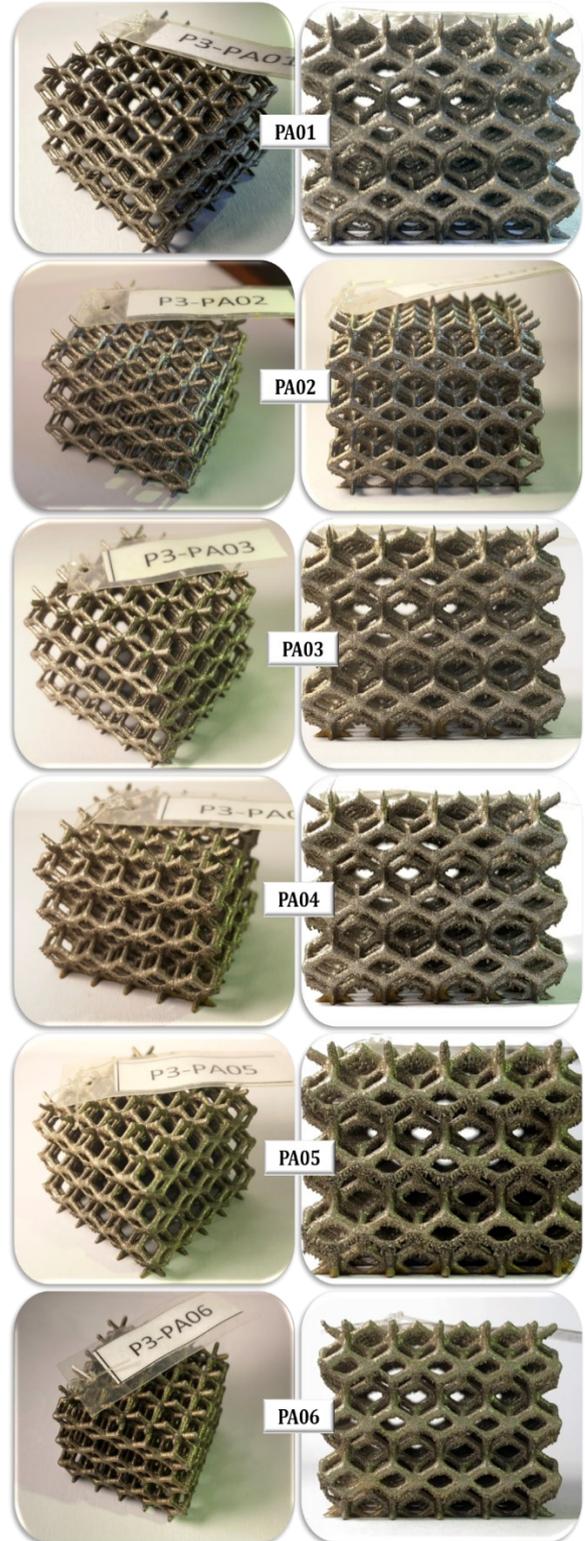


Figura 4.17-Struttura 3 al variare dei parametri di stampa

La struttura 4 è una cella personalizzata che permettere di studiare travi stampate a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , e  $35^\circ$ . La dimensione della cella è di 10mm e il diametro delle *struts* di 1.3mm. Analizzando la Figura 4.19, si nota che le travi orizzontali sono quasi tutte fallite a causa dell'eccessiva dimensione della cella elementare. La quantità di setellites al di sotto delle travi orizzontali è fortemente diminuita, mentre al di sotto delle travi inclinate a  $35^\circ$  sono praticamente assenti. Dall'analisi dimensionale di Figura 4.18 si conferma lo stesso *trand* visto per le strutture precedenti.

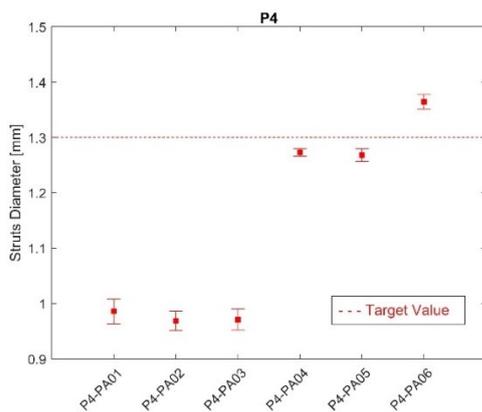


Figura 4.18-Analisi dimensionale P4

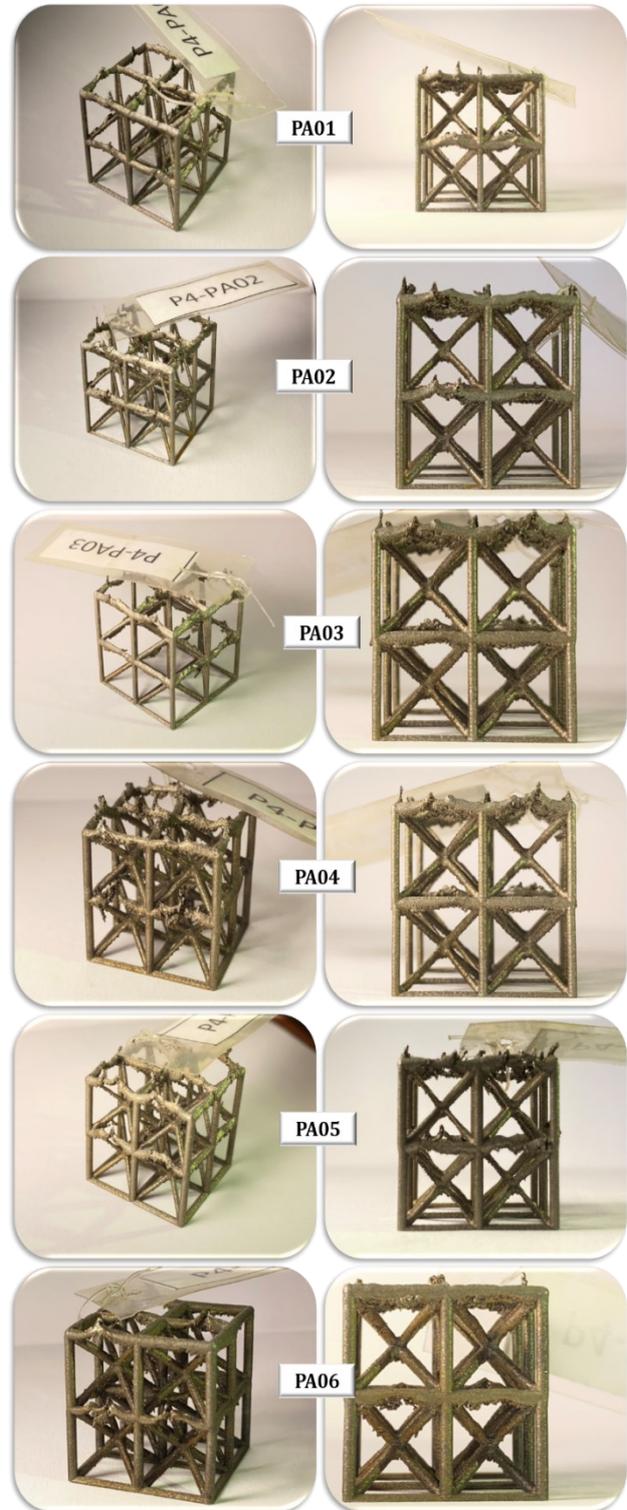


Figura 4.19-Struttura 4 al variare dei parametri di stampa

## **PROVE DI COMPRESSIONE**

Per poter valutare il miglior parametro con cui stampare strutture lattice come quelle prodotte, si è deciso di procedere oltre che con analisi visive e dimensionali anche con test di compressione; in questo modo è stato possibile poterne valutare l'integrità e le performance strutturali. In Figura 4.20 sono riportate le curve di compressione normalizzate. La normalizzazione è stata effettuata tenendo conto del meccanismo di cedimento delle diverse strutture (instabilità per carico di punta per la cella grid e flessione per la cella rombica) e dividendo quindi la forza misurata per il fattore geometrico appropriato. Per la cella grid, osservando che il paragone viene fatto fra strutture aventi tutte la stessa dimensione della cella elementare è stato usato come fattore di normalizzazione il momento di inerzia mentre, per la cella rombica, il modulo di rigidezza flessionale. Questo approccio ha permesso di analizzare i risultati indipendentemente dall'errore dimensionale commesso ed esposto nelle sezioni precedenti. Come si nota dai grafici, il parametro PA01 risulta essere quello che porta ad una migliore risposta meccanica indipendentemente dalla struttura considerata, portandoci a concludere che questo parametro sia quello che produce complessivamente struts con una minor difettosità.

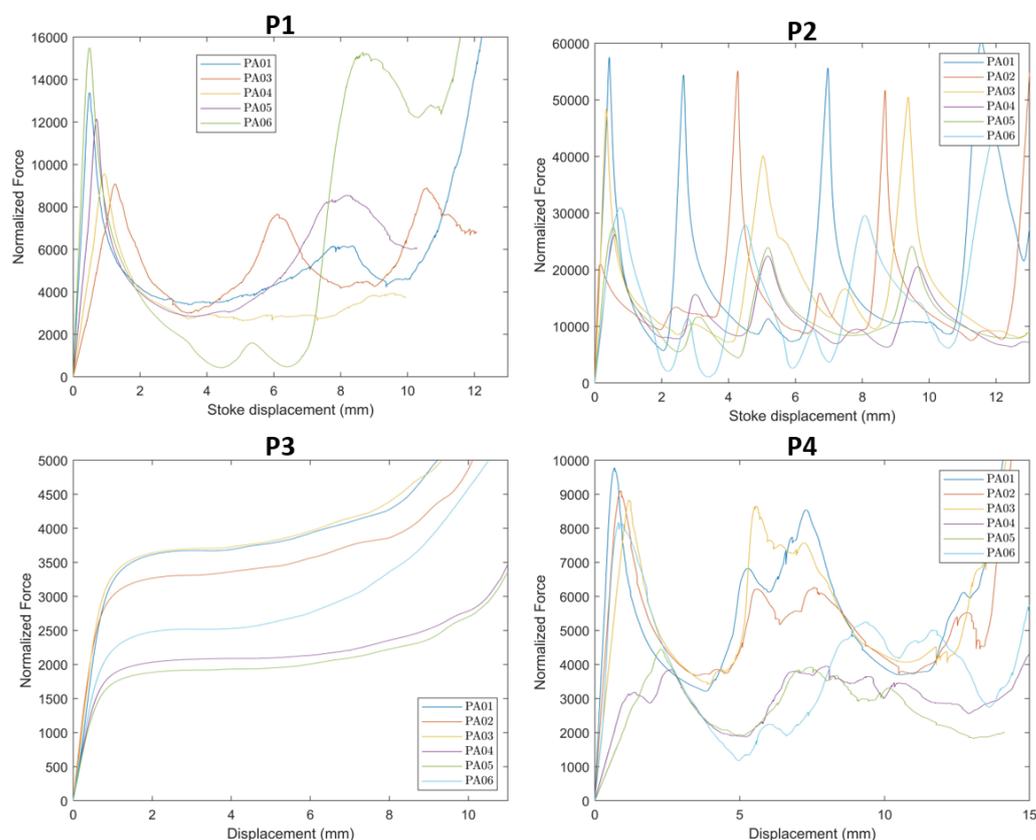


Figura 4.20-Curve di compressione normalizzate

## 4.5 Conclusioni

### Analisi visiva

Dall' analisi visiva si è notato subito un netto miglioramento rispetto al job precedente. Questo risultato è stato imputato alla diminuzione dello spessore del *layer*, passato da  $50\mu\text{m}$  a  $25\mu\text{m}$ . La dimensione del *layer* influisce, a parità di densità di potenza, direttamente sulla percentuale di penetrazione del laser. Come detto nei richiami teorici, il laser deve penetrare sempre per una profondità maggiore dello spessore del *layer* e questo fa sì che quando si stampano i primi strati si finisca inevitabilmente per creare dei *satellites*. Più è piccolo il *layer*, minore sarà la quantità di cui deve penetrare il laser, meno saranno i *satellites* che si formano nei *layer* che appoggiano sulle polveri. Un ulteriore passo avanti nei confronti di questa problematica potrebbe essere quello di diminuire la dimensione del fascio laser al minimo valore possibile. Questa soluzione porterebbe una drastica diminuzione delle dimensioni delle *melt pools* che si formano e

quindi anche della zona termicamente alterata ad esse associata. Così come concluso nel lavoro [35], a causa della loro forte difettosità e nonostante spesso garantiscano comunque continuità strutturale, si sconsiglia la progettazione di strutture lattice aventi *struts* parallele al piano di stampa.

### Analisi dimensionale

Dall'analisi dimensionale condotta su tutte le strutture, si nota un *trand* comune. In particolare: i) i parametri PA01, PA02 e PA03 producono sempre *struts* di dimensione inferiore rispetto a quella nominale; ii) i parametri PA04 e PA05 producono *struts* di dimensione pari a quella nominale; iii) il parametro PA06 produce *struts* di dimensioni superiori di quelle nominali.

I primi tre set, così come il quarto e il quinto, hanno solo il *contour offset* che li accomuna (Tabella 4.7). Nei primi tre parametri il valore del *contour offset* era troppo grande mentre nel sesto troppo piccolo e questo ha prodotto rispettivamente travi troppo piccole e troppo grandi. Il valore corretto era quello impostato per i set PA04 e PA05. Si è quindi presupposto che le dimensioni delle *struts* dipendano esclusivamente da questo parametro. Gli altri parametri, come la potenza del fascio o la velocità di scansione, nei range analizzati ed in generale nei range che permettono una buona riuscita delle stampe, non sembrano influire sulla dimensione delle *struts*. Si è quindi individuato l'ottimo dimensionale per un valore del *contour offset* di 75 $\mu$ m.

Tabella 4.7-Valori del Contour Offset

SET	CONTOUR OFFSET [ $\mu$ m]
PA01	225
PA02	225
PA03	225
PA04	75
PA05	75
PA06	40

## **Analisi test di compressione**

I test di compressione sono stati condotti in modo da avere informazioni utili sulle performance meccaniche delle strutture stampate e su come queste siano influenzate dai parametri di stampa. La difettosità, sia macroscopica che microscopica, influenza direttamente le proprietà meccaniche e quindi, conducendo opportuni test, si riesce ad ottenere un quadro generico sulla bontà delle stampe. In questo caso sono state condotte prove di compressione in regime quasi statico (velocità traversa=1 mm/min) e le curve ottenute sono state opportunamente normalizzate così da permettere un confronto diretto tra i parametri di stampa. Avendo attribuito al valore del *contour offset* la responsabilità degli errori dimensionali e considerato questo un parametro puramente geometrico, si è proceduto con la normalizzazione delle curve in modo da rendere le risposte indipendenti dal valore del diametro delle *struts*. A valle di questa analisi si può affermare con certezza che il miglior set di parametri risulta essere il PA01.

In conclusione, considerando il *contour offset* un parametro puramente geometrico e non influente sulla qualità di stampa se non per l'aspetto dimensionale, si può concludere il lavoro affermando che il miglior set di parametri con cui stampare le strutture lattice in 17-4PH è:

PA01 + Contour Offeset a 75 $\mu$ m
-------------------------------------

# Capitolo 5

## Caratterizzazione del materiale base

Come visto nel capitolo precedente, per la corretta stampa di strutture lattice in 17-4PH è stato sviluppato un set di parametri che permettesse di ottimizzarne la produzione sia in termini dimensionali che di caratteristiche meccaniche. A valle del lavoro svolto ci si è quindi allontanati dall'utilizzo dei parametri indicati dal fornitore di polveri e per i quali erano già state fornite alcune proprietà meccaniche riportate in Tabella 4.2. Per procedere quindi alla corretta progettazione di strutture lattice in 17-4PH si è deciso di intraprendere una campagna di caratterizzazione del materiale. L'obiettivo di questa fase è stato quello di sviluppare un modello versatile per la curva di flusso plastico del materiale e che tenga quindi conto, oltre che delle proprietà statiche, anche dell'effetto della temperatura, della velocità di deformazione e dell'orientazione di stampa. Strutture di questo tipo vengono spesso impiegate come elementi di assorbimento d'urto in fenomeni dinamici e che quindi coinvolgono sia l'aspetto termico che l'effetto *strain rate*.

### 5.1 Materiali e Metodi

#### 5.1.1 Geometria dei provini

Come sarà esposto dettagliatamente nel seguito, per la completa caratterizzazione del materiale, sono state condotte diverse tipologie di test meccanici e per tutti si è utilizzata la stessa geometria dei provini (Figura 5.1). Tenendo conto che le struts che compongono le strutture lattice hanno solitamente diametri piuttosto contenuti, il tratto calibrato dei provini per i test è stato realizzato quanto più piccolo possibile senza però compromettere

l'attendibilità delle prove. Così facendo si è cercato di contrastare quanto più possibile un eventuale effetto scala che avrebbe potuto rendere non corretto l'utilizzo della curva di flusso plastico sviluppata per la modellazione delle strutture lattice. I provini in oggetto sono stati ricavati per tornitura di cilindretti precedentemente stampati con diverse orientazioni. In Figura 5.2 è riportato l'intero terzo job stampato nel quale è possibile vedere, oltre alle strutture lattice che saranno discusse nel capitolo successivo, anche i cilindretti in questione stampati a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

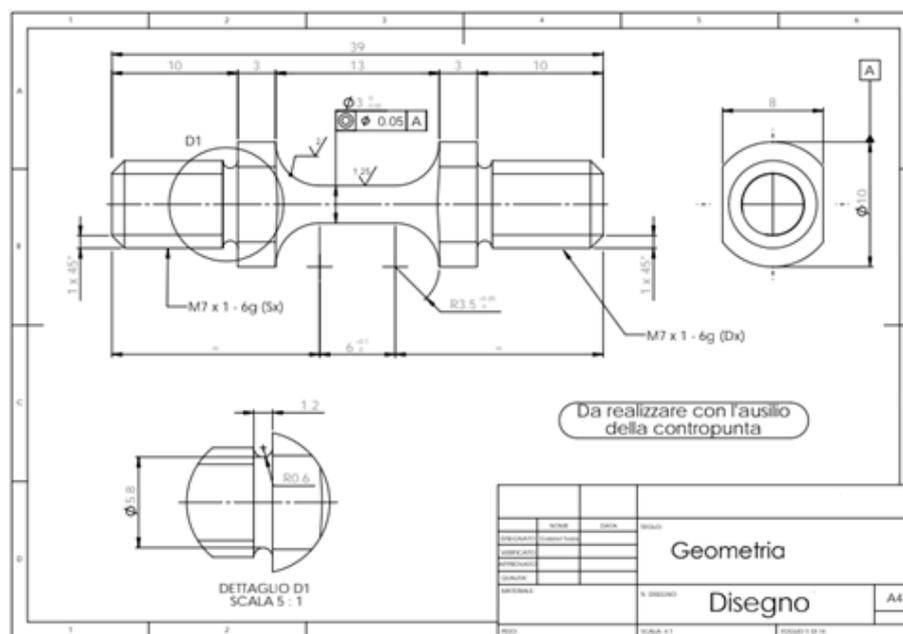


Figura 5.1-Geometria provini

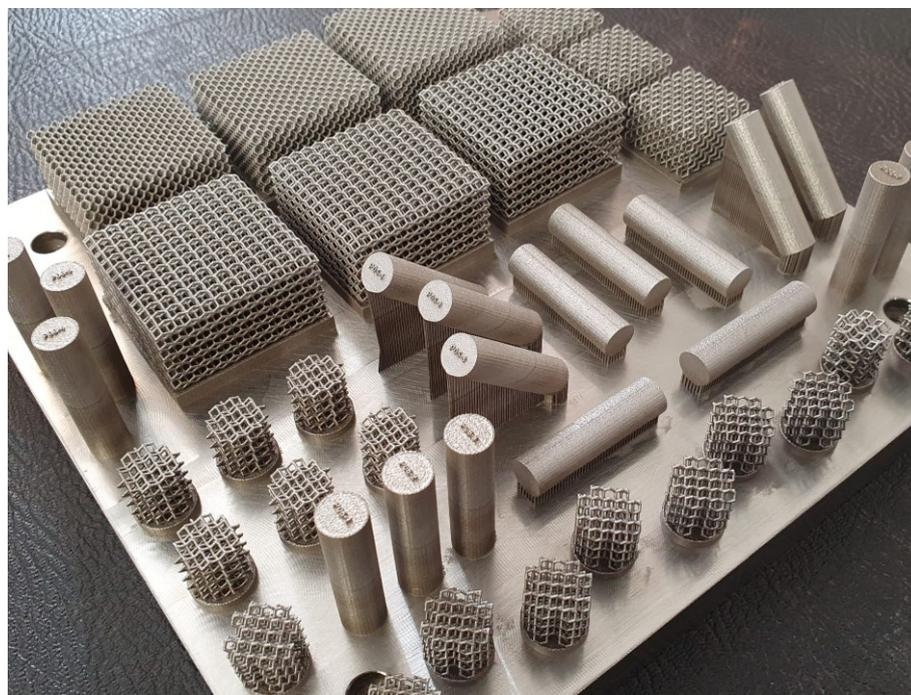


Figura 5.2-Terzo job di stampa

### 5.1.2 Trazione uniassiale

Per i test di trazione è stata utilizzata una macchina Instron Serie 5582 dotata di cella di carico da 100kN e calibrata da ente certificato. Data la dimensione ridotta del tratto utile del provino, per la misurazione delle deformazioni è stato utilizzato un sistema di acquisizione DIC (*Digital Image Correlation*), oltre che un estensometro posto sugli afferraggi. L'apparato di prova è riportato in Figura 5.3. I test sono stati condotti in accordo con la normativa ASTM E8 / E8M ad una velocità di 1mm/min, garantendo così una strain rate di  $10^{-3}s^{-1}$ . In totale sono stati testati 6 provini, 2 per ogni direzione di carico. La loro codifica è riportata in Tabella 5.1.



Figura 5.3-Apparato per test quasi statici di trazione

Tabella 5.1-Codifica e descrizione provini per test a trazione quasi statica e temperatura ambiente

Codifica	Descrizione
QS-X-1, QS-X-2	Provini per trazione quasi statica stampati con asse parallelo al piatto di stampa
QS-XZ-1, QS-XZ-2	Provini per trazione quasi statica stampati con asse a 45° rispetto al piano di stampa
QS-Z-1, QS-Z-2	Provini per trazione quasi statica stampati con asse perpendicolare al piano di stampa

### 5.1.3 Trazione uniassiale in temperatura

Si è utilizzata la stessa attrezzatura del caso precedente ad esclusione del sistema di acquisizione DIC poiché il tratto utile non era visibile. Per il riscaldamento del provino è stato utilizzato un sistema ad induzione con controllo retroattivo e con doppio monitoraggio della temperatura mediante termocoppie. In Figura 5.4 è riportata

un'immagine dell'apparato di prova. In questo caso sono stati condotti tre test in totale, uno per ogni direzione di stampa e la cui codifica è riportata in Tabella 5.2.

*Tabella 5.2- Codifica e descrizione provini per test a trazione quasi statica e in temperatura*

<b>Codifica</b>	<b>Descrizione</b>
<b>QS-T-X-1</b>	Provino per trazione quasi statica stampato con asse parallelo al piatto di stampa e testati a 110°C
<b>QS-T-XZ-1</b>	Provino per trazione quasi statica stampato con asse a 45° rispetto al piano di stampa e testati a 110°C
<b>QS-T-Z-1</b>	Provino per trazione quasi statica stampato con asse perpendicolare al piano di stampa e testati a 150°C



*Figura 5.4-Apparato per test quasi statici di trazione in temperatura*

#### 5.1.4 Barra di Hopkinson

La prova con barra frazionata di Hopkinson (split Hopkinson bar) è un metodo di prova dei materiali verificato e collaudato. A differenza delle macchine di prova quasi statiche, la barra Hopkinson consente di determinare le proprietà dei materiali in condizioni dinamiche. Questa tipologia di test è stata utilizzata per determinare dinamicamente le costanti della curva di flusso plastico del materiale in condizione di elevati strain rate. Il campione di materiale è posizionato fra due barre, quella incidente e quella trasmittente. Il cosiddetto percussore percuote la barra incidente proiettando un'onda meccanica nella barra incidente. Questo impulso corre lungo la prima barra fino a raggiungere il provino in cui in parte sarà riflesso ed in parte trasmesso, attraversando il campione, alla seconda barra. Attraverso l'installazione di estensimetri sulle superfici della barra incidente e della barra trasmittente viene misurata la loro deformazione, dando la possibilità di valutare l'entità dell'impulso incidente, riflesso e trasmesso. In Figura 5.5 e Figura 5.6 sono riportate la barra utilizzata ed un focus sul provino interposto tra barra incidente e trasmittente. L'apparato di prova utilizzato per l'attività sperimentale non adopera un percussore per generare l'impulso nella barra incidente ma sfrutta quello generato dalla frattura fragile di un provino intagliato. A prescindere dal modo con cui viene prodotto l'impulso incidente la teoria per l'analisi dei dati resta la stessa.



*Figura 5.5-Split Hopkinson Bar frazionata*



*Figura 5.6-Provino interposto tra barra incidente e trasmittente*

In Figura 5.7 è invece riportato lo schema di funzionamento della barra di Hopkinson con le equazioni che permettono di ricavare il legame  $\sigma$ - $\varepsilon$  del materiale relativo al livello di strain rate raggiunto.

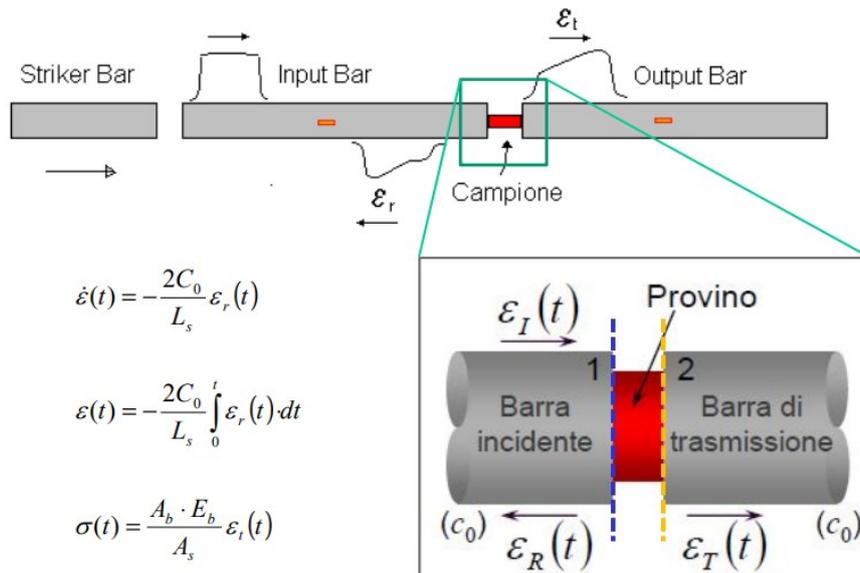


Figura 5.7-Approfondimento barra di Hopkinson frazionata

In cui:

- $\dot{\varepsilon}(t)$  è lo strain rate raggiunto durante la prova;
- $\varepsilon(t)$  è la deformazione;
- $\varepsilon_r(t)$  è l'onda riflessa e misurata dall'estensimetro sulla barra incidente;
- $\varepsilon_t(t)$  è l'onda trasmessa e misurata dall'estensimetro sulla barra trasmittente;
- $\sigma(t)$  è la tensione;
- $C_0$  è la velocità del suono nel materiale delle barre;
- $E_b$  è il modulo di Young del materiale di cui sono composte le barre;
- $A_b$  è la sezione delle barre;
- $L_s$  è la lunghezza del provino;
- $A_s$  è la sezione trasversale del provino;

In totale sono stati condotti otto test di cui quattro su provini stampati in direzione Z divisi su due diversi livelli di strain rate, due in direzione X e due in direzione XZ. In tabella è riportata la codifica utilizzata.

Tabella 5.3-Codifica e descrizione dei provini per test dinamici

<b>Codifica</b>	<b>Descrizione</b>
<b>DL-X-1; DL-X-2</b>	Provino per trazione dinamica stampato in direzione X e con valore dell'impulso incidente LOW
<b>DL-XZ-1; DL-XZ-2</b>	Provino per trazione dinamica stampato in direzione XZ e con valore dell'impulso incidente LOW
<b>DL-Z-1; DL-Z-2</b>	Provino per trazione dinamica stampato in direzione Z e con valore dell'impulso incidente LOW
<b>DH-Z-1; DH-Z-2</b>	Provino per trazione dinamica stampato in direzione Z e con valore dell'impulso incidente HIGH

## 5.2 Risultati

Durante la fase di sperimentazione, per problemi tecnici, sono andati perduti i dati relativi ai test QS-XZ-2 e QS-X-1 e pertanto non saranno presenti nei grafici.

Prima di passare all'analisi dei risultati va sottolineato che le curve  $\sigma$ - $\epsilon$  ottenute nei vari test, sono da ritenersi veritiere fino al raggiungimento del valore massimo di tensione (necking), valore oltre il quale la curva non può più considerarsi attendibile. La calibrazione della curva di flusso plastico del materiale anche in fase post-necking sarà effettuata nel Capitolo 7 mediante l'utilizzo di software CAE (Computer-Aided Engineering).

### 5.2.1 Trazione uniassiale

I risultati dei test di trazione sono riportati in Figura 5.8.

Dall'analisi delle curve  $\sigma$ - $\varepsilon$  ottenute si può notare che i provini stampati in direzione XZ e X hanno comportamento pressoché identico, con uno snervamento più basso ed un incrudimento più accentuato rispetto ai provini in direzione Z. Il provino QS-Z-1 rispetto al QS-Z-2 sembra aver sopportato una deformazione molto minore e questo probabilmente è da ascrivere alla presenza di un difetto più critico rispetto alla norma.

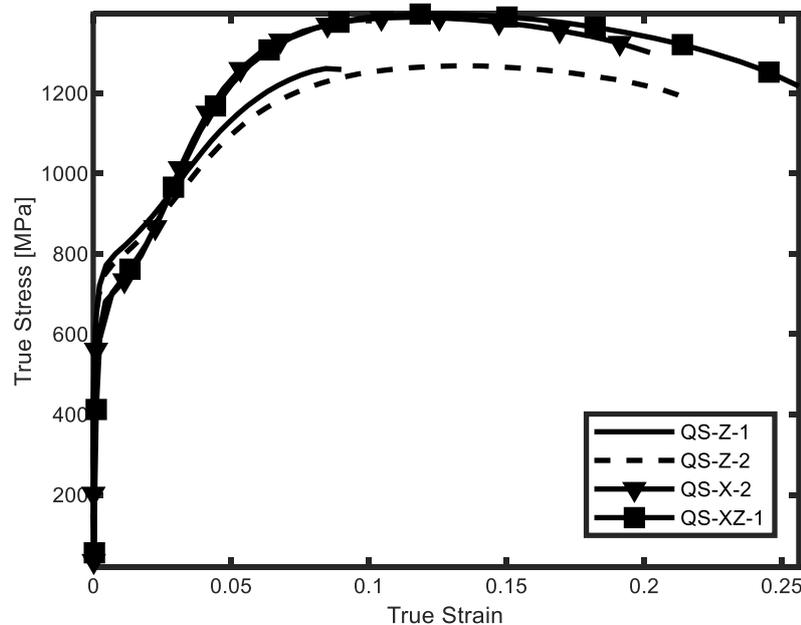


Figura 5.8-Risultati test di trazione a temperatura ambiente

### 5.2.2 Trazione uniassiale in temperatura

I risultati dei test di trazione in temperatura sono riportati in Figura 5.9.

Dall'analisi delle curve ottenute si può notare uno strano comportamento del materiale, probabilmente riconducibile al fenomeno del *Dynamic Strain Aging (DSA)*, comune in metalli di questo tipo [43]. A differenza delle prove condotte in temperatura ambiente in questo caso il materiale non ha più un forte carattere incrudente post snervamento ma bensì, a meno del DSA, un valore di plateau della tensione fino a rottura. Anche in questo

caso i provini stampati in direzione X e XZ hanno lo stesso comportamento, mentre per il provino stampato lungo Z non lo si può confrontare direttamente con gli altri essendo stato testato ad una temperatura maggiore. In Figura 5.10 è riportato il confronto tra le curve ottenuto con le prove di trazione quasi statiche in temperatura ed a temperatura ambiente. Da questo confronto si nota che sembra essere decisamente aumentato il limite della tensione in campo elastico, riducendo però notevolmente l'incrudimento del materiale.

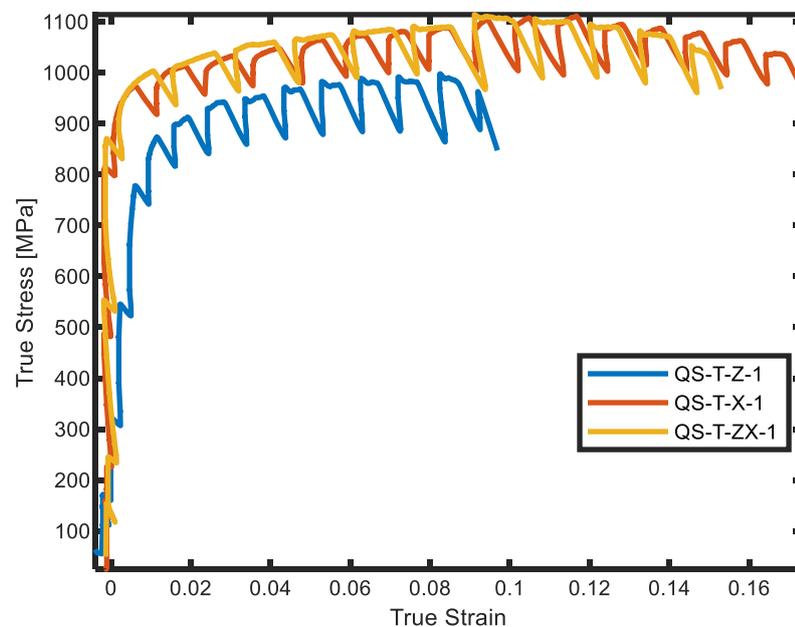


Figura 5.9-Risultati test di trazione in temperatura

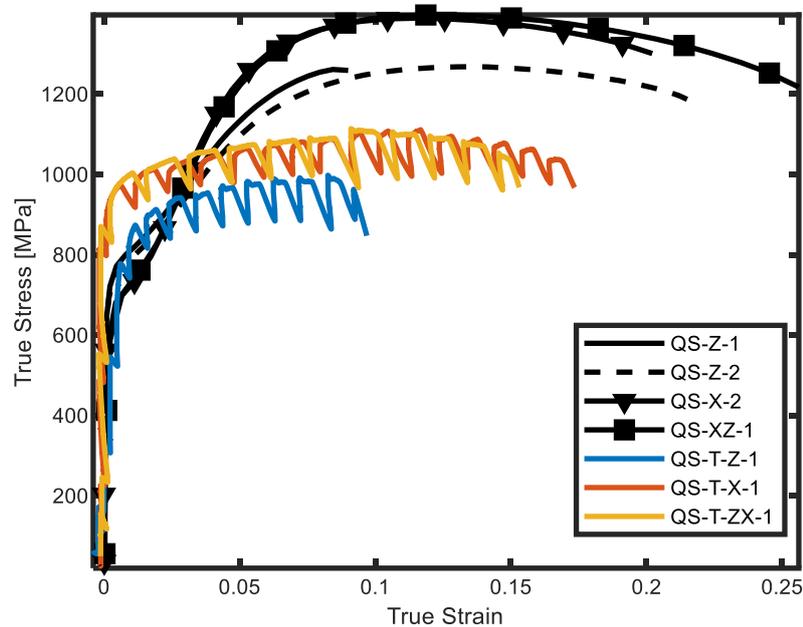


Figura 5.10-Influenza della temperatura sulla risposta meccanica del materiale

### 5.2.3 Barra di Hopkinson

Nei test condotti alla barra frazionata di Hopkinson non è possibile controllare direttamente il valore di strain rate con il quale ricavare la caratteristica del materiale ma lo si può fare indirettamente controllando l'intensità dell'impulso generato. Questo comporta che nonostante si vogliano effettuare più prove allo stesso livello di strain rate non lo si riesce a fare con precisione. Durante questa fase di caratterizzazione di sono cercati di raggiungere due diversi livelli di velocità di deformazione:

- 1)  $1 \times 10^3 \text{s}^{-1}$
- 2)  $2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$

Al primo livello, riconoscibile grazie all'utilizzo della lettera L (LOW) all'interno della codifica dei provini, sono condotti due test per ogni direzione di stampa. Al secondo livello invece, indicato con la lettera H (HIGH), sono stati testati solo due provini lungo la direzione Z. Nelle figure sottostanti, sono riportati i livelli di strain rate e le curve  $\sigma$ - $\epsilon$  vere ottenute durante la campagna sperimentale. In entrambi i casi, le curve sono state raggruppate per direzione di stampa. Dalle analisi dei risultati ottenuti vale la pena notare che per i provini X e XZ ad un leggero aumento dello strain rate rispetto al valore

nominale non corrisponde un incremento della caratteristica meccanica nella stessa direzione. Questo perché normalmente in prove di questo tipo, per notare un trend della risposta rispetto al valore della velocità deformazione utilizzato, bisogna muoversi su variazioni di ordini di grandezza. Relativamente ai provini stampati lungo Z, che si ricorda essere gli unici testati a due livelli di strain rate ben distinti (Figura 5.15), si può notare che la risposta sia coerente con i livelli di strain rate utilizzati (Figura 5.16). In Figura 5.17 sono riportate tutte le curve ottenute durante questa fase di sperimentazione (in cui le differenti direzioni di stampa sono accumulate dal colore), dando così la possibilità di valutare un eventuale effetto dell'orientazione stampa sulla risposta dinamica del materiale. Quello che si nota è che tutte le prove condotte, a meno di DL-X-2, sembrano essere molto simili. Vale la pena evidenziare che le quattro prove sui provini Z, condotte a due con due livelli di strain rate ben distinti, sembrano contenute tra le due prove XZ condotte con lo stesso livello di strain rate. Alla luce di quanto visto sembra corretto affermare che non si nota una diretta influenza dell'orientazione di stampa sulla risposta dinamica del materiale.

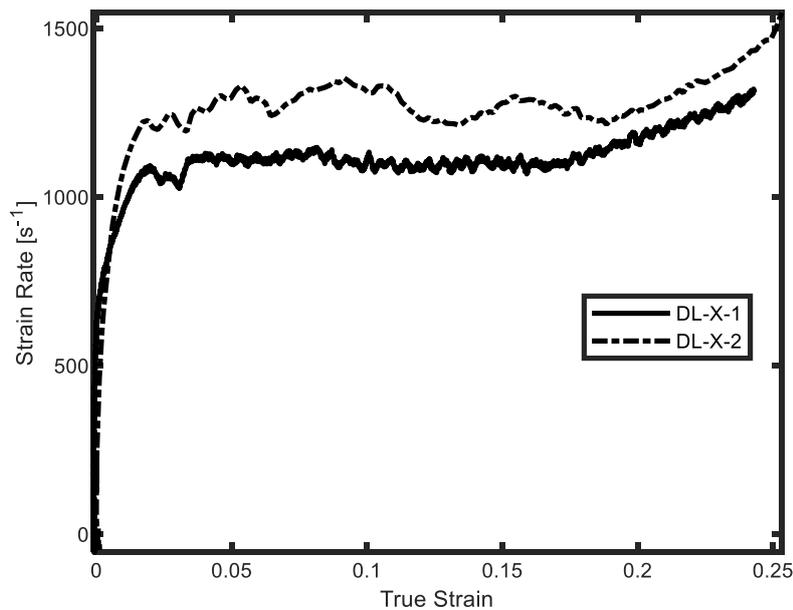


Figura 5.11-Valori di strain rate raggiunti durante i test sui provini stampati in direzione X

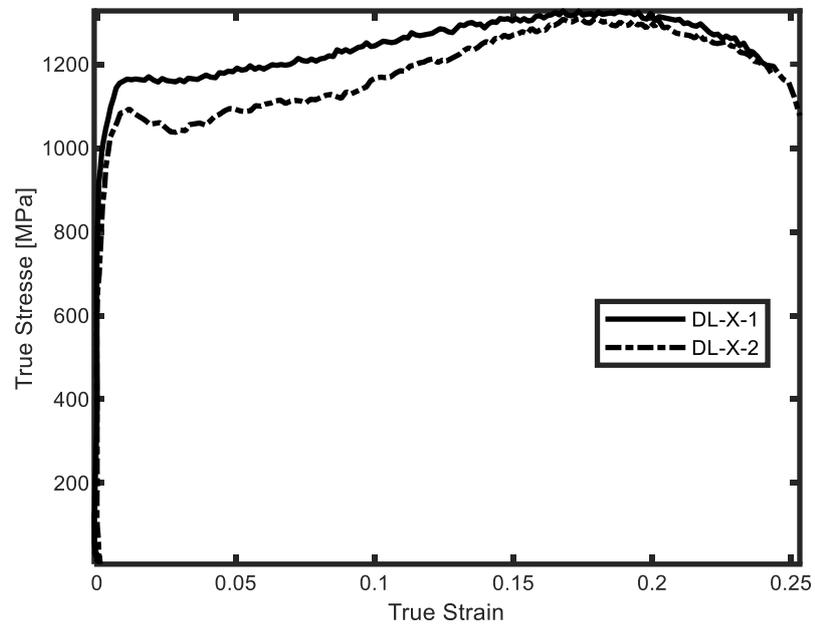


Figura 5.12-Risultati test alla barra di Hopkinson per i provini stampati in direzione X

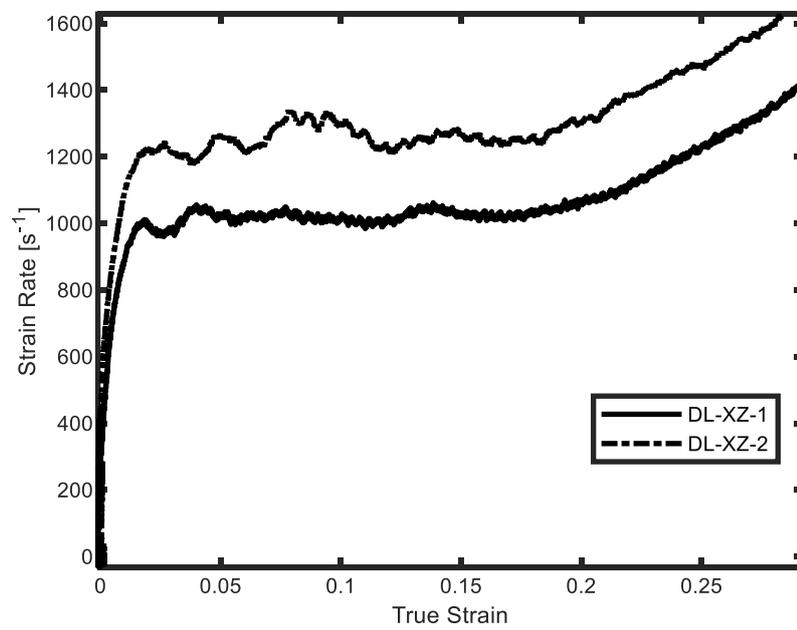


Figura 5.13-Valori di strain rate raggiunti durante i test sui provini stampati in direzione XZ

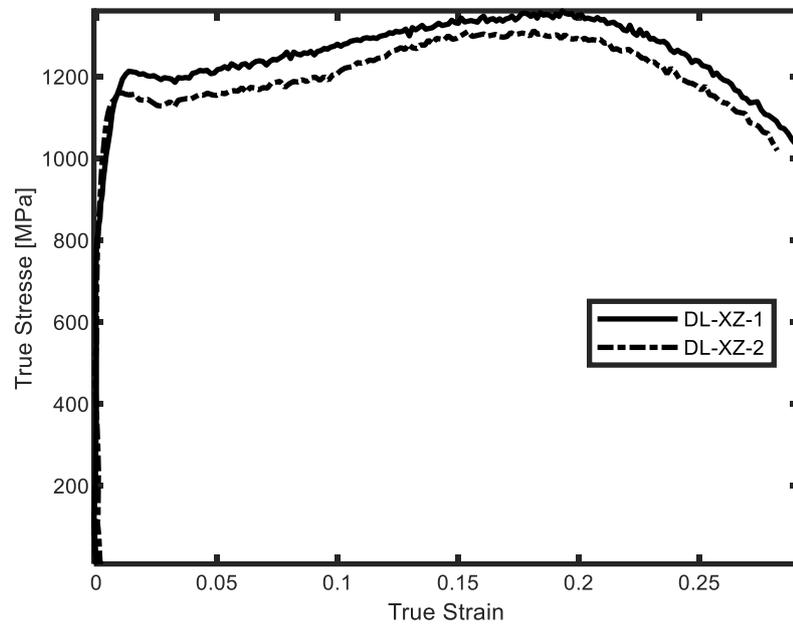


Figura 5.14-Risultati test alla barra di Hopkinson per i provini stampati in direzione XZ

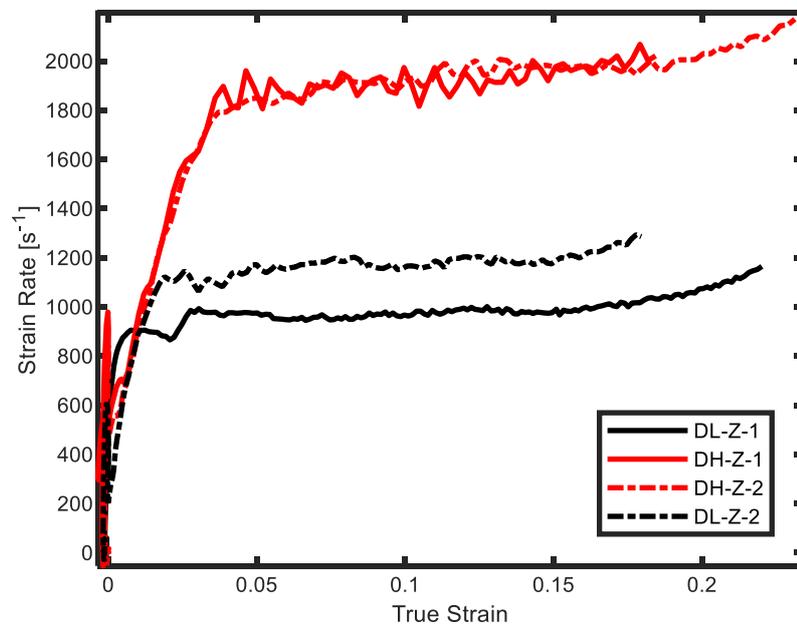


Figura 5.15-Valori di strain rate raggiunti durante i test sui provini stampati in direzione Z

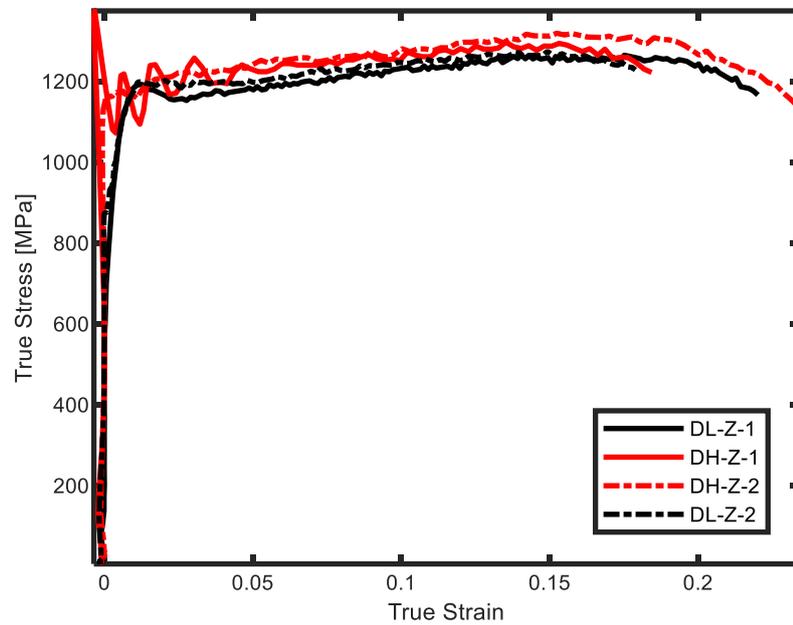


Figura 5.16-Risultati test alla barra di Hopkinson per i provini stampati in direzione Z

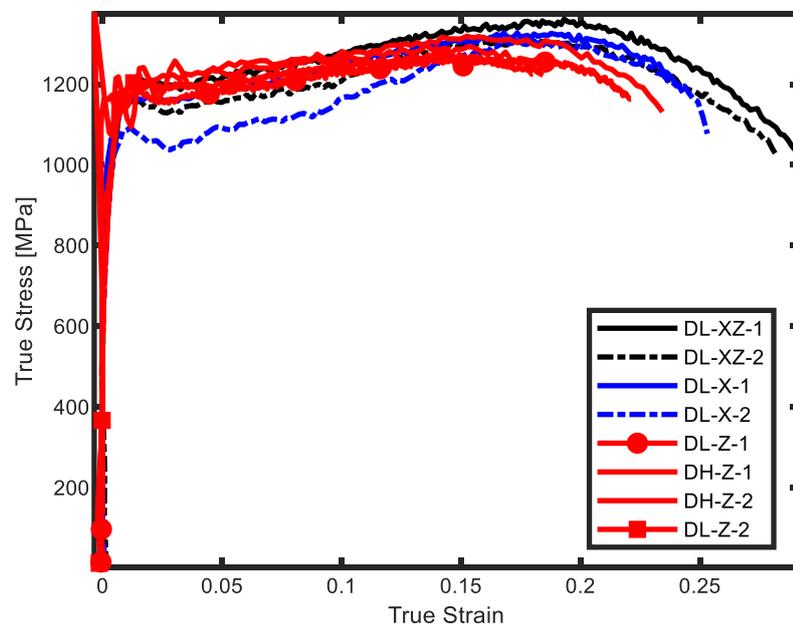


Figura 5.17-Influenza dell'orientazione di stampa sulla risposta dinamica alla barra di Hopkinson

In Figura 5.18 è riportata una sequenza di frames che mostrano un test esempio condotto alla barra di Hopkinson.



*Figura 5.18-Frames del processo di deformazione e rottura dei provini testati alla barra di Hopkinson*

### 5.3 Conclusioni

In questo capitolo è stata trattata la caratterizzazione del materiale base utilizzato per la stampa delle strutture lattice. I provini realizzati sono stati ricavati tramite processo di stampa SLM con differenti orientazioni rispetto al piano di stampa (indicate con X, XZ e Z) per essere poi rifiniti con un tornio a controllo numerico. Sono state condotte prove di trazione in regime quasi statico sia a temperatura ambiente che a temperature maggiori e prove di caratterizzazione dinamica mediante barra frazionata di Hopkinson. Per ogni tipologia di test sono stati testati provini in tutte e tre le direzioni di stampa menzionate e sono stati confrontati i risultati ottenuti.

I test di trazione a temperatura ambiente hanno evidenziato una forte dipendenza della risposta meccanica dalla direzione di stampa ed in particolare, i provini di tipologia Z, hanno mostrato un valore di snervamento più alto rispetto agli altri ma con un minor incrudimento. I risultati relativi alle direzioni di stampa X e XZ invece sono risultati pressoché identici.

I test di trazione in temperatura invece hanno mostrato un comportato del materiale riconducibile al fenomeno del Dynamic Strain Aging (DSA), frequente in materiali di questo tipo ma solitamente per valori di temperatura e strain rate diversi da quelli adottati. Questo fenomeno non si riscontra sui test effettuati alla barra di Hopkinson nonostante anche in questo caso si raggiungano temperature paragonabili con quelle delle prove di trazione effettuate. Si è deciso pertanto di approfondire questo comportamento del materiale in separata sede.

I test dinamici non hanno mostrato un trend evidente della risposta del materiale dalla direzione di stampa, tendendo ad uniformare le risposte ottenute.

In Figura 5.19 è mostrato un grafico riportante la risposta del materiale per tutte e tre le tipologie di test effettuati. Dalla sua analisi si riesce immediatamente a notare una forte dipendenza del legame  $\sigma$ - $\epsilon$  sia dalla temperatura che dalla velocità di deformazione e pertanto risulta evidente come nella progettazione di strutture lattice stampate in 17-4PH, così come probabilmente anche per altri materiali, sia indispensabile tenere conto di questi effetti.

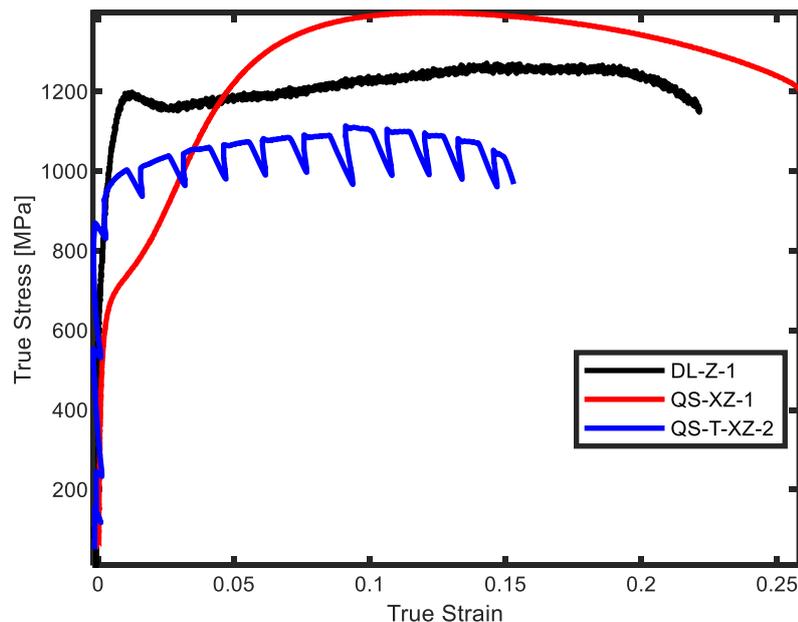


Figura 5.19-Confronto tra test di trazione quasi statico, quasi statico in temperatura e dinamico



# Capitolo 6

## Test strutture lattice

Per sviluppare una corretta metodologia di progettazione delle strutture lattice si è deciso di intraprendere un'approfondita campagna sperimentale, avente come obiettivo quello di comprendere meglio il comportamento di queste strutture sotto diversi stati sollecitativi. Dopo aver caratterizzato il comportamento del materiale base si è deciso quindi in questa fase di analizzare come la forte complessità geometrica dei soldo cellulari influisca sulle proprietà macroscopiche delle strutture. Essendo queste principalmente impiegate sfruttando la loro capacità di resistenza e deformazione a compressione [30,34,40,44–47] si sono indagati questi due aspetti.

### 6.1 Materiali e Metodi

La tecnologia utilizzata per la stampa delle strutture lattice è la SLM, vista ed approfondita già precedentemente mentre il materiale utilizzato è l'acciaio 17-4PH, di cui si è già discussa la caratterizzazione. Il set di parametri utilizzato per la stampa delle strutture lattice è quello ottenuto nel Capitolo 4 a valle di un processo di studio ed ottimizzazione dei parametri di stampa.

Le lattice sono state progettate mediante i software CAD nTopology e Netfabb della Autodesk.

A valle del processo di stampa le struts delle varie strutture prodotte sono state misurate mediante micrometro laser MICROEPSILON per valutarne la conformità al progetto. La

densità relativa è stata calcolata mediante metodo di Archimede pesando i provini in aria ed in alcool isopropilico con grado di purezza al 99,9% [48][49].

I test condotti per la caratterizzazione delle strutture lattice sono stati:

- 1) Test di compressione quasi statica in accordo con la normativa ISO13314[50];
- 2) Test di compressione dinamica;
- 3) Test balistici;

Per i test di compressione quasi statica e dinamica sono state utilizzate le stesse attrezzature descritte nel Capitolo 5 mentre per i test balistici è stato utilizzato il cannone a gas mostrato in Figura 6.1 e con le seguenti caratteristiche:

- Pressione massima 150 bar
- Propellente: aria/elio
- Velocità fino a 1000 m/s
- Prove in vuoto fino a 8 mbar

Per gli spari sono stati usati proiettili sferici in acciaio, con diametro da 18,25mm e sono state raggiunte velocità di circa 200m/s.



*Figura 6.1-Cannone a gas utilizzato per i test balistici*

Per la caratterizzazione delle strutture lattice sono state scelte due diverse tipologie di celle elementari:

- 1) Diamond
- 2) Rhombic Dodecahedron

La due celle utilizzate sono riportate in Figura 6.2.

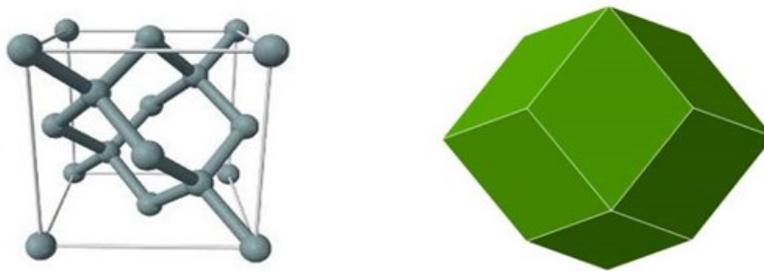


Figura 6.2-Celle elementari utilizzate: a sx la diamond e a dx la rhombic dodecahedron

La diamond è formata da 16 struts, inclinate con un angolo di  $45^\circ$  rispetto all'orizzontale, e 14 nodi e si è scelta in quanto è una delle più utilizzate e studiate data l'isotropia geometrica che la caratterizza [29,30,47,51]. In questa cella tutte le struts sono inclinate di  $45^\circ$  rendendola isotropa rispetto alle direzioni di sollecitazione e di stampa. La cella rombica è invece caratterizzata da 24 struts, inclinate con un angolo di  $22.5^\circ$  rispetto all'orizzontale, e 14 vertici ed è di forte interesse scientifico per il suo elevato fattore di impacchettamento e la capacità di assorbire grandi quantità di energia [24,29,46] ed è stata inoltre già studiata nel Capitolo 4.

In totale sono state prodotte tre diverse tipologie di provini:

- 1) Provini a sezione quadrata 30x30x20mm (solo diamond)
- 2) Provini a sezione quadrata 50x50x30mm (sia diamond che rhombic)
- 3) Provini a sezione circolare di raggio 8mm e altezza 16mm (sia diamond che rhombic)

Della tipologia 1) sono stati stampati solo provini diamond essendo già stati testati a compressione nel Capitolo 4 provini rombici stampati con lo stesso set di parametri e con

la stessa forma. Della tipologia sia 2 ) che 3) sono stati realizzati provini sia diamond che rhombic.

In Figura 6.3 sono riportate le immagini CAD delle tre tipologie di provini.

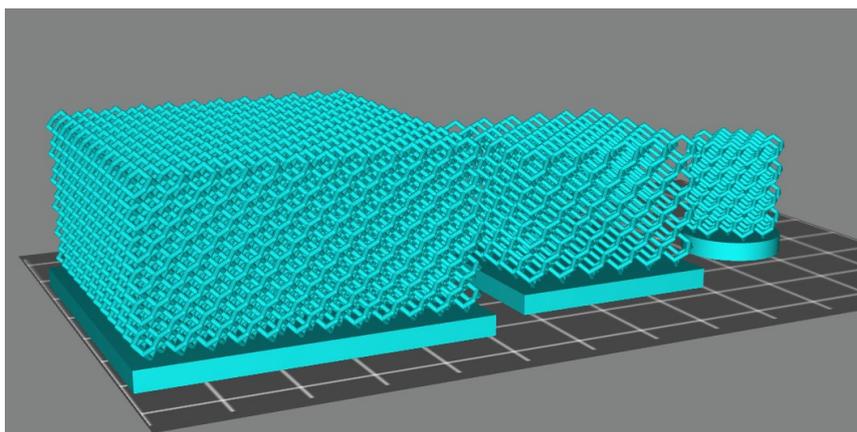


Figura 6.3-Progettazione CAD delle tre diverse tipologie di provino con cella Diamond.

In Tabella 6.1 sono riassunte le caratteristiche geometriche nominali e la codifica delle strutture progettate:

Tabella 6.1-Descrizione e dimensione nominali strutture lattice

<i>Tipologia provino</i>	<b>Cella</b>	<b>Codifica</b>	<b>Quantità</b>	<b>Dimensione Cella [mm]</b>	<b>Dimensione struts [mm]</b>	<b>Volume Fraction [%]</b>
<i>1</i>	Diamond	D1	3	5	0.7	8.71
<i>2</i>	Diamond	D2	2	4	0.7	13.77
<i>2</i>	Rhombic	R2	2	4	0.7	17.03
<i>3</i>	Diamond	D3	8	4	0.7	11.88
<i>3</i>	Rhombic	R3	8	4	0.7	12.80

In totale sono state stampate 23 strutture lattice.

## 6.2 Risultati

### 6.2.1 Dimensioni e densità relativa

In Figura 5.2 è riportata un'immagine del job completo. In Figura 6.4 è riportato il risultato della produzione degli stessi tre provini di Figura 6.3.

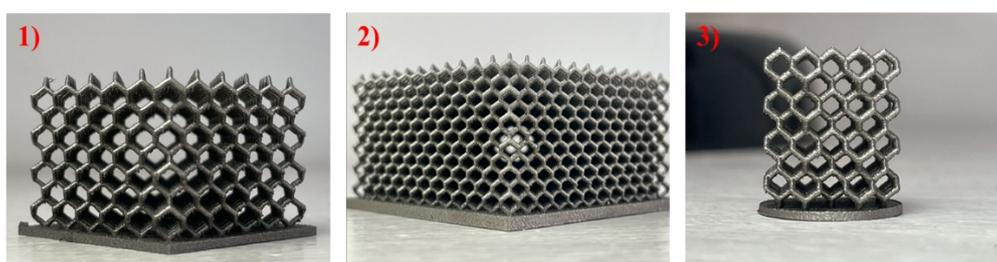


Figura 6.4-Provini stampati di tipo 1), 2) e 3) con cella Diamond.

In Figura 6.5 sono riportate le distribuzioni Gaussiani dei raggi misurati sia per le strutture di tipo diamond che rombiche. Nel caso delle strutture diamond si è misurata una media di 0.333mm con una distribuzione standard di 0.020mm mentre, per la cella rombica, una media di 0.332mm ed una deviazione standard di 0.018mm. In entrambi casi la distanza dal valore nominale risulta inferiore ai due centesimi di millimetro con una distanza tra le medie di un solo micron.

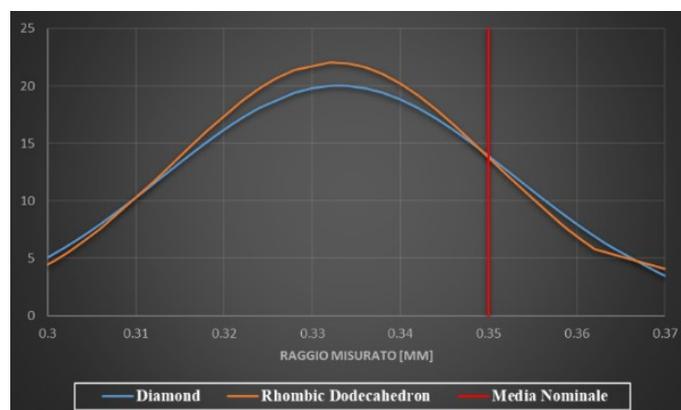


Figura 6.5-Risultati analisi dimensionale

Tabella 6.2 sono riportate le misure di volume fraction effettuate mediante metodo di Archimede ed il loro confronto con quelle di progetto. Si può notare come queste siano

sempre leggermente inferiori al valore nominale, risultato dettato da un valore misurato delle struts in media inferiore rispetto a quello di progetto.

*Tabella 6.2-Misure Volume Fraction*

Provino	Volume Fraction nominale [%]	Volume Fraction Mist [%]
D1-01	8.71	7.47
D1-02	8.71	7.26
D1-03	8.71	7.53
D2-01	13.77	13.03
D2-02	13.77	13.38
R2-01	17.03	18.16
R2-02	17.03	19.91
D3-01	11.88	10.67
D3-02	11.88	10.73
D3-03	11.88	10.32
D3-04	11.88	7.91
D3-05	11.88	10.20
D3-06	11.88	10.64
D3-07	11.88	10.25
D3-08	12.80	10.83
R3-01	12.80	13.33
R3-02	12.80	12.08
R3-03	12.80	11.94
R3-04	12.80	13.11
R3-05	12.80	12.84
R3-06	12.80	12.87
R3-07	12.80	12.36
R3-08	12.80	12.43

## 6.2.2 Compressione

Sono stati condotti test di compressione uniassiale in regime quasi statico sui provini di tipo 1 e tipo 3. In Figura 6.6 sono riportate le curve forza spostamento ottenuto per i provini con cella diamond di tipo 1, messe poi a confronto con la stessa tipologia di provini ma con cella rhombic dodecahedron (Figura 6.7). Il valore della forza di plateau è più alto per la cella rhombic rispetto alla diamond e questo risultato è in linea con il legame esistente tra questa grandezza e la densità relativa. Infatti, al crescere della densità

relativa (o volume fraction) aumenta sia il valore dello stress (o forza) di plateau che il valore dello snervamento [24]. La cella rhombic avendo una volume fraction maggiore tenderà ad arrivare prima alla fase di densificazione finale rispetto al diamond.

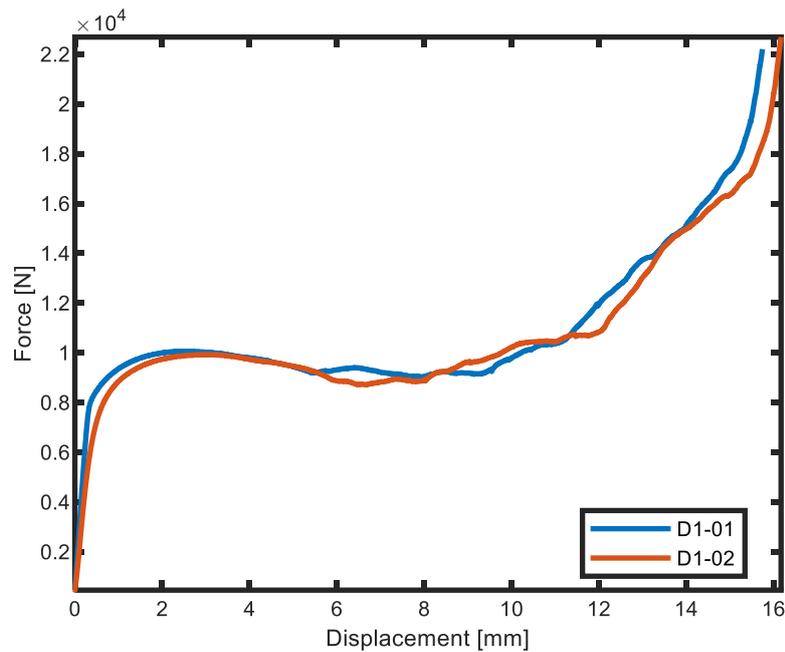


Figura 6.6-Compressione uniassiale su provini di tipo 1

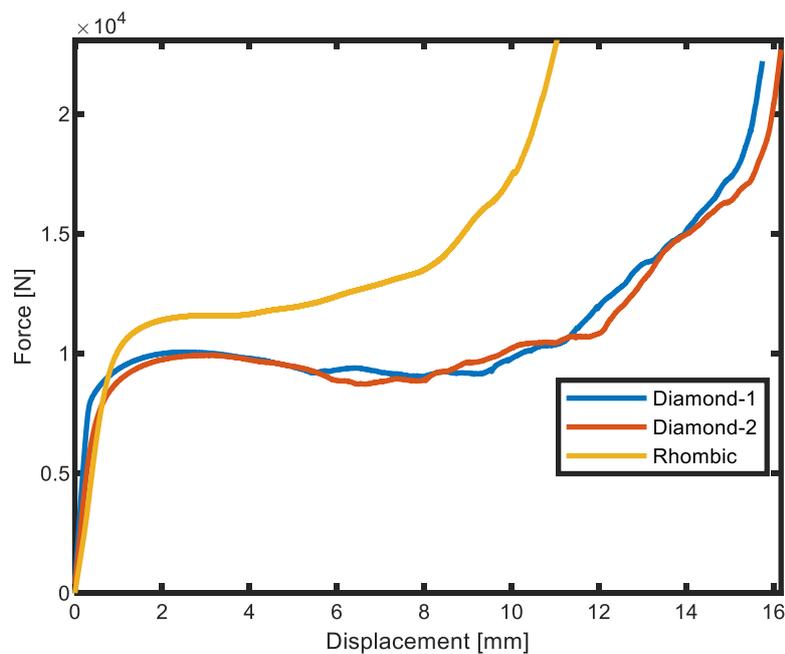


Figura 6.7-Confronto test di compressione uniassiale su provini di tipo 1 diamond e rhombic dodecahedron

In Figura 6.8 sono mostrate le curve ottenute per i provini, sia diamond che rhombic, di topologia 3. Il comportamento di questi provini, essendo composti da sole 4 celle lungo il diametro e l'altezza, risente di forti effetti di bordo che si riflettono sulla risposta meccanica. In Figura 6.9 sono riportate tre diverse immagini relative alla compressione graduale della struttura D3 e si può notare come la deformazione non sia uniforme ma bensì sembra si abbiano fenomeni di instabilità localizzati. Questo comportamento non si è avuto su nessuna delle due strutture D1 testate, strutture composte da un maggior numero di celle nelle diverse direzioni.

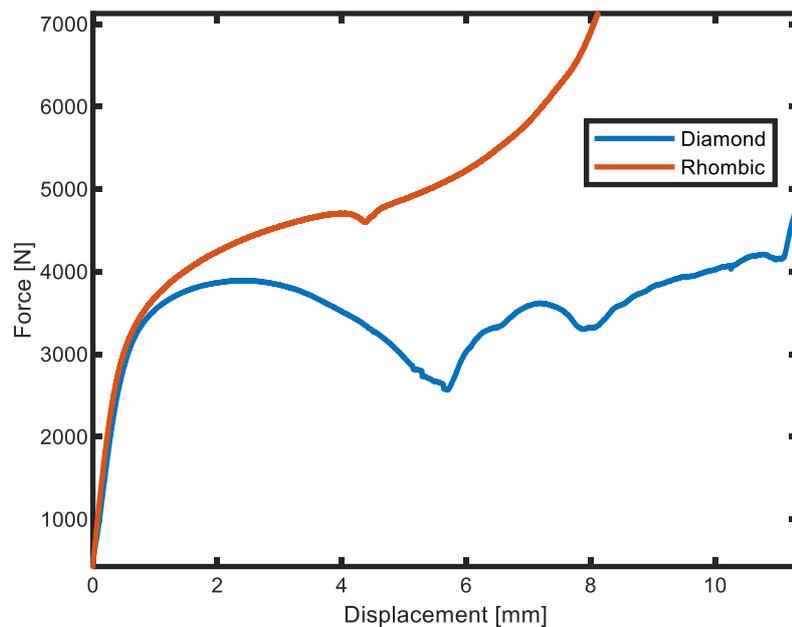


Figura 6.8-Compressione uniassile su provini di tipo 3.



Figura 6.9-Compressione provino D3

Infine, in Figura 6.10, è riportato il confronto tra le compressioni su provini di tipo 1 e 3, in termini di stress e strain ingegneristici. Lo stress è stato calcolato dividendo la forza letta dalla cella di carico per la sezione trasversale iniziale del provino mentre lo strain, come il rapporto tra lo spostamento della traversa della macchina e l'altezza iniziale del provino[50]. Dal grafo si nota subito che, a meno di un effetto scala, ci sia ripetibilità tra i comportamenti delle due celle di tipo 1 con le celle di tipo 3, queste ultime con valori più alti dello stress di plateau. Ancora una volta questo comportamento è da ascrivere alla differente densità relativa che ne influenza la risposta a compressione.

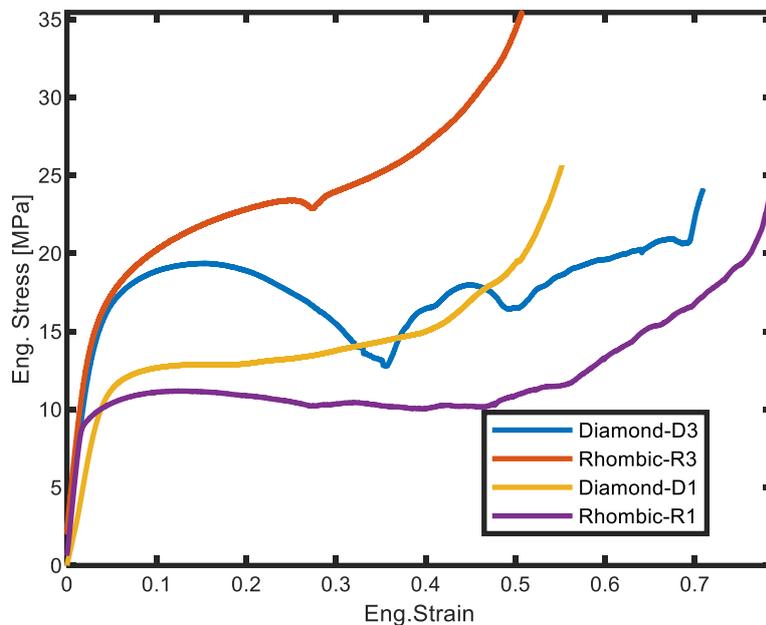


Figura 6.10-Confronto compressioni uniassiali tra provini tipo 1 e tipo 3.

### 6.2.3 Barra di Hopkinson

In Figura 6.11 e Figura 6.12 sono riportati i valori di strain rate raggiunti durante i test alla barra di Hopkinson per tutti i provini analizzati. Le velocità di deformazione riportate si riferiscono al metamateriale e non sono quelle effettive raggiunte dalle struts durante la deformazione. Sono stati quindi condotti sette test in totale, di cui quattro con cella rhombic (R3-2, R3-3, R3-5, R3-6) e tre con cella diamond (D3-3, D3-5, D3-6). Gli strain rate raggiunti con i test sulle R3 sono paragonabili con quelli raggiunti dai provini D3,

attestandosi per entrambi tra i  $500$  e  $600\text{s}^{-1}$  per il livello più alto e tra i  $300$  e  $400\text{s}^{-1}$  per quello più basso.

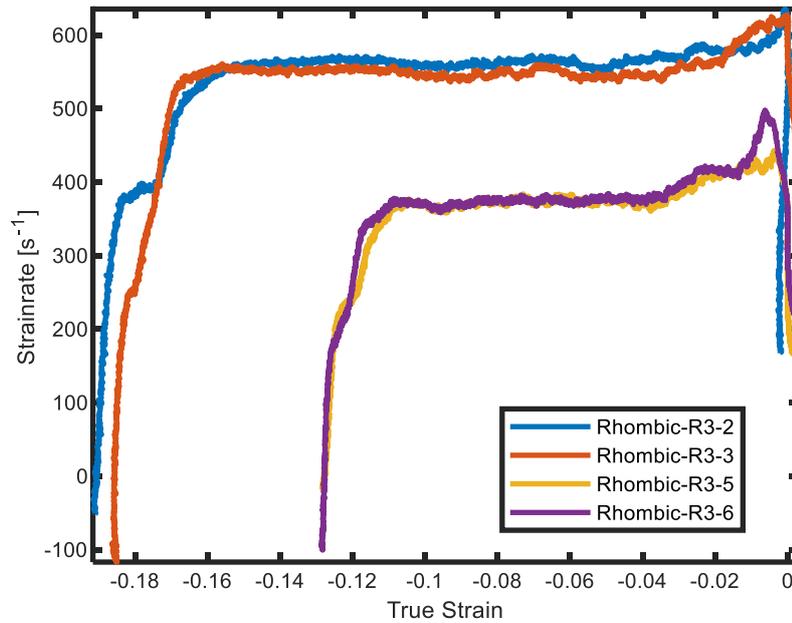


Figura 6.11-Livelli di strain rate raggiunti per i provini di tipo R3

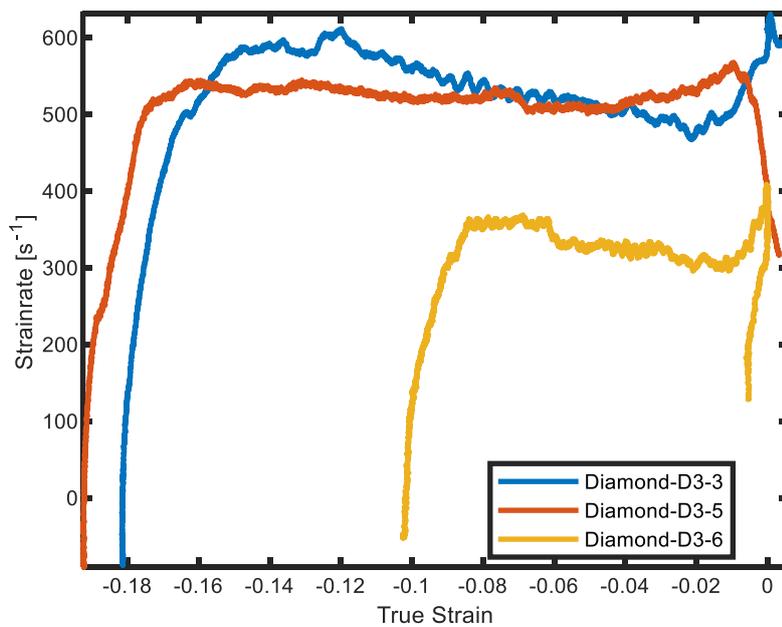


Figura 6.12-Livelli di strain rate raggiunti per i provini di tipo D3

In Figura 6.13 e Figura 6.14 sono riportati i risultati ottenuti per i provini R3 e D3 in termini di forza-spostamento mentre in Figura 6.15 e Figura 6.16, il paragone tra le due diverse strutture per i due livelli di strain rate raggiunti. Da questi test sembra che la risposta in compressione si sia invertita rispetto al caso quasi statico, mostra maggior rigidità e valore del plateau per le strutture diamond piuttosto che per le rhombic.

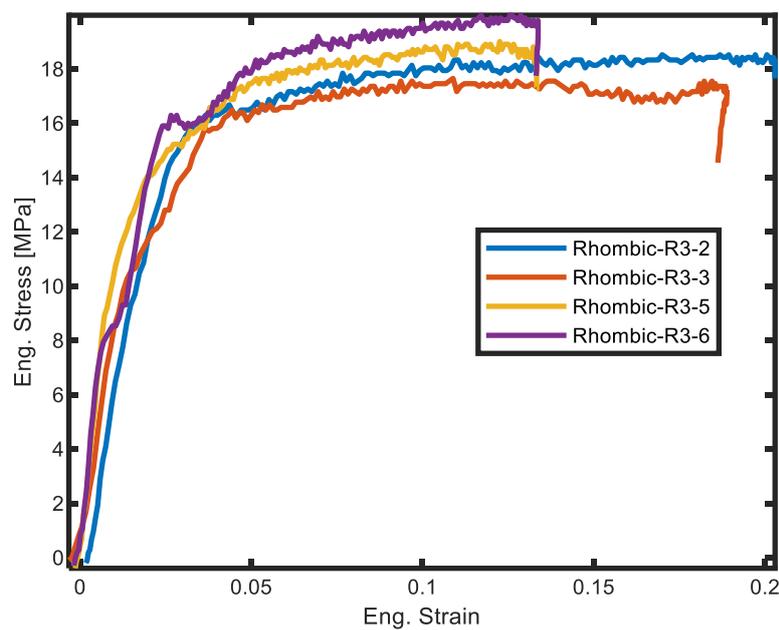


Figura 6.13-Curve stress strain ingegneristici per provini R3

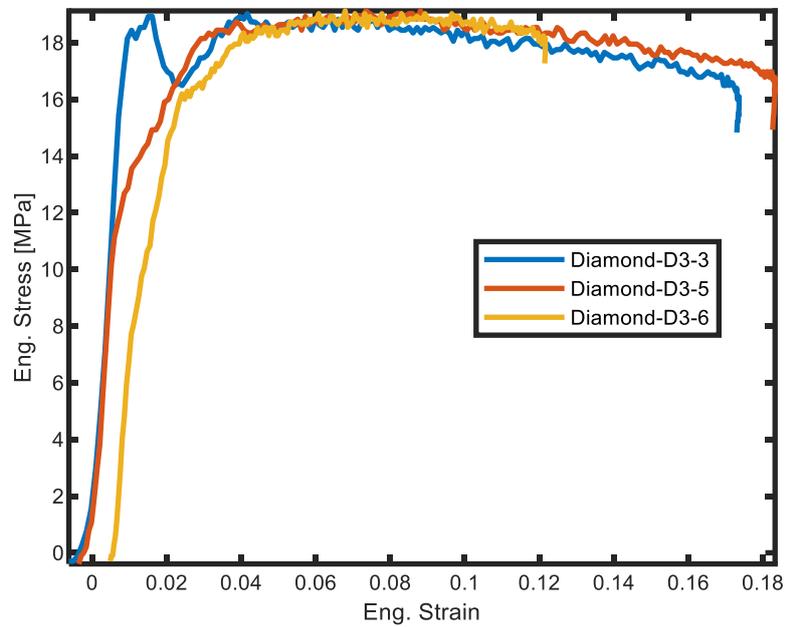


Figura 6.14- Curve stress strain ingegneristici per provini D3

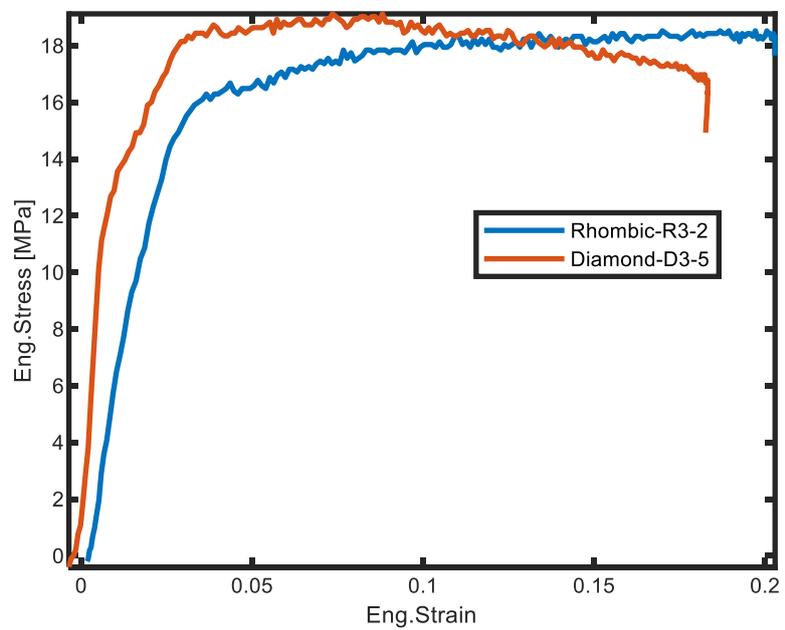


Figura 6.15-Paragone curve stress strain tra provini R3 e D3 per il livello di strain rate più alto

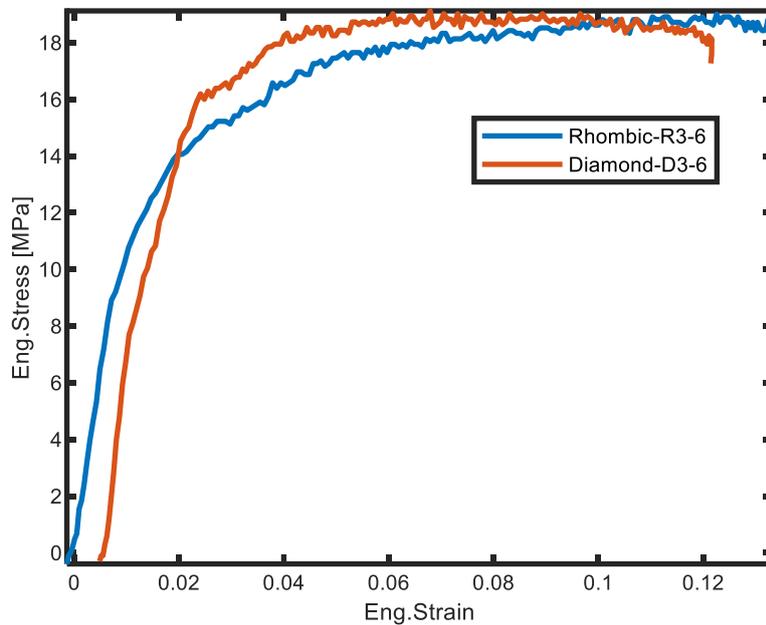


Figura 6.16-Paragone curve stress strain tra provini R3 e D3 per il livello di strain rate più basso

In Figura 6.17e Figura 6.18 è riportato il confronto tra le prove di compressione sulle strutture lattice fatte in regime quasi-statico e dinamico a circa  $550\text{s}^{-1}$ . Si nota che la risposta complessiva della struttura lattice non sembra variare sensibilmente. Sia per la cella rhombic che per la diamond è leggermente aumentata la rigidità, mantenendo più o meno costante il valore dello stress di plateau.

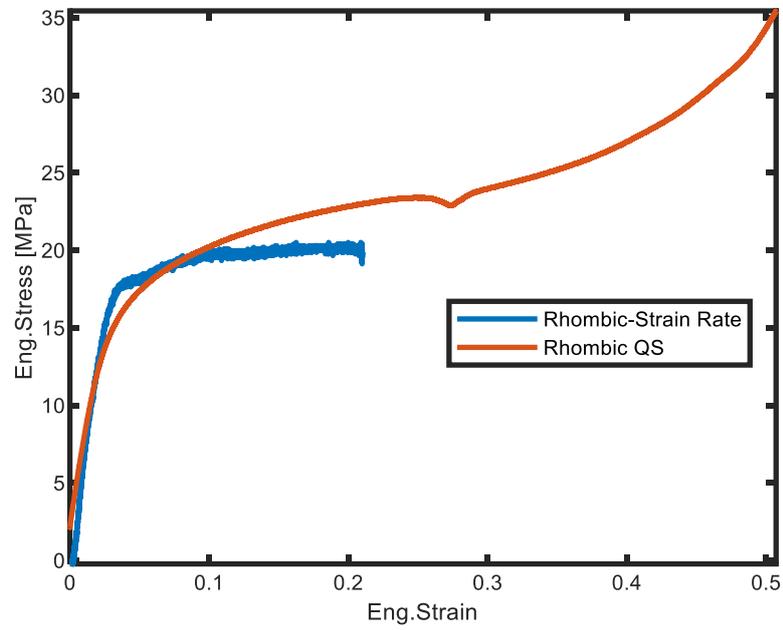


Figura 6.17-Confronto test di compressione quasi statica e dinamico a  $550s^{-1}$  per cella rhombic dodecahedron

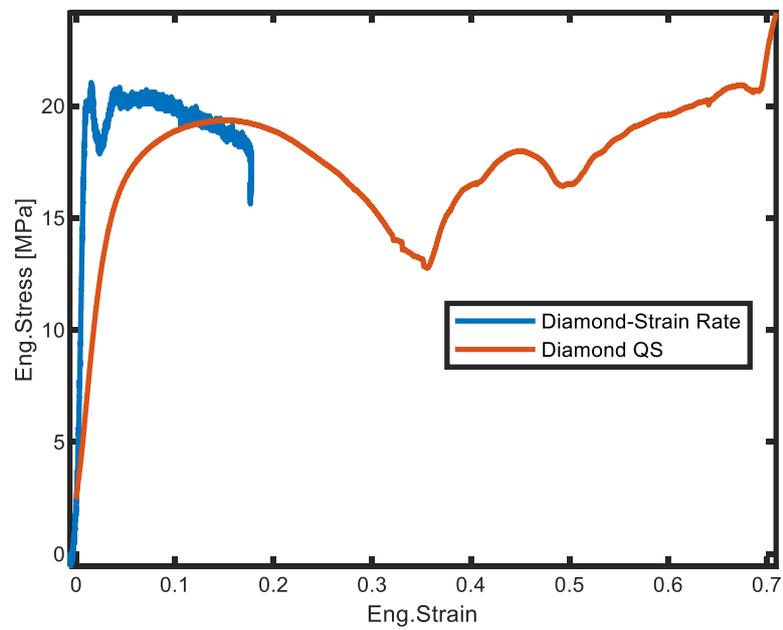


Figura 6.18-Confronto test di compressione quasi statica e dinamico a  $550s^{-1}$  per cella diamond

In Figura 6.19 sono riportate le immagini, estratte dal video girato a circa 30000fps, delle prove condotte alla barra di Hopkinson per le due tipologie di provini analizzate.

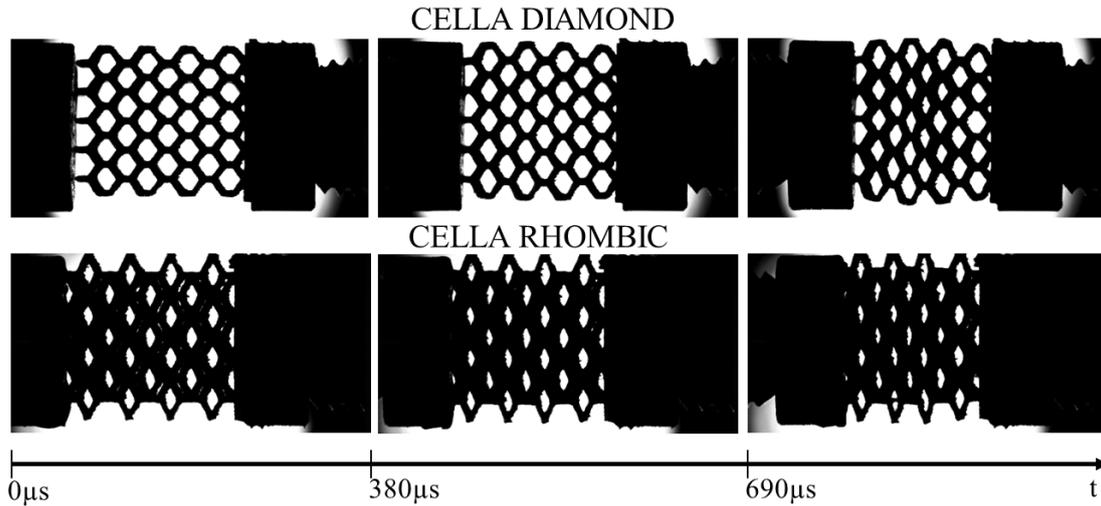


Figura 6.19-Sequenza frames di schiacciamento dei provini D3 (in alto) e R3 (in basso)

#### 6.2.4 Test Balistici

Oltre ai classici test di compressione quasi statica ed i meno comuni test alla barra di Hopkinson, si sono effettuati anche test balistici per cercare di caratterizzare al meglio il comportamento in compressione delle strutture lattice. Il test balistico sottopone la struttura indagata ad uno stato tensionale multiassiale, con un forte effetto strain rate e temperatura. In questo test una sfera di acciaio è proiettata ad una velocità di circa 200m/s contro le strutture lattice di tipo 2. L'impatto non è avvenuto direttamente sul reticolo della struttura ma bensì su di un piatto spesso 2mm stampato di pezzo con essa. Durante questa tipologia di test si valuta l'energia assorbita dalla struttura lattice a seguito dell'impatto, monitorando la velocità della sfera d'acciaio prima e dopo che questo sia avvenuto.

Data la complessità del fenomeno, i risultati ottenuti dagli spari, saranno utilizzati per verificare che l'iter progettuale proposto sia valido e quindi applicabile non solo a casi di interesse scientifico ma bensì anche a quelli di interesse industriale. In Figura 6.20 sono riportate le immagini, estratte dal video girato a circa 30000fps, di due dei quattro spari

effettuati mentre in Tabella 6.3, le specifiche dello sparo ed i risultati ottenuti in termini di energia assorbita dalle strutture.

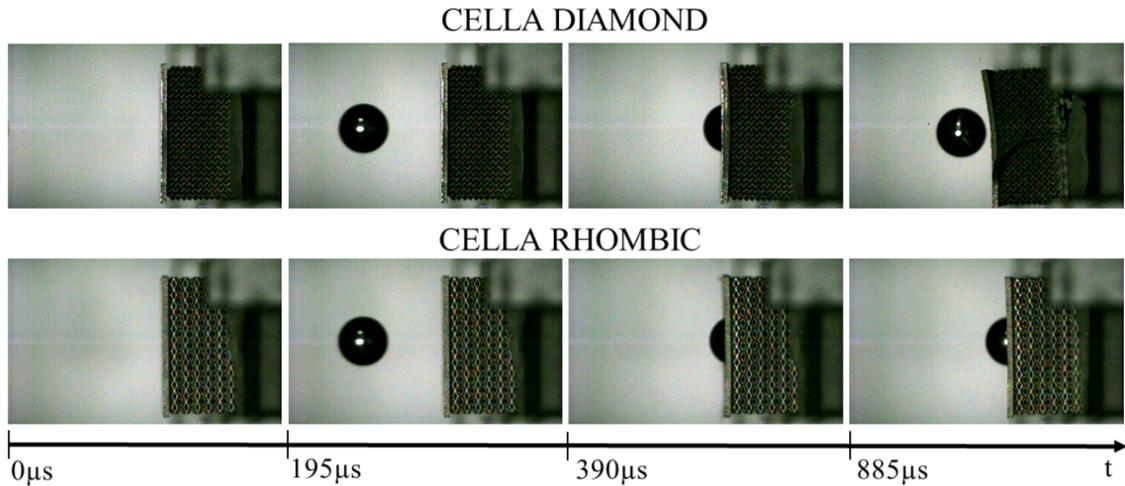


Figura 6.20-Sequenza frames dello sparo su provini D3 (in alto) e R3 (in basso)

Tabella 6.3-Specifiche spari e risultati

Test	Impatto		Rimbalzo	Massa Proiettile (g)	Energia Impatto (J)	Energia Assorbita (J)
	Velocità Proiettile Diodi (m/s)	Velocità Proiettile Video (m/s)	Velocità Proiettile Video (m/s)			
D2-1	188	193	16	24.814	462.15	458.97
D2-2	202	198	Proiettile Bloccato	24.813	486.38	//
R2-1	209	208	14	24.813	536.75	534.32
R2-2	202	200	16	24.816	496.32	493.14

Per la calibrazione delle velocità a cui effettuare gli spari si sono utilizzati software FEM. L'obiettivo era quello di settare la prova in modo che l'energia dovuta all'impatto fosse quanto più vicina possibile a quella che la struttura era in grado di sopportare. In Figura 6.21 è riportata un'immagine rappresentativa delle analisi FEM condotte.

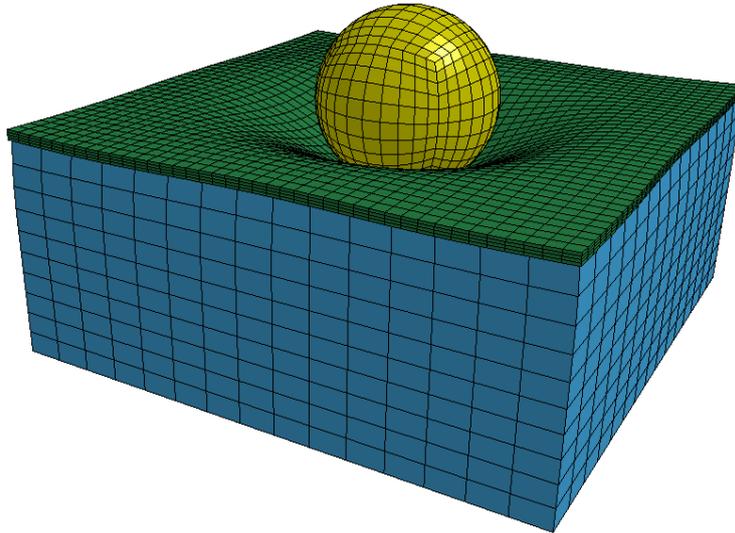


Figura 6.21-Analisi FEM sparo

### 6.3 Conclusioni

In questo capitolo è stata analizzata la campagna di sperimentazione condotta sulle strutture lattice. I provini sono stati realizzati con tecnologia SLM messa a punto nel Capitolo 4 e con lo stesso materiale caratterizzato nel Capitolo 5. Tutti i provini stampati sono stati dotati di una base di pochi millimetri di altezza per consentirne la rimozione dal piatto di stampa senza danneggiarne il reticolo.

Le struts di tutti i provini stampati sono state misurate mediante micrometro laser, mostrando un valor medio del loro diametro leggermente inferiore a quello nominale ma comunque accettabile. Sono state condotte misure di densità relativa mediante metodo di Archimede mostrando un valore leggermente inferiore a quello di progetto; risultato dettato dalla dimensione delle struts inferiore a quella nominale.

Sono state condotte prove di compressione quasi statica su provini avente geometria denominata 1 e 3, prove di compressione dinamica alla barra di Hopkinson su provini di tipo 3 e test balistici su provini di tipo 2. Si sono testate strutture con due diverse tipologie di cella elementare: rhombic dodecahedron (R) e diamond (D).

I test di compressione quasi statica sono serviti a caratterizzare le strutture con cella diamond e a confrontarle con le corrispettive con cella rhombic. Da questa analisi è risultato che le strutture rhombic siano caratterizzate da una maggior rigidità iniziale e valore della forza di plateau; risultato in accordo con la teoria classica che lega queste due proprietà in maniera direttamente proporzionale alla densità relativa e che risulta maggiore per la struttura con cella rhombic.

I test alla barra di Hopkinson hanno mostrato un leggera inversione di tendenza rispetto alle curve forza-spostamento ottenute in regime quasi statico, comportamento contrastante con i valori di densità relativa delle due strutture. Da questo si può dedurre che probabilmente il legame comunemente utilizzato tra densità relativa e proprietà meccaniche non è più valido in condizione di elevate velocità di deformazione. Inoltre, come si può vedere dalla Figura 6.22, i valori dello stress di plateau sono molto più alti rispetto a quelli relativi al regime quasi statico; questo comportamento è in accordo con quanto visto nel Capitolo 5 di caratterizzazione del materiale. Va inoltre sottolineato che l'impulso fornito alla barra incidente nei test dinamici non è stato sufficiente a comprimere completamente i provini lattice ed è per questo motivo che le curve relative al caso dinamico in Figura 6.22 “durano” meno.

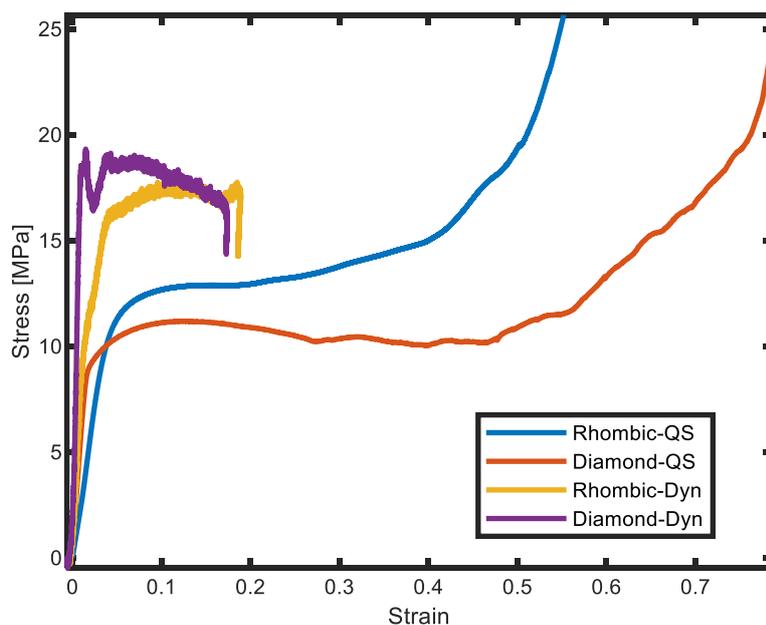


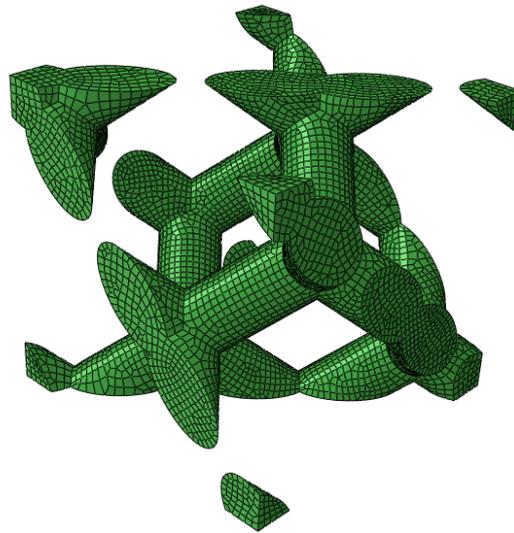
Figura 6.22-Confronto test di compressione quasi statici (QS) e dinamici (Dyn)

Infine, sono stati condotti test balistici in modo da poter utilizzare i risultati ottenuti come controprova che l'iter progettuale proposto sia valido. Test di questo tipo sottopongono le strutture indagate ad uno stato tensionale multiassiale, con un forte effetto strain rate e temperatura. Pertanto, riuscire a prevederne la risposta darebbe confermerebbe la bontà della procedura progettuale proposta.

# Capitolo 7

## Il Modello FEM

Come visto nei capitoli precedenti, il comportamento delle strutture lattice risulta piuttosto complesso da prevedere. Per la progettazione dei solidi cellulari, in ambito industriale soprattutto, ad oggi sono molto utilizzati software CAD con all'interno implementati *tools* per eseguire analisi strutturali sia meccaniche che termiche che termomeccaniche. Software di questo tipo non tengono però conto della tecnologia produttiva che si dovrà utilizzare per la realizzazione delle strutture, tecnologia che ne influenzerà senza dubbio la risposta meccanica. Inoltre, non consentono all'utente la possibilità di definire in maniera accurata le proprietà meccaniche del materiale, proprietà che potrebbero dipendere dallo stato sollecitativo in esame. Così facendo si rischia di utilizzare i risultati prodotti da analisi approssimative per progettare e produrre strutture lattice che nella realtà si comporteranno in maniera totalmente differente. L'utilizzo di software FEM consente di superare questo tipo di problemi, permettendo al progettista l'adeguata definizione del modello rappresentate la struttura in esame. Ci sono però diverse problematiche che rendono anche l'utilizzo di questi software complessi da settare adeguatamente. Non è ad esempio possibile simulare le strutture lattice con elementi tridimensionali a causa dell'eccessivo onere computazionale che ne deriverebbe. In Figura 7.1 è riportata la mesh realizzata per discretizzare adeguatamente una singola cella diamond, composta da circa duecentomila elementi. Se si considera che anche le strutture più semplici sono solitamente caratterizzate da centinaia di celle elementari, risulta evidente che il numero di elementi in gioco risulterebbe eccessivo.



*Figura 7.1-Discretizzazione cella diamond mediante elementi tridimensionali*

Sulla base di quanto detto si può affermare che attualmente siamo nella condizione in cui la tecnologia si è sviluppata più rapidamente della capacità di progettare adeguatamente queste strutture. Per queste ragioni il mondo della ricerca si sta prodigando negli ultimi anni per cercare di colmare questo *gap*.

In questo capitolo sarà sviluppata una strategia per la simulazione FEM delle strutture lattice, utilizzando le informazioni acquisite nei capitoli precedenti e cercando di trasmetterle al modello numerico. Il lavoro sarà diviso in due diverse fasi:

- 1) Definizione del legame costitutivo del materiale;
- 2) Messa a punto di una strategia simulativa per la simulazione del comportamento meccanico delle strutture lattice;

I software FEM utilizzati sono: Abaqus-CAE per le analisi implicite ed LS-Dyna per le analisi esplicite.

## 7.1 Il modello costitutivo

Per l'implementazione del giusto legame costitutivo all'interno di Abaqus-CAE si è deciso di sviluppare un modello per il legame  $\sigma$ - $\varepsilon$  che tenga conto sia dell'effetto temperatura che strain rate (Eq.16)

$$\sigma = f(\varepsilon, T, \dot{\varepsilon}) \quad (16)$$

Per fare ciò si sono utilizzati i test di trazione condotti sul materiale base per definire il comportamento quasi statico, i test in temperatura per definire la dipendenza dalla temperatura ed i test alla barra di Hopkinson per la dipendenza del materiale base dall'effetto strain rate.

Il modello più utilizzato per descrivere la dipendenza della tensione sia dalla temperatura che dallo strain rate è il modello di Johnson-Cook che dato però il particolare comportamento del materiale (doppio flesso della curva di flusso plastico) di cui sono fatte le nostre strutture lattice non risulta applicabile. Si è deciso quindi di implementare un modello sviluppato ad hoc.

Dato il diverso comportamento del materiale base in funzione dell'orientazione di stampa, considerando che per tutte e tre le tipologie di test condotti i risultati sui provini XZ e X erano sempre sovrapponibili e considerando che le due celle scelte hanno struts inclinate di  $45^\circ$  (la diamond) e  $25^\circ$  (la rhombic), si è deciso di prendere come riferimento i risultati dei provini XZ (stampati a  $45^\circ$  rispetto al piatto di stampa).

Come sarà esposto nei paragrafi successivi, il modello analitico per la descrizione della curva di flusso plastico del materiale sarà molto complesso e per la scelta del valore delle costanti che lo controllano si procederà nel seguente modo:

1. Attraverso il software Matlab si individuano i valori delle costanti che permettono il miglior fit delle curve  $\sigma$ - $\varepsilon$  ottenute sperimentalmente, fino alla fase di necking del materiale;

2. Attraverso l'utilizzo del FEM, confrontando le curve forza-spostamento simulate e sperimentali si aggiustano ulteriormente i valori delle costanti trovati al punto precedente in modo da caratterizzare l'intera curva di flusso plastico fino a rottura.

### 7.1.1 Comportamento QS

Partendo dai risultati delle prove di trazione sul provino QS-XZ-1, tramite il software Matlab, si è cercata una funzione attraverso la quale fosse possibile effettuare il fitting dei dati sperimentali. Il risultato di questa fase è riportato in Figura 7.2 ed è stato ottenuto utilizzando l'equazione (17). Data la particolare forma, con doppio flesso della curva da fittare, si è dovuta utilizzare una funzione ad otto costanti i cui valori sono stati ottenuti a valle di un processo di ottimizzazione condotto su Matlab.

$$\sigma(\varepsilon) = A + B_1 \left(1 - e^{\frac{\varepsilon}{t_1}}\right) + B_2 \left(1 - e^{\frac{\varepsilon}{t_2}}\right) + c\{1 + \tanh[(\varepsilon - x_c) * d]\} \quad (17)$$

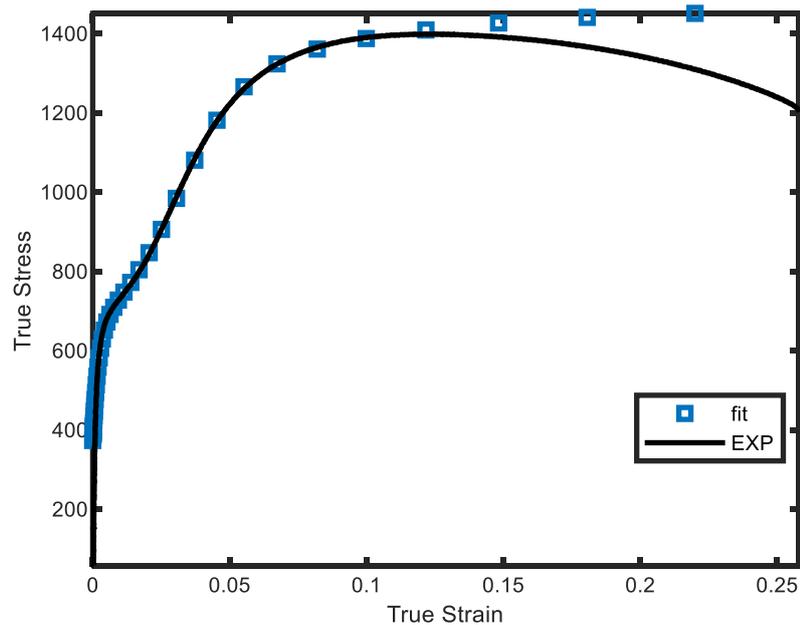


Figura 7.2-Fitting curva di trazione QS- XZ

La curva ottenuta a valle dell'ottimizzazione della relazione proposta in (17) la si può ritenere valida fino al necking del materiale. Per caratterizzare il legame  $\sigma$ - $\epsilon$  anche in fase di post strizione si è ricorsi all'utilizzo di Abaqus CAE:

- 1) è stato creato un modello FEM che riproducesse il test di trazione;
- 2) per descrivere la curva di flusso plastico al FEM si è utilizzato il modello con cui è stato ottenuto fit tramite Matlab;
- 3) si è confrontata la curva F-s ottenuta al FEM con quella sperimentale e si sono variati iterativamente i parametri della curva di fitting fino ad ottenere la convergenza della curva forza-spostamento ottenuta al FEM su quella sperimentale. In questo modo il modello ottenuto è capace di prevedere anche il comportamento del materiale in fase di post-necking.

Il modello FEM è stato creato con elementi assial-simmetrici per discretizzare la stessa geometria dei provini di trazione a meno delle teste filettate. Si è quindi utilizzato un modello bidimensionale assial-simmetrico. Per riprodurre il test sperimentale, nel modello FEM è stata vincolata con un incastro una faccia del provino mentre quella opposta è stata lasciata solo libera di traslare nella direzione in cui si è applicato uno spostamento imposto (Figura 7.3).

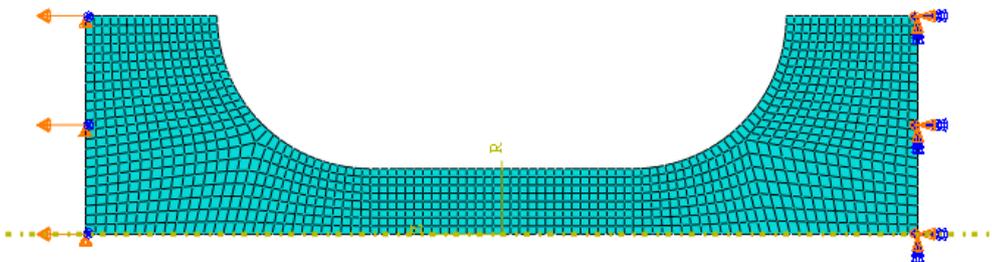


Figura 7.3-Modello FEM test di trazione

In Figura 7.4 è riportata un'immagine dei risultati ottenuti al FEM (la tridimensionalità del provino è solo grafica poiché l'analisi è stata condotta in assial-simmetria) mentre in Figura 7.5 il risultato finale della fase di ottimizzazione del comportamento post-necking.

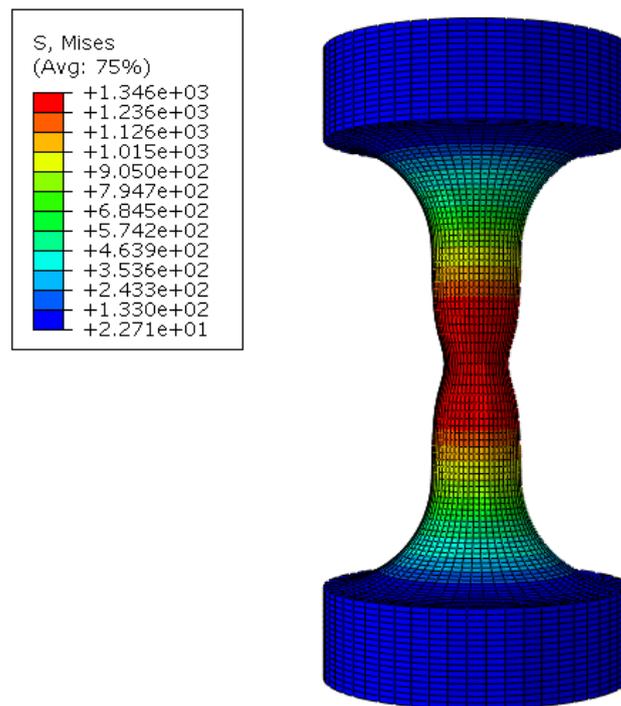


Figura 7.4-Risultati simulazione QS

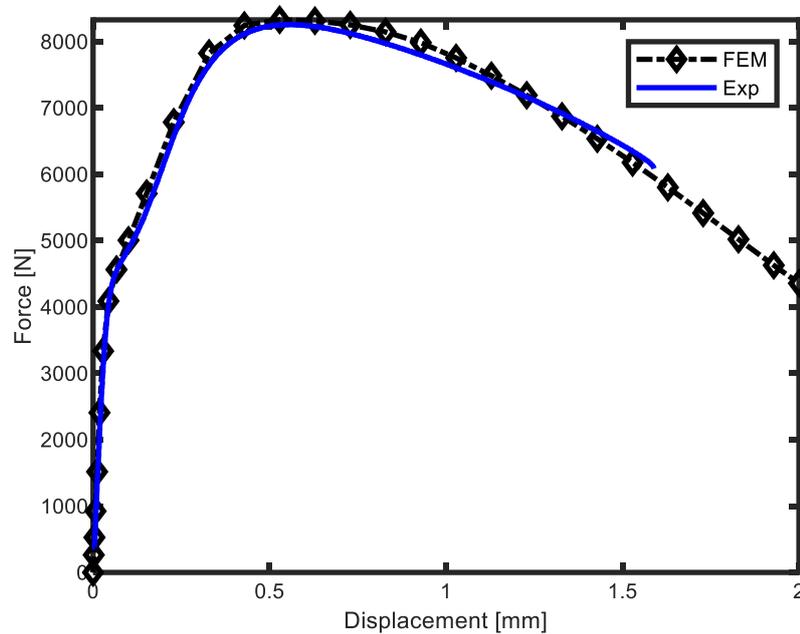


Figura 7.5-Curve forza-spostamento FEM e sperimentale per test QS

In Figura 7.6 è riportato il confronto tra la curva forza-spostamento ottenuta la FEM, a valle dell'intera fase di ottimizzazione, con le curve sperimentali dei provini stampati anche in direzione X e Z. Da questo ultimo grafico si nota come la curva FEM sembri riproporre in maniera soddisfacente anche il comportamento in direzione X. Infine, in Tabella 7.1 sono riportate le costanti ottimizzate per l'equazione (17).

Tabella 7.1-Costanti ottimizzate su test QS

A	345
B <sub>1</sub>	206.7
t <sub>1</sub>	0.001124
B <sub>2</sub>	222.8234
t <sub>2</sub>	0.0969
c	300
x <sub>c</sub>	0.0182
d	65

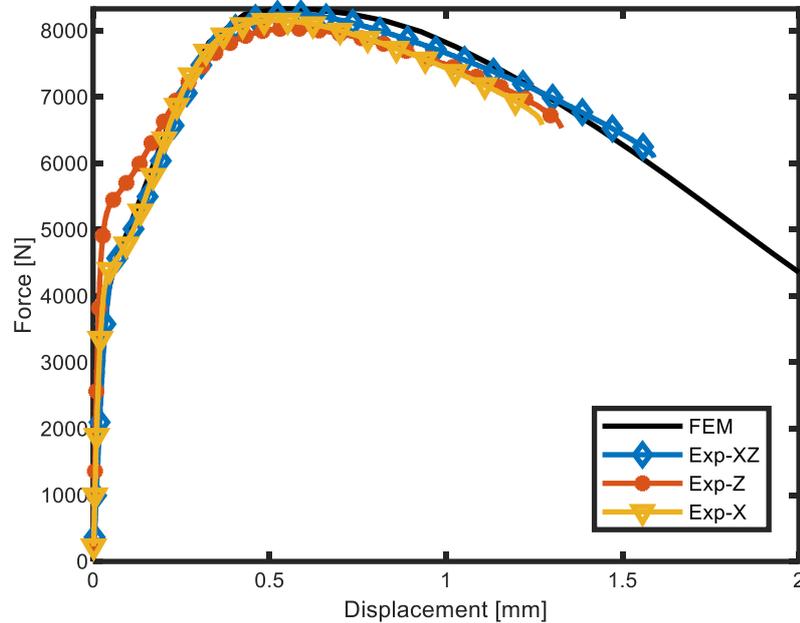


Figura 7.6-Confronto curva spostamento FEM e sperimentali in tutte e 3 e direzioni di stampa

### 7.1.2 Effetto temperatura

Nel modellare l'effetto della temperatura si è deciso di non prendere in considerazione l'effetto di DSA osservato ma di considerare come curva di riferimento quella sempre in direzione XZ ma composta dal suo inviluppo (Figura 7.7).

In questo caso il modello utilizzato precedentemente per il fitting quasi statico sarà modificato moltiplicando tutti gli addendi per un fattore dipendente dalla temperatura alla Johnson-Cook:

$$\sigma(\varepsilon) = A(1 + T_o^{m_1}) + B_1 \left(1 - e^{\frac{\varepsilon}{t_1}}\right) (1 - T_o^{m_2}) + B_2(1 - T_o^{m_3}) \left(1 - e^{\frac{\varepsilon}{t_2}}\right) + c(1 - T_o^{m_4}) \{1 + \tanh[(\varepsilon - x_c) * d]\} \quad (18)$$

$$\text{con } T_o = \text{Temperatura Omologa} = \frac{T - T_{\text{ambiente}}}{T_{\text{fusione}} - T_{\text{ambiente}}};$$

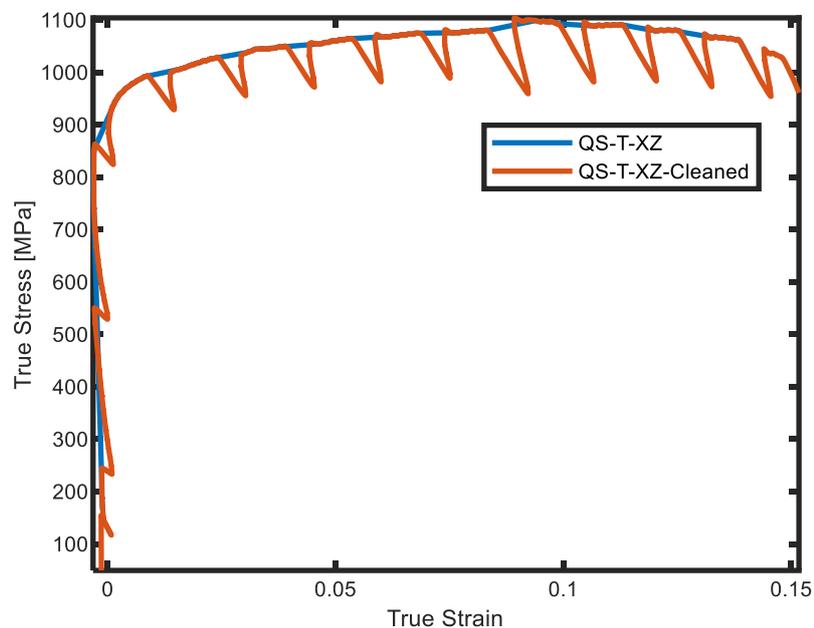


Figura 7.7-Inviluppo curva QS-T-XZ

Così come fatto in precedenza la fase di ottimizzazione è stata condotta prima su Matlab, utilizzando la curva Stress-Strain sperimentale come target (Figura 7.8), e poi al FEM per il comportamento post-necking (Figura 7.9). Il modello FEM utilizzato è stato lo stesso esposto nel paragrafo precedente ma con la curva di flusso plastico definita dalla (18). In Tabella 7.2 sono riportate le costanti ricavate a valle del doppio processo di ottimizzazione.

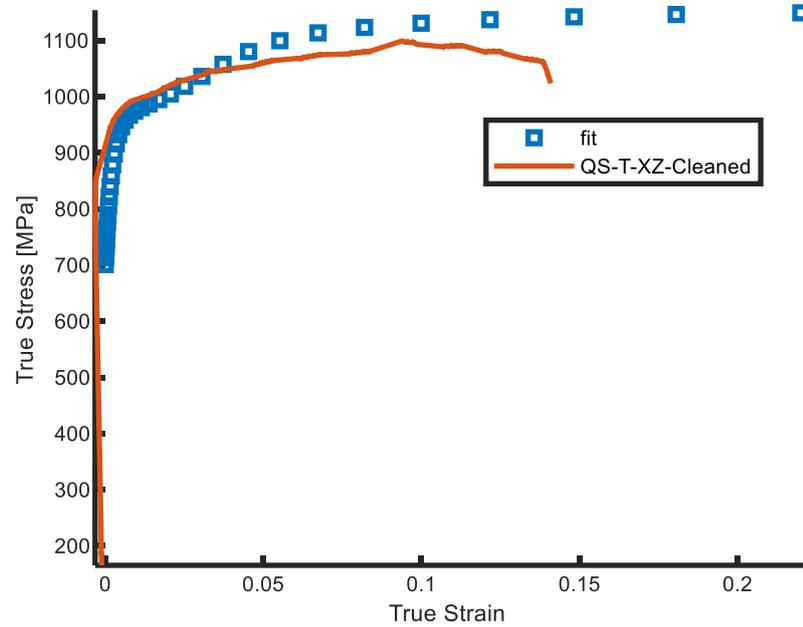


Figura 7.8- Fitting curva di trazione QS-T- XZ

Tabella 7.2-Costanti ottimizzate su test QS-T

A	394.99
B <sub>1</sub>	206.7
t <sub>1</sub>	0.001124
B <sub>2</sub>	222.8234
t <sub>2</sub>	0.0969
c	321.3740
x <sub>c</sub>	0.0282
d	40.6333
m <sub>1</sub>	0.120
m <sub>2</sub>	0.65
m <sub>3</sub>	0.12
m <sub>4</sub>	0.08

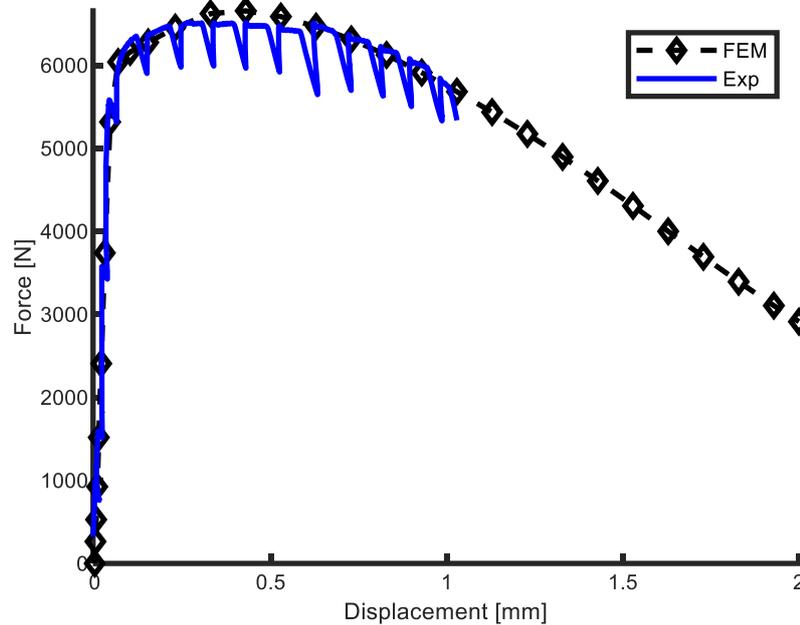


Figura 7.9-Curve forza-spostamento FEM e sperimentale per test QS-T

### 7.1.3 Effetto strain rate

Come concluso nel Capitolo 5 i risultati ottenuti alla barra di Hopkinson non mostrano un effetto diretto della direzione di stampa sulla risposta del materiale. Pertanto, considerando che solo nella direzione Z si sono analizzati due diversi livelli di strain rate, si è deciso di utilizzare le curve ottenute sui provini DL-Z e DH-Z per implementare l'effetto strain rate nel modello fino ad ora sviluppato.

Per tenere conto dell'effetto della velocità di deformazione sulla risposta del materiale si è modificato il modello proposto aggiungendo opportunamente un termine alla Cowper-Symonds:

$$\sigma(\varepsilon) = A(1 + T_o^{m_1}) \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{G}\right)^{\frac{1}{p}}\right) + B_1 \left(1 - e^{\frac{\varepsilon}{t_1}}\right) (1 - T_o^{m_2}) + B_2 (1 - T_o^{m_3}) \left(1 - e^{\frac{\varepsilon}{t_2}}\right) + c(1 - T_o^{m_4}) \left(1 + \tanh\left((\varepsilon - x_c) * d * \frac{1}{3 \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{G}\right)^{\frac{1}{p}}\right)}\right)\right) \quad (19)$$

Si sono aggiunte quindi altre due costanti ( $G$  e  $p$ ).

In Figura 7.10 sono riportate le due curve sperimentali ottenute ad un livello più basso (L) ed uno più alto (H) di strain rate e le corrispondenti curve di fitting. Si ricorda che nel Capitolo 5 erano stati condotti quattro diversi test, due per il livello L e due per il livello H, ma in questa fase se ne è preso solo uno per livello come riferimento per effettuare il fitting. Quelle che in figura sono state chiamate Exp-L ed Exp-H sono le curve corrispondenti ad i test DL-Z-1 e DH-Z-1.

Data la complessità del fenomeno, in questo caso al FEM ci si è limitati a verificare che il materiale, in funzione dello strain rate applicato, rispondesse correttamente. I risultati di questa verifica sono riportati in Figura 7.11 e si può notare come i livelli di stress e strain calcolati dal FEM siano in buon accordo con quelli sperimentali.

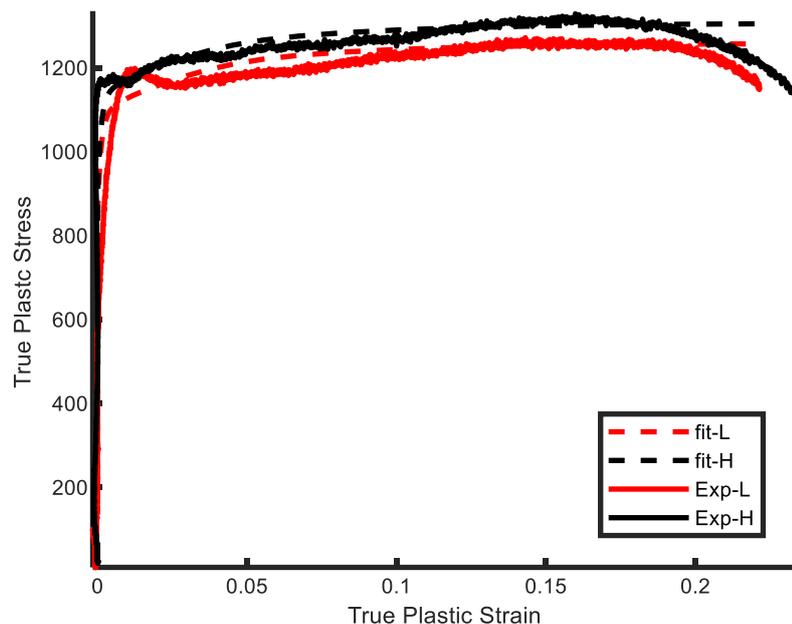


Figura 7.10-Fitting curva con effetto strain rate sui test sperimentali per i due livelli di strain rate analizzati (L e H).

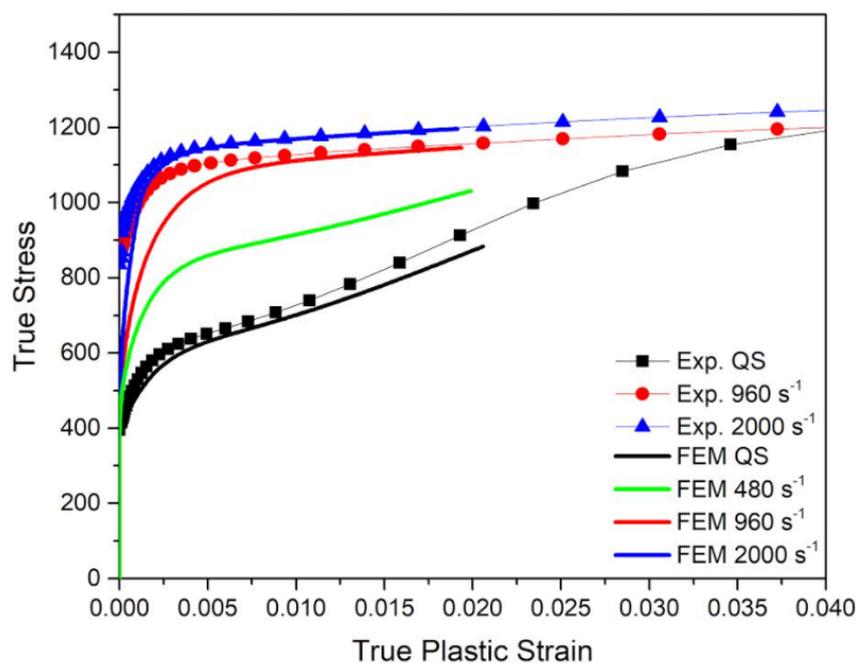


Figura 7.11-Confronto dati sperimentali e FEM

In Tabella 7.3 sono riportati i valori delle costanti utilizzate per descrivere, attraverso il modello proposto, la curva di flusso plastico del materiale in funzione di temperatura e strain rate.

Tabella 7.3-Costanti ottimizzate sui test alla barra di Hopkinson

A	394.99
B <sub>1</sub>	206.7
t <sub>1</sub>	0.001124
B <sub>2</sub>	222.8234
t <sub>2</sub>	0.0969
c	321.3740
x <sub>c</sub>	0.0282
d	40.6333
m <sub>1</sub>	0.120
m <sub>2</sub>	0.65
m <sub>3</sub>	0.12

---

m4	0.08
G	55000
p	4.3

## 7.2 Il modello Lattice

Data l'impossibilità di effettuare le simulazioni implicite delle strutture lattice complete mediante l'ausilio di elementi tridimensionali si è deciso di sviluppare un modello simulativo nel quale la struttura lattice è stata discretizzata mediante elementi beam. In alcuni lavori gli elementi tridimensionali sono stati utilizzati per discretizzare la singola cella ed effettuare analisi quindi solo su di essa e mai sull'intera struttura [52,53]. L'utilizzo di elementi beam invece è molto più diffuso nell'ambito della ricerca e viene più comunemente utilizzato per la simulazione di strutture lattice complesse [27,29,54,55].

In questo capitolo, prendendo come riferimento i risultati ottenuti dalla sperimentazione delle strutture lattice ed utilizzando le caratteristiche del materiale base ottenute nel Capitolo 5, si è sviluppata una metodologia simulativa che possa favorire la corretta progettazione di strutture lattice in 17-4PH.

### 7.2.1 Compressione QS

Come detto nell'introduzione è stato sviluppato un modello FEM con elementi beam per la simulazione implicita delle strutture lattice. In questo paragrafo si utilizzeranno i risultati dei test quasi-statici di compressione per mettere a punto i parametri base del modello FEM.

In prima istanza si è indagata la tipologia di elemento da utilizzare: Eulero Beam o Timoshenko Beam. La teoria della trave di Timoshenko a differenza di quella di Eulero, tiene in considerazione anche gli effetti del taglio, aspetto tanto più importante quanto più la trave è tozza. Nel lavoro [45] è stata tratta analiticamente la possibilità di discretizzare le strutture lattice mediante elementi beam di Eulero o di Timoshenko, arrivando alla conclusione che l'utilizzo degli elementi beam che tengono conto anche dell'effetto del taglio produce risultati mediamente più soddisfacenti. Inizialmente si è quindi indagata la

possibilità di utilizzare entrambe le tipologie di elementi per condurre le nostre analisi e si sono lanciate due analisi di compressione per valutare le conseguenze che questa scelta comporta. Il software utilizzato è stato Abaqus CAE e si sono utilizzati in un caso gli elementi beam B33 (Eulero) e nell'altro i B31 (Timoshenko). I risultati ottenuti a parità di tutti gli altri parametri dell'analisi sono riportati in Figura 7.12 e si può notare come le beam con formulazione attinente alla teoria di Eulero siano molto più rigide delle corrispettive con formulazione di Timoshenko.

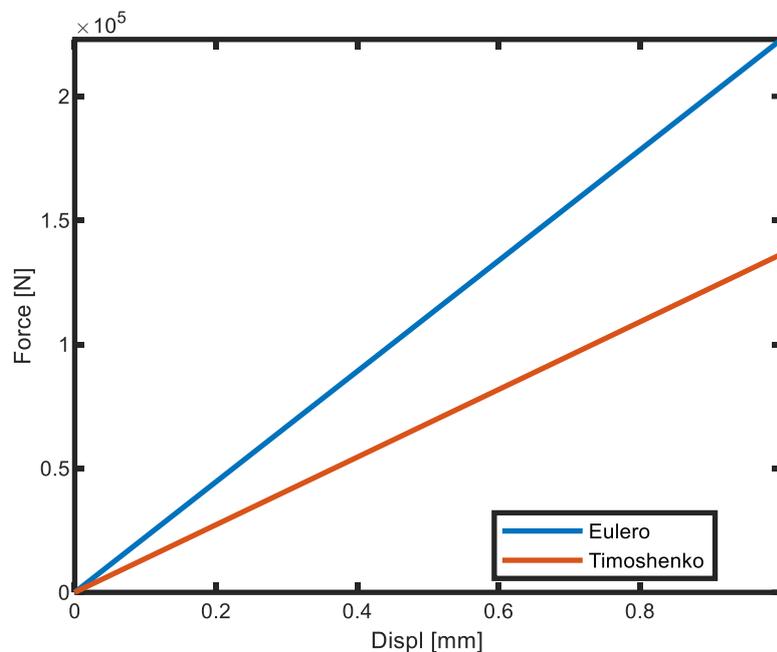


Figura 7.12-Confronto tra i risultati ottenuti mediante l'utilizzo degli elementi B33 e B31.

Inoltre, dall'analisi delle tensioni proposta in Figura 7.13 e Figura 7.14 si evince che la tensione di Von Mises corrispondente al caso senza taglio, sia circa del 30% inferiore al caso in cui il taglio sia invece preso in considerazione. I risultati ottenuti dipendono fortemente dalla snellezza delle struts modellate ed in questo caso sono stati utilizzati valori prossimi a quelli dei provini testati. A valle di quanto visto in questa prima fase, essendo non trascurabile l'effetto del taglio sulle struts in termini sia di rigidità che di tensione equivalente, si è deciso di utilizzare in tutte le analisi successive elementi del tipo beam B31.

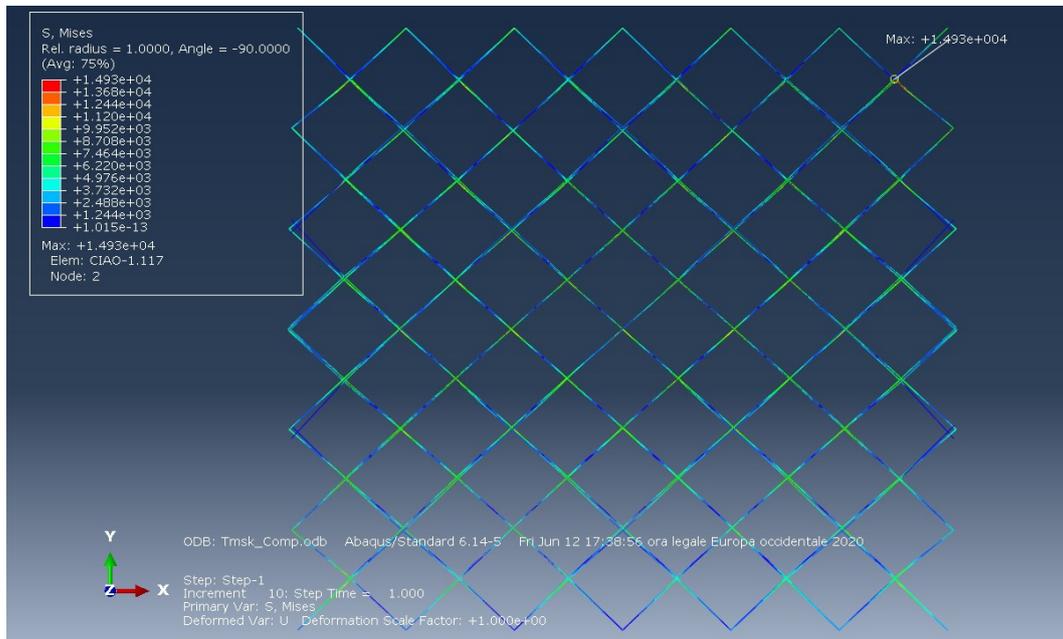


Figura 7.13-Tensione di Von Mises ottenuta mediante l'utilizzo di elementi beam B33

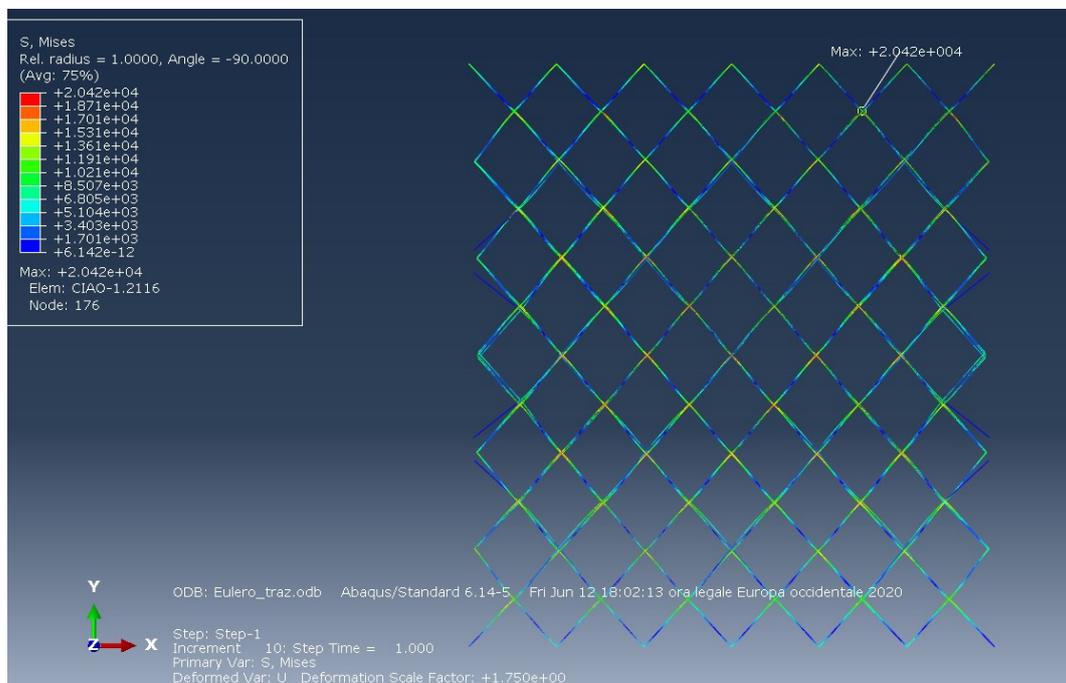


Figura 7.14-Tensione di Von Mises ottenuta mediante l'utilizzo di elementi beam B31

## Struttura con cella Diamond

Per mettere a punto il modello FEM con cui simulare le strutture lattice con cella diamond si sono utilizzati i risultati delle prove in compressione quasi-statica D1-01 e D1-02.

Le condizioni al contorno che si sono utilizzate sono riportate in Figura 7.15 ed in particolare:

- I nodi inferiori sono stati vincolati nella direzione di schiacciamento (Z);
- Ai nodi superiori è stato applicato uno spostamento imposto in modo da replicare l'effetto dell'avanzamento della traversa della macchina durante il test;
- Su un altro nodo tra quelli inferiori sono state vincolate le altre due traslazioni (X e Y);
- Per bloccare la rotazione intorno all'asse Z è stato scelto opportunamente un ultimo nodo, tra quelli inferiori, su cui è stata bloccata la traslazione lungo Y;

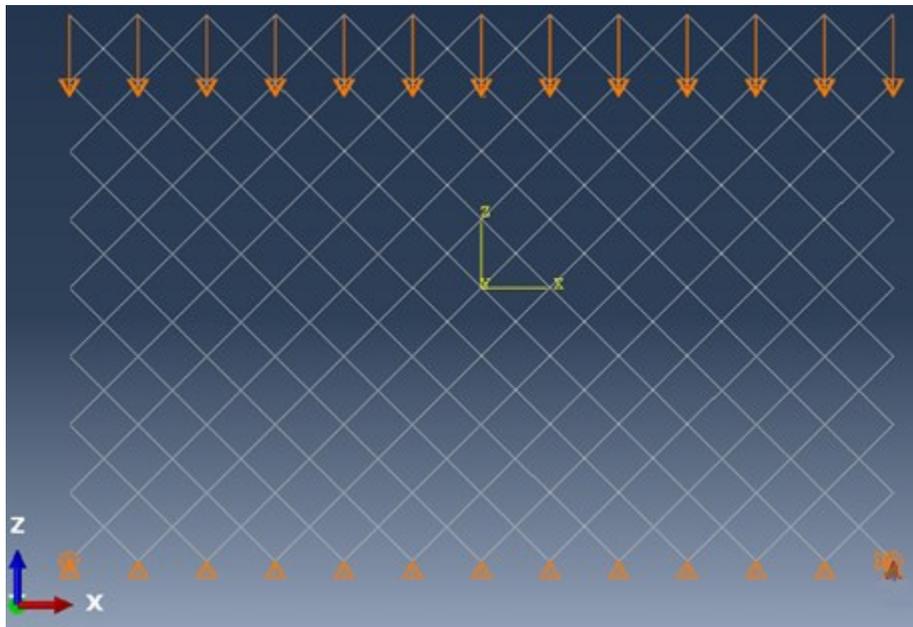


Figura 7.15-Condizioni al contorno modello FEM

Per il comportamento del materiale è stato impostato lo stesso modello elasto-plastico utilizzato per la caratterizzazione del materiale base e come curva di flusso plastico gli è stata data quella ottimizzata nel Capitolo 5 e che tiene conto anche della velocità di deformazione.

Per tenere conto della maggior densità di materiale in prossimità dei nodi e considerando che il modello con elementi beam non vede il loro mutuo contatto, è stato sviluppato uno script Python che permettesse di controllare la dimensione delle sezioni degli elementi della struttura convergenti nei nodi. In questo modo è stato possibile simulare la maggior rigidità dei nodi delle struts assegnando al primo elemento uscente una sezione circolare con diametro il 40% più grande di quello nominale. Questo valore è stato scelto coerentemente con quanto fatto in [27] e [52] ed ottimizzato attraverso una calibrazione inversa sui test sperimentali. L'elemento con sezione maggiore è stato impostato in modo da coprire 1/8 della lunghezza complessiva della strut. A tutti gli altri elementi è stato assegnato un diametro pari al valor medio misurato. Un esempio di quanto fatto è mostrato in Figura 7.16.

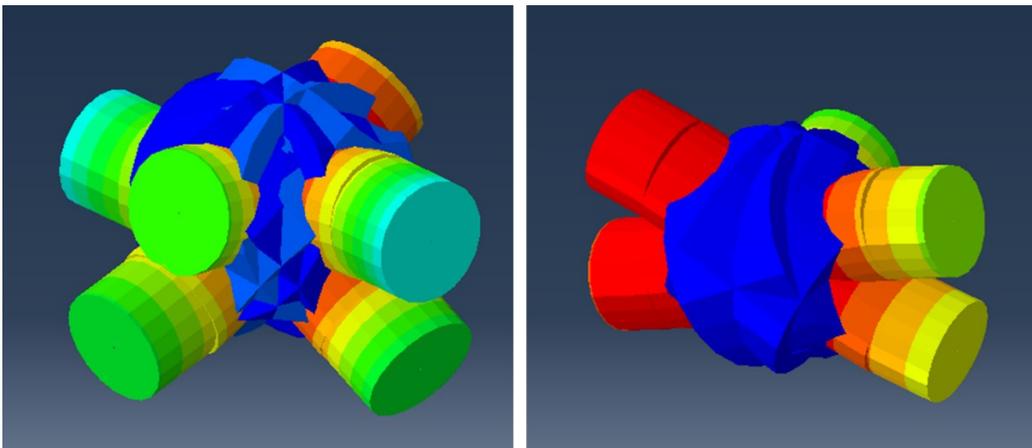
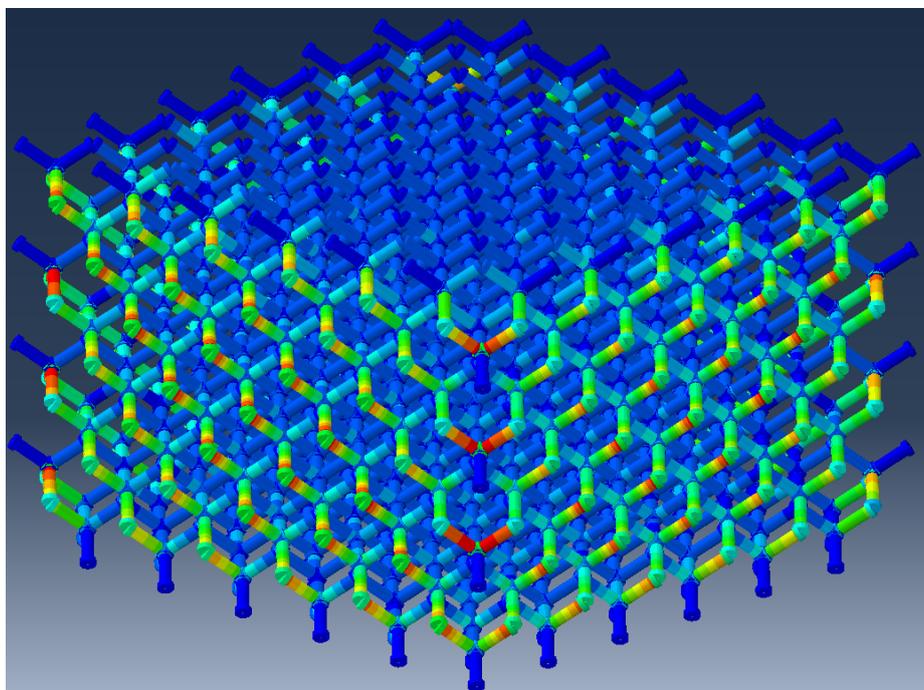


Figura 7.16-Inspessimento sezioni al nodo

Il modello così costituito è riportato in Figura 7.17, nella quale è rappresentato solo graficamente lo spessore delle beam.



*Figura 7.17-Modello FEM provino DI*

In Figura 7.18 è riportato il risultato di questa analisi in termini di forza spostamento. Dalla figura si può notare come la rigidezza complessiva della struttura ed il valore di forza di plateau siano in buon accordo con i dati sperimentali. Le differenze principali che si possono notare rispetto alla curva sperimentale sono essenzialmente due:

1. Il modello FEM proposto, simulando la struttura come geometricamente perfetta, non riesce a cogliere le cadute di carico che possono essere dovute a fenomeni di instabilità localizzata sulle struts con maggiori difetti geometrici e dimensionali;
2. Non essendo stato modellato il contatto tra beam, nel FEM non si ha la densificazione finale;

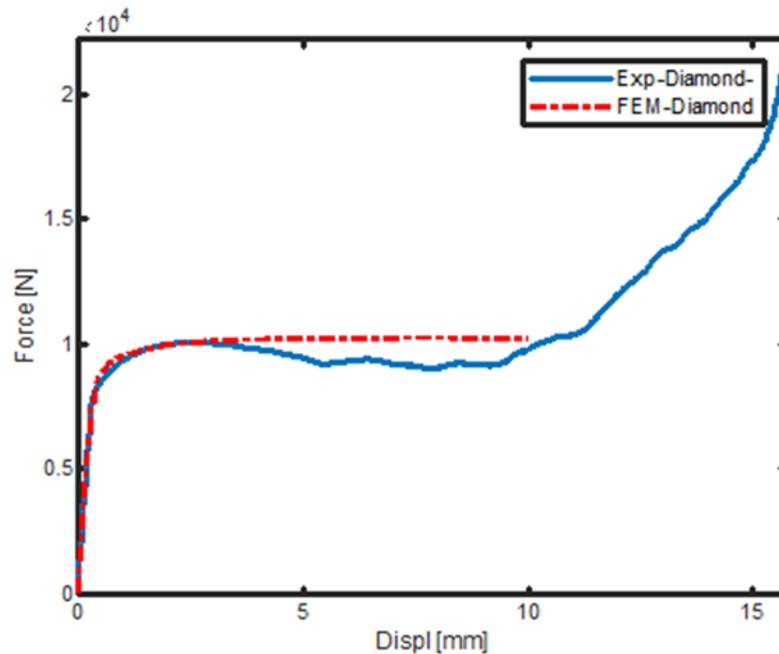


Figura 7.18-Confronto risultati FEM e sperimentali per compressioni quasi-statiche tipo D1

### **Struttura con cella Rhombic Dodecahedron**

Il modello per la simulazione della prova di compressione della cella Rhombic è identico a quello descritto per la cella diamond tranne che per un fattore: il numero di elementi uscenti dal nodo, al quale è stato assegnato diametro maggiore è di due e non di uno. Complessivamente è stata vincolata con sezione maggiore una lunghezza uscente dal nodo pari a  $\frac{1}{4}$  della strut. L'incremento del diametro applicato resta pari al 40%. In Figura 7.19 è riportata un'immagine dalla quale si può apprezzare bene una delle differenze, tra cella diamond e rhombic, ritenuta fondamentale per la corretta modellazione FEM con elementi beam. Gli assi delle struts che convergono in un nodo nella cella diamond formano un angolo di  $90^\circ$  mentre nella cella rhombic di  $45^\circ$  circa; questo si traduce nel fatto che, a parità di sezione delle struts, l'estensione dell'intersezione (e quindi la dimensione del nodo) risulta essere circa il doppio per la cella rhombic. Per queste ragioni si è deciso di assegnare la sezione maggiorata ad un numero di elementi uscente dal nodo pari al doppio (Figura 7.20).

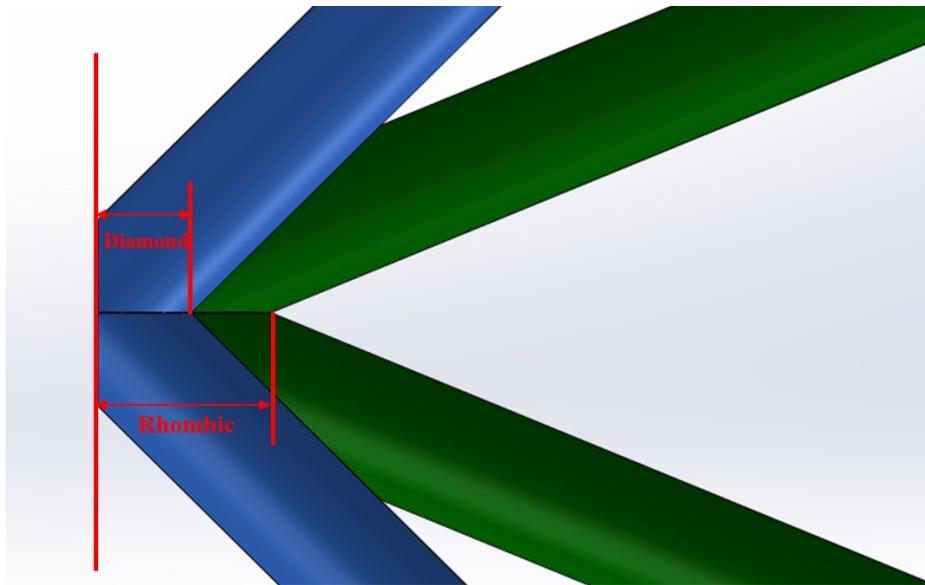


Figura 7.19-Confronto intersezione struts per cella diamond (blu) e rhombic dodecahedron (verde)

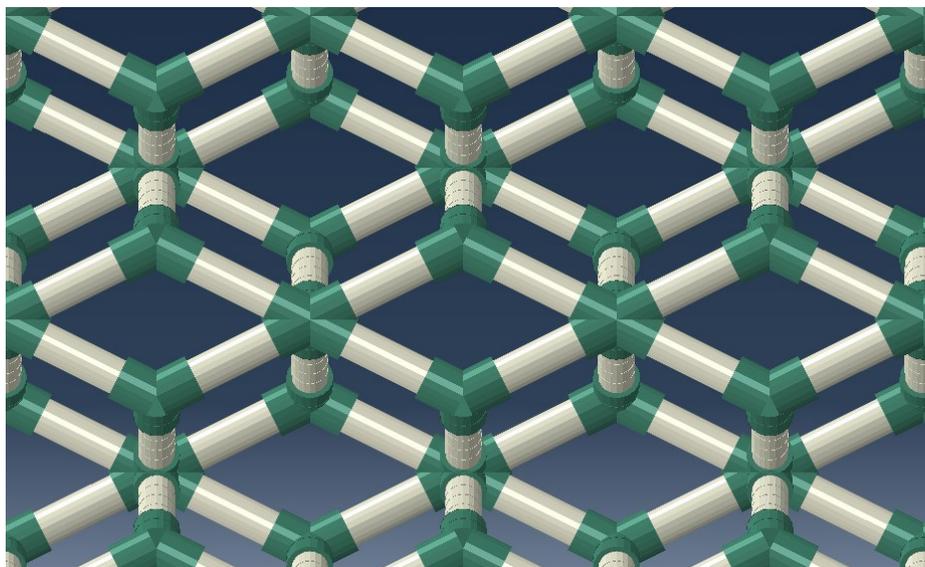


Figura 7.20-Elementi con sezione maggiore per la cella rhombic dodecahedron

In Figura 7.21 è riportato il confronto tra i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli ottenuti tramite simulazione FEM.

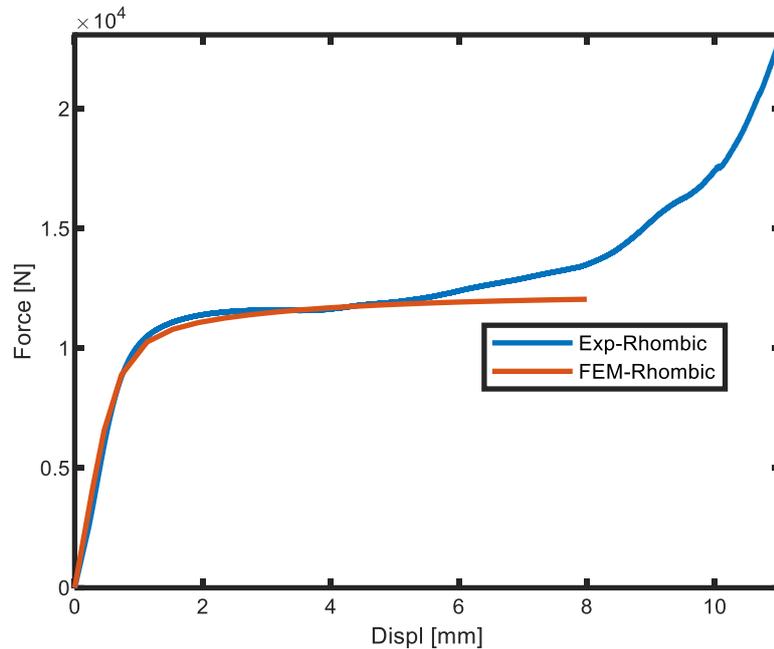


Figura 7.21-Confronto risultati FEM e sperimentali per compressioni quasi-statiche su cella rhombic dodecahedron

## 7.2.2 Gli spari

Il test balistico sottopone la struttura indagata ad uno stato tensionale multiassiale, con un forte effetto strain rate e temperatura. In questo test una sfera di acciaio è proiettata ad una velocità di circa 200m/s contro le strutture lattice di tipo 2. L'impatto non è avvenuto direttamente sul reticolo della struttura ma bensì su di un piatto spesso 2mm stampato di pezzo con essa. Durante questa tipologia di test si valuta l'energia assorbita dalla struttura lattice a seguito dell'impatto, monitorando la velocità della sfera d'acciaio prima e dopo che questo sia avvenuto.

In questa fase si è cercato di mettere a punto un modello che potesse prevedere il comportamento della struttura lattice in termini di energia assorbita e lo si è fatto mediante l'utilizzo di un materiale omogeneizzato. In questo modo è possibile analizzare grandi strutture senza la necessità di raggiungere elevati numeri di elementi. Tale approccio permette inoltre di confrontare caratteristiche diverse (dinamiche, strutturali ecc.) modificando i parametri del materiale e quelli geometrici relativi alla cella elementare, e di valutarne l'impatto globale all'interno di un sistema più complesso. Il principio generale dell'omogeneizzazione è rappresentato in Figura 7.22, nella quale il materiale discreto viene omogeneizzato con un continuo equivalente.

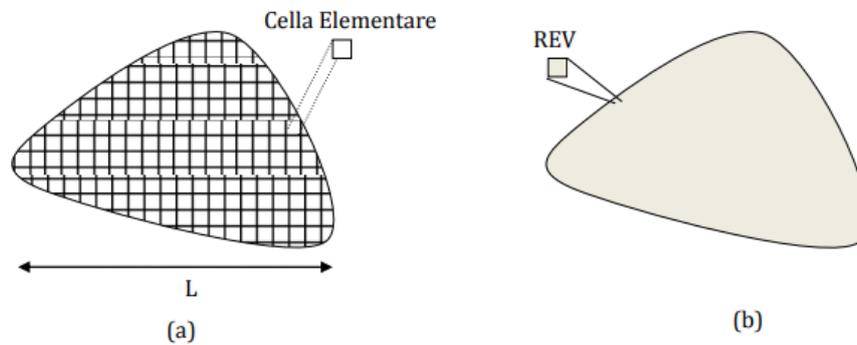


Figura 7.22- Trasformazione di un reticolo periodico (a) con un continuo equivalente (b) tramite omogeneizzazione e rispettive celle elementari [56].

Il termine omogeneizzazione è utilizzato in analogia a quanto sviluppato per l'analisi di materiali eterogenei. Il significato è molto simile in quanto si sostituisce ad un materiale eterogeneo o discontinuo un continuo equivalente. Inoltre, mentre una grossa problematica dell'omogeneizzazione dei materiali eterogenei è la definizione del RVE (Representative Volume Element) qui è facilmente definito dalla cella elementare del reticolo, cioè dalla parte ripetitiva più piccola della struttura [56].

Il software utilizzato per le simulazioni esplicite dinamiche è LS-Dyna, ed il materiale che si è deciso di utilizzare è il MAT\_026. Il Material Type 26 è usato principalmente per simulare materiali anisotropi come honeycomb e schiume. Possono essere definite separatamente delle curve elastoplastiche per gli stress normali e di taglio, considerandoli completamente disaccoppiati: applicando una deformazione in direzione  $x$ , l'unica componente diversa da zero nel tensore degli stress sarà solo la  $\sigma_{xx}$  (lo stesso vale per le altre componenti tenso-deformative). Altra considerazione importante è che il modulo elastico del materiale non è fisso ma anzi varia partendo dal suo valore iniziale, pari a quello della struttura lattice indeformata, fino a quello associato alla completa compattazione, pari a quello del materiale base, raggiunta in corrispondenza di  $V_f$ . Questa variazione è lineare e segue le leggi (20):

$$E_{aa} = E_{aa0} + \beta(E - E_{aa0})$$

$$E_{bb} = E_{bb0} + \beta(E - E_{bb0})$$

$$\begin{aligned}
E_{cc} &= E_{ccu} + \beta(E - E_{ccu}) \\
G_{ab} &= E_{abu} + \beta(G - G_{abu}) \\
G_{bc} &= E_{bcu} + \beta(G - G_{bcu}) \\
G_{ca} &= E_{cau} + \beta(G - G_{cau})
\end{aligned} \tag{20}$$

In cui  $E_{aa}$  è il modulo elastico istantaneo in direzione  $a$  e dipende dal modulo elastico del materiale base  $E$ , dal modulo elastico iniziale della struttura indeformata  $E_{aa0}$  nella direzione di interesse e da  $\beta$ , con:

$$\beta = \max \left[ \min \left( \frac{1 - V}{1 - V_f}, 1 \right), 0 \right] \tag{21}$$

$V$  è il volume relativo istantaneo, definito come il rapporto tra il volume corrente e quello iniziale. Questo, prima che avvenga qualsiasi tipo di deformazione, è uguale ad 1 e quindi in questo caso  $\beta$  assume il valore minimo tra zero e uno. Quindi ad inizio prova di compressione la risposta elastica della struttura, nella direzione  $a$  ad esempio, è pari ad  $E_{aa0}$ . Questo valore poi varierà linearmente fino a raggiungere  $E$ , che è quello del materiale base e quindi della struttura quando si raggiunge la piena compattazione, ovvero quando  $V = V_f$ . Ovviamente stesso discorso vale per le altre  $E$ .  $G$  invece, per un materiale completamente compattato, raggiunge un valore di

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)} \tag{22}$$

Come detto, per la definizione corretta del materiale omogenizzato in LS-Dyna, c'è bisogno di sei curve: tre compressioni e tre tagli. Sperimentalmente si è ricavata però la curva a compressione solo in una direzione e quindi sorge il problema di come ricavare le altre cinque curve. Per farlo si utilizzerà il modello FEM implicito con elementi beam messo a punto precedentemente. Il modello proposto in precedenza è stato quindi utilizzato non solo per replicare i test condotti in laboratorio ma anche per estendere la

nostra conoscenza sulle strutture lattice in esame, ricavando le altre cinque curve di cui necessitiamo per la messa appunto del materiale omogenizzato in LS-Dyna. La trasferibilità del modello su test diversi da quelli per cui lo si è verificato non è garantita e sarà un'ipotesi alla base dello sviluppo del modello dinamico esplicito. La possibilità che il modello sia trasferibile è stata in parte già indagata quando, con le stesse impostazioni, si è riusciti a replicare sia i test a compressione su strutture diamond che rhombic. La risposta definitiva sull'accettabilità o meno di questa ipotesi è stata vagliata verificando che i risultati del FEM esplicito che riproduce il test balistico, di cui la stessa ipotesi è alla base, siano congruenti con quelli dei test balistici sperimentali. In Figura 7.23 è riportata un'immagine del modello FEM del test balistico nella quale:

- in giallo è riportata la sfera impattante a cui è stato imposta una velocità iniziale di 200 m/s ed alla quale è stato assegnato materiale rigido;
- in verde la piastra anteriore stampata di pezzo con la struttura lattice (in blu) ed alla quale è stata assegnata la curva la curva di flusso plastico ottimizzata nel Capitolo 5;
- in marrone la piastra su cui la struttura lattice è appoggiata, supposta rigida e di cui si sono vincolati tutti i gradi di libertà.

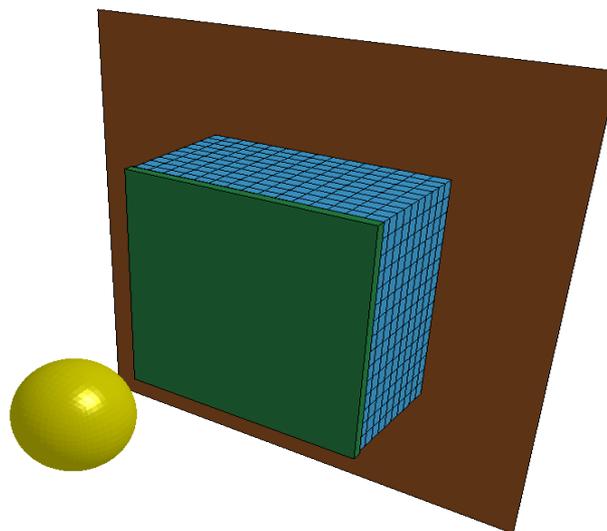


Figura 7.23-Modello FEM del test balistico.

In Figura 7.24 è riportata l'andamento tipico dello spostamento del proiettile in un test balistico, dal quale si possono ricavare tutte le informazioni indicate in figura. L'attinenza della forma della curva ottenuta al FEM con quelle di figura sarà utilizzata come check che il modello sia ben impostato.

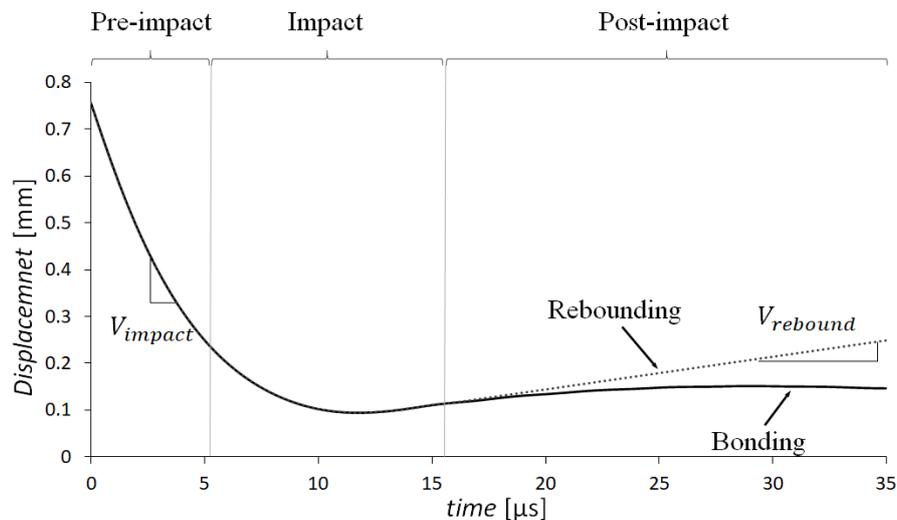


Figura 7.24-Risultati tipo dei test balistici [57].

In Figura 7.26 è riportato il confronto della deformazione della struttura lattice Rhombic di tipo 2 (R2-1) ottenuta sperimentalmente e al FEM. Quello che si nota è che principalmente la sfera sembra penetrare leggermente meno nella simulazione FEM, per cui la durata dell'impatto è minore ed il rimbalzo leggermente maggiore. La velocità della sfera è riportata in Figura 7.25, in cui è riportato l'andamento della velocità nel tempo e dalla quale si può vedere che la velocità di rimbalzo è di 15,4m/s contro i 14m/s del test sperimentale. Dalla conoscenza della velocità di rimbalzo si riesce a risalire alla quantità di energia assorbita dal materiale, pari a 533,9J al FEM e 534,3J nel test sperimentale.

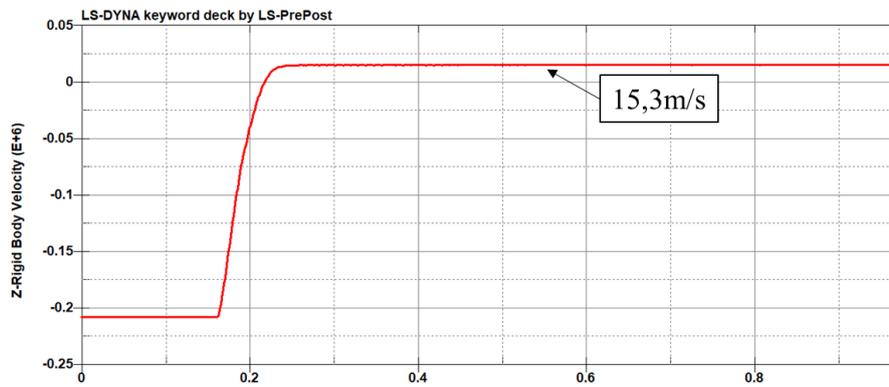


Figura 7.25-FEM: Velocità della sfera nel tempo

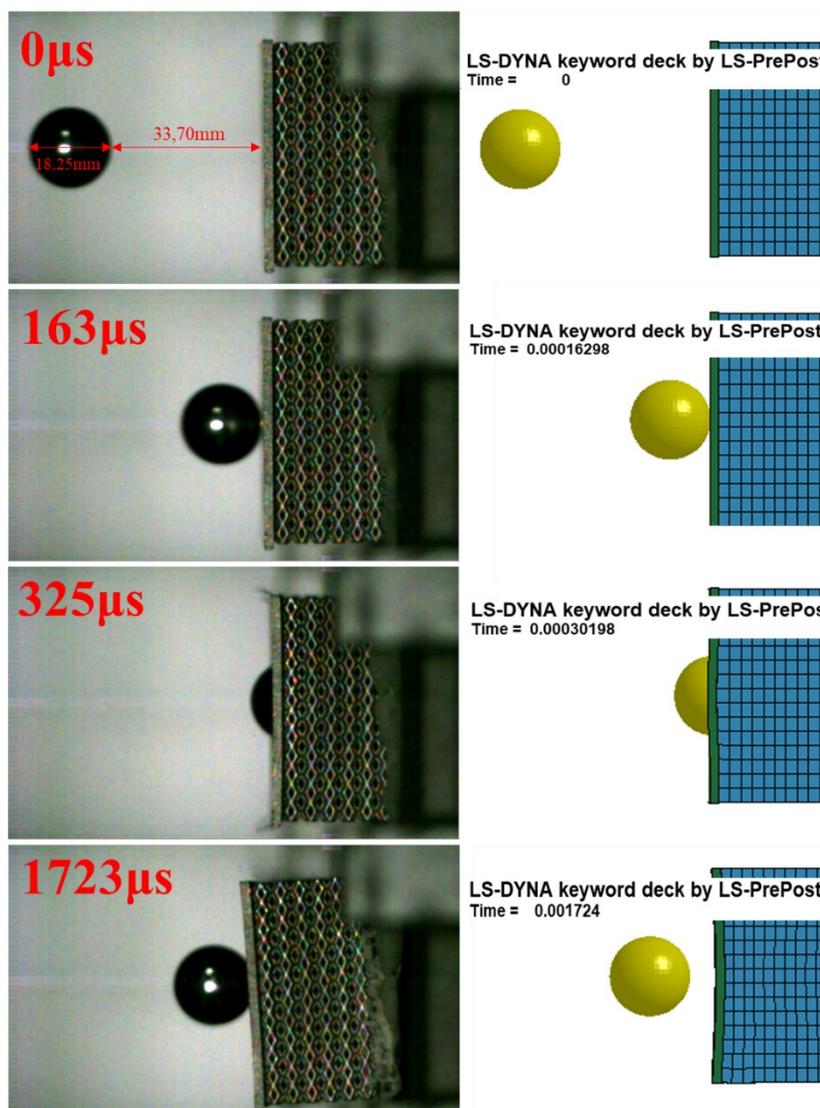


Figura 7.26-Confronto frames dell'impatto FEM e sperimentale

In Figura 7.27 e Figura 7.28 sono riportati rispettivamente il bilancio energetico e l'andamento della posizione della sfera nel tempo, entrambi relativi all'analisi FEM. L'analisi del bilancio energetico sembra buona, mostrando che quasi la totalità dell'energia cinetica iniziale della sfera viene assorbita durante l'impatto, mantenendo su valori quasi nulli l'energia di Hourglass. Dall'analisi del grafico della posizione della sfera si può solo dire che questo sembra avere una forma in accordo con la teoria proposta in Figura 7.24, ulteriore segno della bontà dell'analisi condotta.

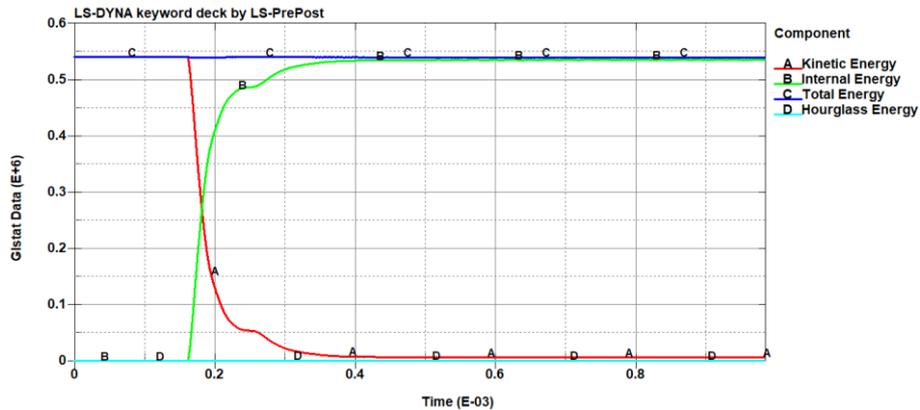


Figura 7.27-FEM: bilancio energetico

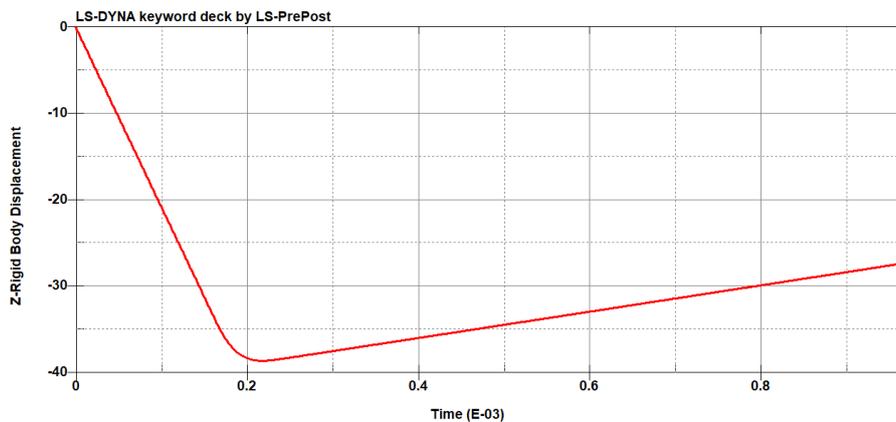


Figura 7.28-FEM: andamento posizione della sfera nel tempo

Il modello FEM così sviluppato sembra in buon accordo con i dati sperimentali, riuscendo a prevedere in maniera accurata l'energia assorbita dalla struttura lattice durante

l'impatto. La convergenza del modello sul test balistico dà inoltre conferma che il modello implicito con elementi beam di Tikoshenko ed inspessimento ai nodi, possa essere usato non solo per replicare test di laboratorio ma anche per prevedere il comportamento del materiale.

# Capitolo 8

## Conclusioni

L'obiettivo di questa attività di ricerca era quello di approfondire il comportamento delle strutture lattice, caratterizzando nello specifico quelle stampate in 17-4PH, e di sviluppare una linea guida per la loro progettazione che possa portare a ritenerle affidabili.

In prima istanza, data la complessità nella realizzazione delle strutture lattice e, dato che la scelta dei parametri di processo sulla risposta meccanica del materiale non è trascurabile, si è deciso di indagare proprio il loro legame. In questa fase sono state realizzate diverse strutture lattice e si è giunti all'individuazione del set di parametri ottimo sia in termini dimensionali che di risposta in compressione. Si è visto inoltre che la precisione dimensionale e la formazione dei *satellites*, sembrano dipendere direttamente dalla dimensione della *melt pool* che si genera durante il processo di scansione delle polveri.

Successivamente, con il set di parametri che si è ritenuto migliore, si sono realizzati dei provini *bulk* con cui testare le proprietà del 17-4PH in funzione della direzione di stampa, della temperatura e della velocità di deformazione. Quello che si è notato dai test quasi statici ed in temperatura è che le risposte meccaniche dei provini stampati a 0° e 45° rispetto al piatto di stampa sono sempre molto simili tra loro mentre quella per i provini a 90° è differente. L'effetto strain rate sembra invece far perdere la dipendenza dalla direzione di stampa. Sia le prove in temperatura che quelle ad elevate velocità di deformazione mostrano un aumento dello snervamento del materiale ed un suo minor incrudimento, molto accentuato invece sui test quasi statici a temperatura ambiente. Si è notato inoltre un comportamento riconducibile al *dynamic strain aging* per i test quasi

---

statici in temperatura. Sulla base dei risultati ottenuti in questa fase è stato sviluppato un modello per la definizione della curva di flusso plastico del materiale attraverso l'ausilio di una calibrazione inversa condotta con i software Matlab ed Abaqus CAE. Il modello proposto tiene conto della dipendenza della tensione plastica sia dalla temperatura che dalla velocità di deformazione.

Con l'obiettivo di approfondire il comportamento meccanico delle strutture lattice sono stati realizzati diversi provini con cella Diamond e Rhombic Dodecahedron e li si è testati sia in compressione quasi statica che dinamica. I test dinamici hanno visto le strutture lattice deformate in compressione alla barra di Hopkinson e sottoposte a test balistici. A valle di questa fase di analisi si è resa evidente una forte dipendenza della risposta meccanica dalla densità relativa, già nota in letteratura. Si è visto inoltre che la cella diamond sembra leggermente più sensibile alla velocità di deformazione mostrando una risposta  $\sigma$ - $\varepsilon$  leggermente in controtendenza con quanto visto in regime quasi-statico. In generale la risposta macroscopica delle strutture analizzate non è sembrata sensibilmente influenzata dall'effetto strain rate.

A valle della caratterizzazione del materiale e della sperimentazione delle strutture lattice, è stato sviluppato un modello FEM implicito con il software Abaqus CAE. Il modello ripropone la geometria tridimensionale delle strutture modellando però le singole struts attraverso l'utilizzo di elementi beam di Timoshenko. Attraverso la creazione di uno script Python, linguaggio alla base di Abaqus, si è assegnata una sezione maggiore agli elementi convergenti ai nodi, in modo da riuscire a modellare la loro maggior rigidità. I risultati ottenuti in questo modo sono risultati in buon accordo con i test sperimentali condotti sia sulle strutture con cella elementare di tipo sia diamond che rhombic dodecahedron.

Successivamente è stato sviluppato un approccio per la modellazione di fenomeni impattivi mediante l'interazione tra il modello implicito con elementi beam descritto in precedenza e un nuovo modello esplicito omogenizzato. Il modello con elementi beam è stato utilizzato per ricavare le proprietà mancanti delle strutture lattice da utilizzare per caratterizzare il solido equivalente all'interno dell'analisi esplicita. I risultati ottenuti con questo approccio sono stati in buon accordo con quanto osservato sperimentalmente,

dando conferma della validità dell'ipotesi di trasferibilità del modello implicito sviluppato con Abaqus CAE.

In conclusione, conoscendo le proprietà del materiale base stampato ed effettuando test di compressione quasi statica in un'unica direzione, applicando la procedura di simulazione proposta, si potrebbero simulare in maniera affidabile fenomeni dalla complessità pari a quella dei test balistici.

## Bibliografia

- [1] Magar S, Khedkar N K and Kumar S 2018 Review of the effect of built orientation on mechanical Properties of metal-plastic composite parts fabricated by Additive Manufacturing Technique *Mater. Today Proc.* **5** 3926–35
- [2] Sanjari M, Hadadzadeh A, Pirgazi H, Shahriari A, Amirkhiz B S, Kestens L A I and Mohammadi M 2020 Selective laser melted stainless steel CX: Role of built orientation on microstructure and micro-mechanical properties *Mater. Sci. Eng. A* **786** 139365
- [3] Hutasoit N, Javed M A, Rashid R A R, Wade S and Palanisamy S 2021 Effects of build orientation and heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of Al6061 aluminium parts built by cold spray additive manufacturing process *Int. J. Mech. Sci.* **204** 106526
- [4] Persenot T, Burr A, Martin G, Buffiere J Y, Dendievel R and Maire E 2019 Effect of build orientation on the fatigue properties of as-built Electron Beam Melted Ti-6Al-4V alloy *Int. J. Fatigue* **118** 65–76
- [5] Wohlers T and Gornet T 2014 History of Additive Manufacturing 2014 *Wohlers Rep. 2014 - 3D Print. Addit. Manuf. State Ind.* 1–34
- [6] Mariani Eugenio 2017 L'adozione dell'Additive Manufacturing nel settore della componentistica auto e il suo impatto sulle performance aziendali
- [7] Beltrametti L and Gasparre A 2014 La manifattura additiva. Alcune valutazioni economiche con particolare riferimento all'industria italiana *Cent. Stud. Confin.* 1–24
- [8] Bravi L 2018 *Economia e Management Additive Manufacturing : analysis of the economic context and evaluation of the indoor air quality , with a Total Quality Management approach*

- 
- [9] Potti G 2020 Fabbrica 4.0, la nuova rivoluzione è digitale ed IISole24ORES.p.A. and Confindustria Servizi Innovativi e Tecnologici 9–11
- [10] Confindustria Servizi Innovativi e Tecnologici I p. A 2015 *Fabrica 4.0 La Rivoluzione della Manifattura Digitale: Come ripensare I processi e I prodotti con I servizi innovativie tecnologici* vol 1
- [11] Paolazzi L 2015 La manifattura è alla base dello sviluppo economico ed IISole24ORES.p.A. and C S I e Tecnologici 15–7
- [12] Cotteleer M, Mahto M and Holdowsky J 2013 The 3D opportunity primer *A Deloitte Ser. Addit. Manuf.* 2–14
- [13] Chiu B W 2015 *Additive Manufacturing Applications and Implementation in Aerospace, PhD Thesis* (Massachusetts Institute of Technology, MIT)
- [14] Sisti J C 2018 *Effetto dei principali parametri di processo sulla stabilità della pozza fusa durante un processo additivo di una lega di alluminio, Master's Degree Thesis* (Politecnico di Torino)
- [15] Gibson I, Stucker D and Rosen B 2015 *Additive Manufacturing Technologies*
- [16] Ruffo M, Tuck C and Hague R 2006 Cost estimation for rapid manufacturing - Laser sintering production for low to medium volumes *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* **220** 1417–27
- [17] Allen J 2006 An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts *Cost Eff. Manuf. via Net-Shape Process.* 17-1-17–10
- [18] Baumers M, Tuck C, Wildman R, Ashcroft I, Rosamond E and Hague R 2012 Combined build-time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser sintering *23rd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2012* 932–44
- [19] Cotteleer M and Joyce J 2014 3D Opportunity Additive manufacturing paths to performance , *Deloitte Dev. LLC* 3–19
- [20] Varotsis A B 3D printing vs . CNC machining *Libr. Cat. www.3dhubs.com.*
- [21] Son Y K 1991 A cost estimation model for advanced manufacturing systems *Int. J. Prod. Res.* **29** 441–52
- [22] Thomas D S and Gilbert S W 2015 Costs and cost effectiveness of additive

- manufacturing: A literature review and discussion *Addit. Manuf. Costs, Cost Eff. Ind. Econ.* 1–96
- [23] Atzeni E and Salmi A 2012 Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **62** 1147–55
- [24] Gibson L J . M F A 1997 *Cellular solids: structure and properties* vol 22, ed Cambridge (Cambridge University Press)
- [25] Ashby M 2013 Designing architected materials *Scr. Mater.* **68** 4–7
- [26] Ashby M F 2006 The properties of foams and lattices *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **364** 15–30
- [27] A. Zargarian, M. Esfahanian, J. Kadkhodapour S Z-R 2016 Numerical simulation of the fatigue behavior of additive manufactured titanium porous lattice structures *Mater. Sci. Eng. C* **60** 339–47
- [28] Amir Abbas Zadpoor R H 2016 Analytical relationships for prediction of the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials *J Biomed Mater Res Part A* 104A:3164–3174
- [29] Ahmadi S M, Campoli G, Amin Yavari S, Sajadi B, Wauthle R, Schrooten J, Weinans H and Zadpoor A A 2014 Mechanical behavior of regular open-cell porous biomaterials made of diamond lattice unit cells *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **34** 106–15
- [30] Van Hooreweder B, Apers Y, Lietaert K and Kruth J P 2017 Improving the fatigue performance of porous metallic biomaterials produced by Selective Laser Melting *Acta Biomater.* **47** 193–202
- [31] Suard M 2015 *ees par EBM Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting Caractérisation et Optimisation de structures treillis fabriquées par EBM*
- [32] Maxwell J C F R . 1864 On the Calculation of the Equilibrium and Stiffness of Frames *Philosophical Mag. Ser. 4* **27** 294–9
- [33] Lakes R, Variability N, Physcscs A, Meteorolgica W and Symposium O 1987 Foam Structures with a Negative Poisson’s Ratio *Science (80-. ).* **235** 1038–41
- [34] Atae A, Li Y, Brandt M and Wen C 2018 Ultrahigh-strength titanium gyroid scaffolds manufactured by selective laser melting (SLM) for bone implant

- applications *Acta Mater.* **158** 354–68
- [35] Leary M, Mazur M, Elambasseril J, McMillan M, Chirent T, Sun Y, Qian M, Easton M and Brandt M 2016 Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures *Mater. Des.* **98** 344–57
- [36] de Krijger J, Rans C, Van Hooreweder B, Lietaert K, Pouran B and Zadpoor A A 2017 Effects of applied stress ratio on the fatigue behavior of additively manufactured porous biomaterials under compressive loading *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **70** 7–16
- [37] Gibson L J and Ashby M F 1982 Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials. *Proc. R. Soc. London, Ser. A Math. Phys. Sci.* **382** 43–59
- [38] Brooks W, Sutcliffe C, Cantwell W, Fox P, Todd J, Mines R. In: Bourell DL, Crawford RH, Beaman JJ, Wood KL M H 2005 No Title *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium* (TX: Austin) pp 231–41
- [39] Santorinaios M, Brooks W, Sutcliffe C J and Mines R A W 2006 Crush behaviour of open cellular lattice structures manufactured using selective laser melting *WIT Trans. Built Environ.* **85** 481–90
- [40] Yan C, Hao L, Hussein A, Young P, Huang J and Zhu W 2015 Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering *Mater. Sci. Eng. A* **628** 238–46
- [41] Liverani E, Toschi S, Ceschini L and Fortunato A 2017 Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel *J. Mater. Process. Technol.* **249** 255–63
- [42] Köhnen P, Haase C, Bültmann J, Ziegler S, Schleifenbaum J H and Bleck W 2018 Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured lattice structures of stainless steel *Mater. Des.* **145** 205–17
- [43] Samuel K G, Mannan S L and Rodriguez P 1988 Serrated yielding in AISI 316 stainless steel *Acta Metall.* **36** 2323–7
- [44] Amin Yavari S, Ahmadi S M, Wauthle R, Pouran B, Schrooten J, Weinans H and Zadpoor A A 2015 Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **43** 91–100

- 
- [45] Zargarian A, Esfahanian M, Kadkhodapour J, Ziaei-Rad S and Zamani D 2019 On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures *Theor. Appl. Fract. Mech.* **100** 225–32
- [46] Ahmadi S M, Hedayati R, Li Y, Lietaert K, Tümer N, Fatemi A, Rans C D, Pouran B, Weinans H and Zadpoor A A 2018 Fatigue performance of additively manufactured meta-biomaterials: The effects of topology and material type *Acta Biomater.* **65** 292–304
- [47] Yan C, Hao L, Hussein A, Bubb S L, Young P and Raymont D 2014 Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering *J. Mater. Process. Technol.* **214** 856–64
- [48] ASTM International 2013 Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle *Astm B962-13* i 1–7
- [49] Obaton A F, Lê M, Prezsa V, Marlot D, Delvart P, Huskic A, Senck S, Mahé E and Cayron C 2018 Investigation of new volumetric non-destructive techniques to characterise additive manufacturing parts *Weld. World* **62** 1049–57
- [50] ISO 13314 2011 ISO 13314 Mechanical testing of metals, ductility testing, compression test for porous and cellular metals *Ref. number ISO*
- [51] Hao L, Raymont D, Yan C, Hussein A and Young P 2012 Design and additive manufacturing of cellular lattice structures *Innov. Dev. Virtual Phys. Prototyp. - Proc. 5th Int. Conf. Adv. Res. Rapid Prototyp.* 249–54
- [52] Smith M, Guan Z and Cantwell W J 2013 Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique *Int. J. Mech. Sci.* **67** 28–41
- [53] Xiao Z, Yang Y, Xiao R, Bai Y, Song C and Wang D 2018 Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting *Mater. Des.* **143** 27–37
- [54] Hedayati R, Hosseini-Toudeshky H, Sadighi M, Mohammadi-Aghdam M and Zadpoor A A 2018 Multiscale modeling of fatigue crack propagation in additively manufactured porous biomaterials *Int. J. Fatigue* **113** 416–27
- [55] Dallago M, Zanini F, Carmignato S and Pasini, D. Benedetti M Effect of the

- geometrical defectiveness on the mechanical properties of SLM biomedical Ti6Al4V lattices *Procedia Struct. Integr.* 13 161–167
- [56] Zecchetto M 2013 Omogeneizzazione e indentazione in honeycomb
- [57] Viscusi, A.; Bruno, M.; Esposito, L.; Testa G An Experimental-Numerical Study of Bonding Mechanism in Cold Spray Technology for Metals *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **in press**