

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA
MECCANICA



Tesi di Laurea Specialistica

Caratterizzazione strutture cellulari in matrice polimerica per processi additivi

Relatore

Prof. Giorgio De Pasquale

Candidato

Stefano Sibona

A.A. 2018/19

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il professore Giorgio De Pasquale per avermi fornito l'opportunità e il supporto necessari allo svolgimento di questa tesi.

Ringrazio inoltre la 3D Systems nella figura di Riccardo Nicastro per aver reso realizzabile il progetto di tesi fornendo supporto e materiali con le loro tecnologie.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, i quali mi hanno permesso di intraprendere questo corso di studi sostenendomi poi per tutta la sua durata, e a mio fratello, con il quale ho condiviso questa esperienza e le interminabili sessioni di studio.

Ringrazio infine i miei amici e compagni di avventure con i quali ho condiviso questi anni universitari e senza i quali non sarebbe stato lo stesso.

Indice

Indice	I
Elenco delle figure.....	IV
Elenco delle tabelle.....	VIII
Abstract	X
Sommario	XI
1 Strutture Cellulari.....	1
1.1 Classificazione delle strutture cellulari	1
1.2 Strutture Lattice 3D	3
1.2.1 Il criterio di Maxwell	5
1.3 Additive Manufacturing.....	6
1.3.1 Ciclo dell'Additive Manufacturing	8
1.3.2 Tecniche di Additive Manufacturing	9
2 Scelta del reticolo.....	16
2.1 Analisi bibliografica	16
2.2 Progettazione del reticolo mediante modellazione numerica.....	24
2.2.1 Struttura a diamante.....	25
2.2.2 Struttura a Diamante e Colonne.....	29
2.2.3 Osservazioni.....	32
3 Attrezzature e materiali.....	34
3.1 Attrezzature.....	34
3.1.1 Macchina SLM: EOS M270.....	34
3.1.2 Macchina per elettroerosione a filo: Charmilles Robofil 330F.....	36

3.1.3	Macchina SLA: ProX 800.....	37
3.1.4	Macchina per il lavaggio: Ultrakleen.....	38
3.1.5	Forno UV: ProCure 750.....	38
3.1.6	Macchina per sabbiatura: Silco.....	39
3.1.7	Macchina per l’infiltrazione.....	39
3.1.8	Forno industriale.....	40
3.1.9	Macchina di prova servoidraulica: Instron 8801.....	40
3.2	Materiali.....	41
3.2.1	Resina per SLA: Accura Xtreme Gray.....	41
3.2.2	Polvere per SLM: LaserForm 316L.....	42
3.2.3	Silicone per la creazione dello stampo: Axson ESSIL 291.....	42
3.2.4	Resina poliuretana semirigida: Renishaw 8045.....	43
3.2.5	Elastomero poliuretano: Axson UPX8400-1.....	44
4	Definizione del processo di infiltrazione.....	45
4.1	Creazione della lattice structure metallica.....	45
4.2	Creazione del master in stereolitografia.....	48
4.3	Creazione dello stampo in silicone.....	51
4.4	Processo di infiltrazione.....	56
4.5	Prove di caratterizzazione.....	60
5	Prove sperimentali.....	61
5.1	Provini in gomma.....	61
5.1.1	Shore A 30.....	62
5.1.2	Shore A 60.....	64
5.1.3	Shore A 90.....	66
5.1.4	Osservazioni.....	68

5.2	Reticoli metallici.....	69
5.2.1	Provini con struttura a diamante.....	71
5.2.2	Provini con struttura a diamante e colonne.....	74
5.2.3	Osservazioni.....	77
5.3	Reticoli metallici infiltrati	79
5.3.1	Reticoli infiltrati con gomma Shore A 60.....	79
5.3.2	Reticoli infiltrati con gomma Shore A 30.....	83
5.3.3	Osservazioni.....	88
6	Analisi dati sperimentali	91
6.1	Energia assorbita.....	92
6.2	Influenza densità relativa del reticolo.....	93
6.3	Influenza durezza gomma infiltrata.....	95
6.4	Proprietà in funzione del peso	96
7	Conclusioni	99
8	Bibliografia.....	101

Elenco delle figure

Figura 1.1 Classificazione Strutture Cellulari [1].....	2
Figura 1.2 Confronto curve tensione-deformazione tra strutture a trazione prevalente e flessione prevalente [1]	4
Figura 1.3 Criterio di Maxwell [1]	5
Figura 1.4 Struttura Sandwich [3]	6
Figura 1.5 Struttura a nido d'ape [3]	6
Figura 1.6 Struttura reticolare ottenuta da fogli forati e piegati [3]	7
Figura 1.7 Ciclo dell'Additive Manufacturing	8
Figura 1.8 Tecniche di Additive Manufacturing [4].....	9
Figura 1.9 Fused Deposition Modelling [5].....	10
Figura 1.10 Stereolitografia [6].....	11
Figura 1.11 Direct Light Projection [7].....	12
Figura 1.12 Selective Laser Sintering [8].....	13
Figura 2.1 Strutture studiate da Rehme e Emmelmann [9]	16
Figura 2.2 Reticoli studiati da Mazur et Al. [10].....	18
Figura 2.3 Confronto tra struttura bcc (a sinistra) e bcc TPMS (a destra) [11]	18
Figura 2.4 Confronto proprietà bcc e bcc TPMS [11].....	19
Figura 2.5 Strutture sheet based + TPMS [12].....	20
Figura 2.6 Struttura bcc a sinistra e bccav a destra [13].....	21
Figura 2.7 Celle elementari bcc e bcc-z [14].....	22
Figura 2.8 bcc - Energia assorbita	25
Figura 2.9 bcc direzionale - Energia assorbita.....	26
Figura 2.10 Diamante - Energia assorbita.....	26
Figura 2.11 Struttura a diamante con gomma - Energia assorbita.....	27

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 2.12 bcc-z – Energia assorbita	29
Figura 2.13 bcc,z – Energia assorbita	29
Figura 2.14 Diamante e Colonne – Energia assorbita.....	30
Figura 2.15 Struttura a diamante e colonne con gomma – Energia assorbita	31
Figura 2.16 Simulazione impedimento all'espansione tramite supporti elastici	33
Figura 3.1 EOS M270.....	35
Figura 3.2 Charmilles Robofil 330F	36
Figura 3.3 ProX 800	37
Figura 3.4 Instron 8801.....	40
Figura 4.1 Provino con struttura a Diamante a sinistra e Diamante e colonne a destra	45
Figura 4.2 Supporti lattice structure.....	46
Figura 4.3 Stampa dei provini.....	46
Figura 4.4 Reticoli completato il processo di stampa.....	47
Figura 4.5 Modello cad del Master	48
Figura 4.6 Supporti e orientamento dei master	48
Figura 4.7 Piano di stampa Stereolitografia	49
Figura 4.8 Piano si stampa ProX 800.....	49
Figura 4.9 Master in stereolitografia finito.....	50
Figura 4.10 Master con traccia di divisione.....	51
Figura 4.11 Cassa per lo stampo in silicone	52
Figura 4.12 Master con canali e struttura di sostegno prima e dopo la verniciatura	52
Figura 4.13 Miscelazione del silicone con il catalizzatore	53
Figura 4.14 Colata del silicone	54
Figura 4.15 Stampo appena uscito dal forno.....	55
Figura 4.16 Apertura stampo e estrazione master.....	55
Figura 4.17 Posizionamento lattice structure nello stampo.....	56

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 4.18 Chiusura stampo e applicazione canale di colata	57
Figura 4.19 Macchina pronta per l'infiltrazione.....	58
Figura 4.20 Provini infiltrati.....	59
Figura 5.1 Provino gomma Shore A 30 pronto per la compressione	62
Figura 5.2 Controllo Isotropia Gomma Shore A 30.....	62
Figura 5.3 Prova compressione gomma Shore A 30.....	63
Figura 5.4 Ritorno provino gomma ShoreA30.....	63
Figura 5.5 Provino gomma Shore A 60 pronto per la compressione	64
Figura 5.6 Controllo Isotropia Gomma Shore A 60.....	64
Figura 5.7 Prova compressione gomma Shore A 60.....	65
Figura 5.8 Ritorno provino gomma ShoreA60.....	65
Figura 5.9 Provino gomma Shore A 90 pronto per la compressione	66
Figura 5.10 Controllo Isotropia Gomma Shore A 90.....	66
Figura 5.11 Prova compressione gomma Shore A 90.....	67
Figura 5.12 Ritorno provino gomma ShoreA90.....	68
Figura 5.13 Confronto gomme a compressione totale	68
Figura 5.14 Prova di compressione provino D1	71
Figura 5.15 Provino D1 compresso	72
Figura 5.16 Prova di compressione provini con struttura a diamante.....	72
Figura 5.17 Prova di compressione provino DC3.....	74
Figura 5.18 Provino DC3 compresso.....	75
Figura 5.19 Prova di compressione provini con struttura a diamante e colonne	76
Figura 5.20 Confronto reticoli metallici	78
Figura 5.21 Prova di compressione provino D1S6	80
Figura 5.22 Prova di compressione provino DC1S6.....	80
Figura 5.23 Provini D1S6 e DC1S6 dopo la compressione	81

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 5.24 Prova di compressione provini infiltrati con gomma Shore A 60	82
Figura 5.25 Prova di compressione provino D2S3	84
Figura 5.26 Provino D2S3 dopo la compressione	85
Figura 5.27 Prova di compressione provini infiltrati con gomma Shore A 30	86
Figura 5.28 Prova di compressione provini infiltrati	88
Figura 5.29 Influenza gomme su reticolo a diamante 5%	89
Figura 5.30 Influenza gomme su reticolo a diamante e colonne 5%	90
Figura 6.1 Energia assorbita in funzione della compressione	93
Figura 6.2 Influenza densità relativa del reticolo	94
Figura 6.3 Influenza della durezza della gomma infiltrata	95
Figura 6.4 Energia assorbita a 25 mm di compressione / Peso	97
Figura 6.5 Modulo elastico equivalente/Peso	98

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 Risultati prove Rehme e Emmelmann.....	17
Tabella 2.2 Risultati prove Rehme e Emmelmann rapportati alla densità	17
Tabella 2.3 Proprietà acciaio AISI 316L.....	25
Tabella 2.4 Proprietà gomma	27
Tabella 2.5 Riassunto dati FEM	32
Tabella 3.1 Dati tecnici EOS M270.....	35
Tabella 3.2 Parametri di Stampa.....	35
Tabella 3.3 Dati tecnici Robofill 330F	36
Tabella 3.4 Dati tecnici ProX 800	37
Tabella 3.5 Dati tecnici ProCure 750	38
Tabella 3.6 Proprietà Accura Xtreme Gray.....	41
Tabella 3.7 Proprietà LaserForm 316L	42
Tabella 3.8 Proprietà silicone Axson ESSIL 291	43
Tabella 3.9 Proprietà resina Renishaw 8045	43
Tabella 3.10 Proprietà Axson UPX8400-1	44
Tabella 4.1 Proprietà struttura Diamante e Diamante e colonne.....	45
Tabella 4.2 Prove di caratterizzazione	60
Tabella 5.1 Rapporti di miscela per gomme.....	61
Tabella 5.2 Dimensioni provini.....	69
Tabella 5.3 Reticoli stampati	69
Tabella 5.4 Pesi e densità relative reali dei reticoli	70
Tabella 5.5 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente provini con struttura a diamante.....	73
Tabella 5.6 Energia assorbita provini con struttura a diamante	73

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 5.7 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente provini con struttura a diamante e colonne.....	77
Tabella 5.8 Energia assorbita provini con struttura a diamante e colonne.....	77
Tabella 5.9 Provini infiltrati.....	79
Tabella 5.10 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente reticoli infiltrati con gomma Shore A 60	83
Tabella 5.11 Energia assorbita reticoli infiltrati con gomma Shore A 60	83
Tabella 5.12 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente reticoli infiltrati con gomma Shore A 30	87
Tabella 5.13 Energia assorbita reticoli infiltrati con gomma Shore A 30	87
Tabella 6.1 Dati sperimentali	91

Abstract

Al giorno d'oggi si stanno sfruttando sempre di più le tecnologie additive per far fronte a problemi in cui sono richiesti leggerezza, assorbimento di energia, resistenza all'impatto e possibilità di personalizzare il componente in funzione delle esigenze attuali o future. Al fine di soddisfare la richiesta di strutture sempre più performanti sono state apportate numerose modifiche ai reticoli utilizzati, i quali sono passati dalle più semplici strutture a travi e nodi a tipologie più complesse generate dall'unione booleana di più elementi solidi, fino ad arrivare a strutture in cui la forma delle aste e dei nodi è controllata tramite formulazioni matematiche con l'intento di aumentare la resistenza solo dove effettivamente necessario.

Lo studio effettuato in questa tesi cerca altre soluzioni oltre al solo miglioramento del reticolo per incrementare le proprietà di queste strutture. In particolare si è deciso di infiltrare dei reticoli metallici con della gomma in modo da unire le proprietà dei due materiali. Si è quindi caratterizzato il processo con il quale creare dei reticoli metallici infiltrati e successivamente tramite lo stesso sono stati prodotti dei campioni da testare. Nella produzione di questi campioni sono stati fatti variare tipologia di reticolo, densità relativa dello stesso e durezza della gomma infiltrata in modo da poter fare poi delle analisi su quali fossero i fattori più influenti sulle proprietà meccaniche.

In futuro è possibile continuare lo studio di queste strutture al fine di trovare la tipologia di reticolo che risulta più performante in seguito all'infiltrazione. Allo stesso tempo è possibile studiare la combinazione di parametri migliore, tra caratteristiche del reticolo e durezza della gomma, al fine di ottimizzare le proprietà meccaniche della struttura.

Sommario

Questa tesi si pone l'obiettivo di caratterizzare delle strutture cellulari in matrice polimerica per processi additivi. L'utilizzo che si è pensato per questa tipologia di struttura è l'assorbimento di energia meccanica e di urti.

Al fine di raggiungere tale obiettivo nel primo capitolo sono state analizzate e classificate le strutture cellulari presenti in letteratura. Si è poi passati all'analisi del ciclo dell'additive manufacturing in modo da rendere chiari i passaggi da effettuare per utilizzare questa tecnologia. Infine è stato presentato uno stato dell'arte delle varie tecniche di additive manufacturing presenti al momento sul mercato.

Nel secondo capitolo, dopo aver selezionato la tipologia di struttura lattice utilizzata in questa tesi, è stata effettuata un'analisi bibliografica di tutte le varietà di reticolo presenti in questa categoria. Sono quindi state scelte le tipologie di reticolo che, in seguito ad un'ottimizzazione tramite modellazione numerica, saranno poi utilizzate durante le prove sperimentali.

Nel terzo capitolo sono illustrate le attrezzature e i materiali utilizzati durante le varie fasi della tesi.

Si procede quindi con il quarto capitolo nel quale viene definito il processo di infiltrazione. In particolare vengono elencati tutti i passaggi necessari per creare le strutture lattice, realizzare lo stampo in silicone tramite la creazione di un master in Stereolitografia e infiltrare infine i reticoli metallici con dei polimeri.

Nel quinto capitolo vengono elencate tutte le prove sperimentali effettuate con i relativi dati e sono presentati dei primi confronti tra di esse.

L'analisi finale dei dati ricavati durante lo svolgimento della tesi viene invece presentata nel sesto capitolo al quale seguono poi le conclusioni.

1 Strutture Cellulari

1.1 Classificazione delle strutture cellulari

Con strutture cellulari si intendono tutti quei tipi di strutture formati da travi o superfici le quali sono interconnesse a formare una struttura chiusa. Alcuni esempi di questo tipo di struttura presenti in natura sono le celle esagonali degli alveari oppure la struttura porosa del femore bovino. Questi tipi di strutture hanno riscontrato sempre maggiore interesse nell'ambito dell'ingegneria in quanto sono caratterizzate da buone proprietà meccaniche, un buon assorbimento di energia [1] e ottime capacità di isolamento termico e acustico, il tutto mantenendo la massa dei componenti molto bassa. Sono quindi state utilizzate per molte applicazioni anche molto differenti tra loro, tra le principali: strutture alleggerite per utilizzo aerospaziale [2], motorsport e biomedico, strutture ad alta capacità di assorbimento d'urto e strutture conformate per ottimizzare lo scambio termico. Una classificazione di queste strutture [1] è visibile in Figura 1.1.

La prima suddivisione è in funzione della disposizione spaziale delle celle ed è tra strutture stocastiche e non stocastiche. La prima categoria è composta dalle schiume, le quali possono essere a cella aperta oppure chiusa. La distribuzione casuale è principalmente dovuta al processo con il quale si ottengono queste strutture, il quale è basato sull'iniezione di gas quali aria, argon o azoto all'interno del materiale fuso. Durante la solidificazione i gas rimanendo intrappolati all'interno del materiale danno vita alla struttura caratteristica di una schiuma. Uno dei difetti principali di questo processo è la possibilità di andare a controllare soltanto in modo parziale la densità delle bolle di gas iniettate all'interno del materiale senza consentire di andarne a controllare in modo preciso la distribuzione. Studi su questi tipi di strutture [2] dimostrano che le schiume a cella aperta hanno una buona capacità di assorbimento dell'energia meccanica, mentre quelle a cella chiusa hanno una buona rigidità e resistenza.

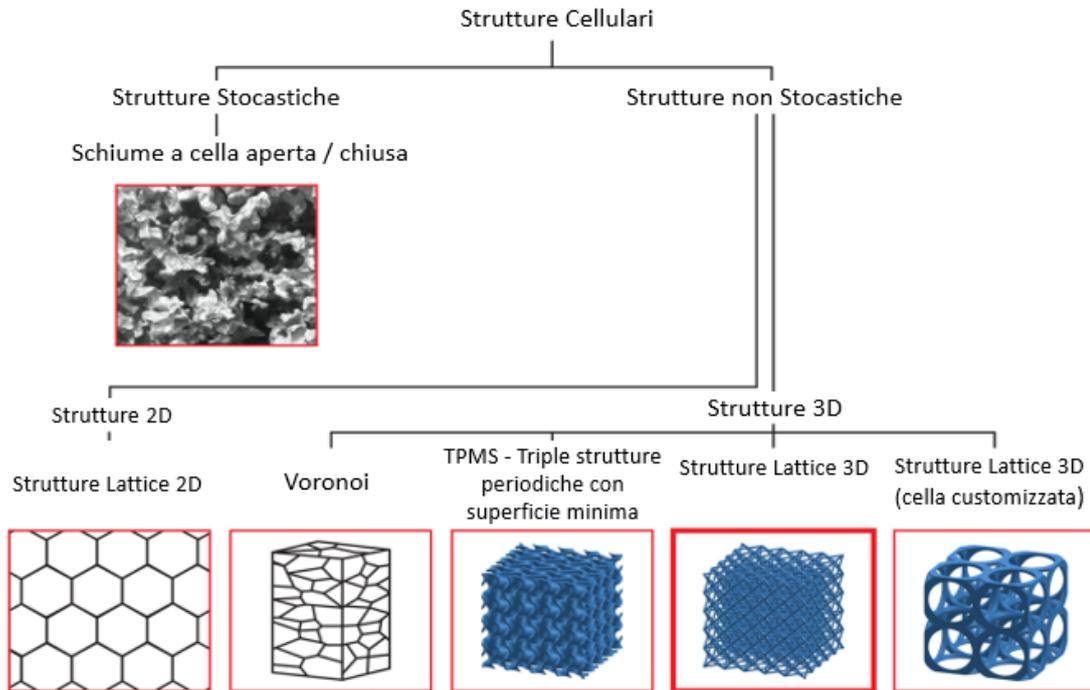


Figura 1.1 Classificazione Strutture Cellulari [1]

I materiali cellulari con una struttura non stocastica sono caratterizzati da un'organizzazione controllata delle celle nello spazio. Una prima suddivisione viene fatta tra strutture 2D e strutture 3D. Le prime basano le loro proprietà sulla resistenza delle pareti che suddividono una cella da quella adiacente, mentre le seconde si suddividono in ulteriori 4 sotto categorie: Voronoi, TPMS (Triply Periodic Minimal Surface), Strutture Lattice 3D e Strutture Lattice 3D customizzate.

Voronoi è una tipologia di struttura che potrebbe apparire come stocastica in quanto è costituita da moduli geometrici non uniformi. La loro disposizione è invece controllata da principi geometrici e matematici in modo da conferire alla struttura un comportamento meccanico rigido.

TPMS sono ottenute basandosi su strutture organiche, spesso ispirate dall'osservazione di organismi viventi. Questa tipologia di struttura non soffre di stress localizzati e viene utilizzata soprattutto per la creazione di strutture alleggerite, scambiatori di calore o controlli acustici.

Le Strutture Lattice 3D si dividono in due categorie: la prima è composta dalle strutture i cui elementi base sono travi e nodi di giunzione, mentre la seconda categoria è composta da strutture che derivano dalla manipolazione tramite operazioni booleane di figure geometriche semplici quali cubi o sfere. Per entrambe queste categorie le proprietà meccaniche possono variare molto in quanto sono legate alla geometria della cella [3].

1.2 Strutture Lattice 3D

Questo tipo di struttura risulta molto interessante in quanto è possibile andare a modificare, anche in modo puntuale, le proprietà della stessa, agendo sulla geometria del reticolo e sul processo di produzione dello stesso [5]. La suddivisione principale viene fatta in funzione del grado di connettività ed è tra struttura con comportamento prevalente a flessione e struttura con comportamento prevalente a trazione. La prima tipologia di strutture, caratterizzata da un basso grado di connettività, è più morbida ed è utilizzata principalmente per applicazioni in cui si richiede un elevato assorbimento energetico. La seconda tipologia invece presenta un elevato grado di connettività e caratteristiche meccaniche migliori, si presta quindi meglio ad applicazioni strutturali nelle quali si richiede che la struttura rimanga molto leggera.

Nella Figura 1.2 è possibile analizzare la differenza tra le due tipologie di struttura sottoposte a carico di compressione. Si nota che per entrambe la curva tensione - deformazione è suddivisa in 3 parti. Per quanto riguarda la struttura a trazione prevalente dopo un primo tratto elastico si ha lo snervamento, il quale è seguito da una diminuzione della resistenza la quale si stabilizza poi a formare un plateau. Nella struttura a flessione prevalente dopo allo snervamento, che avviene a un livello di tensione inferiore rispetto alla struttura a trazione prevalente, si ha un lungo tratto a tensione costante che è la caratteristica principale per la quale questa tipologia di struttura è utilizzata per l'assorbimento di energia. L'ultima fase delle

curve tensione - deformazione è la fase di densificazione ed è uguale per entrambe le tipologie. In questa fase la struttura è completamente collassata su sé stessa e non può più comprimersi, come conseguenza nel grafico si ha un aumento sostanziale di tensione in corrispondenza a una deformazione molto contenuta.

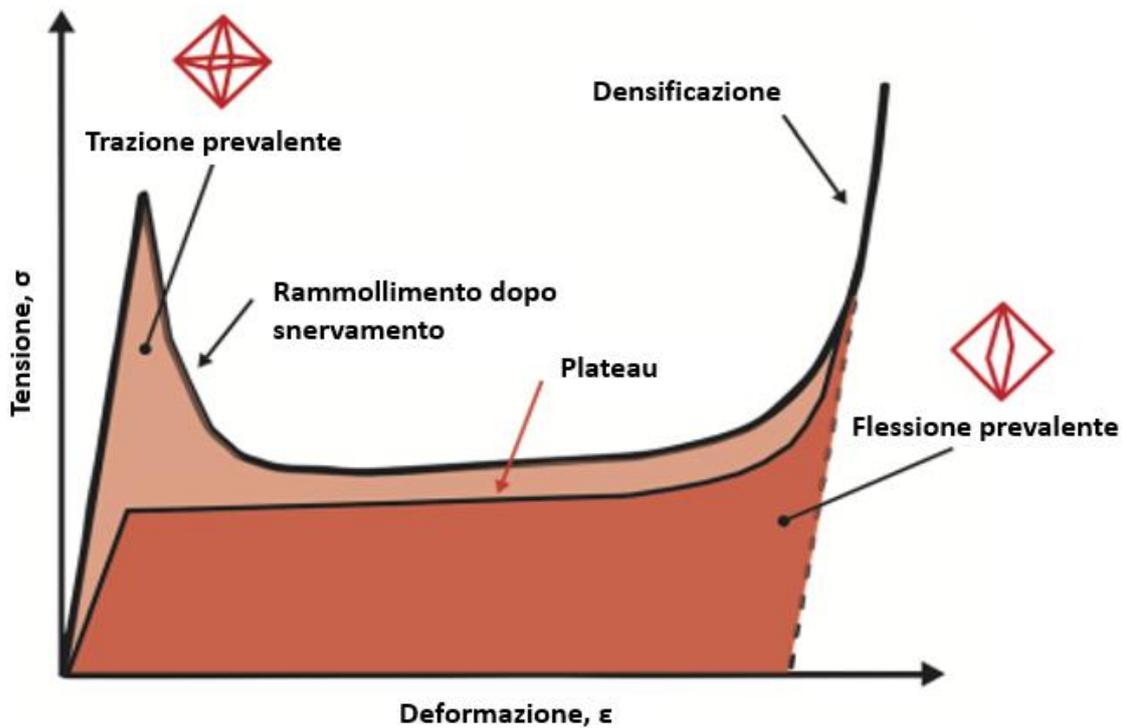


Figura 1.2 Confronto curve tensione-deformazione tra strutture a trazione prevalente e flessione prevalente [1]

1.2.1 Il criterio di Maxwell

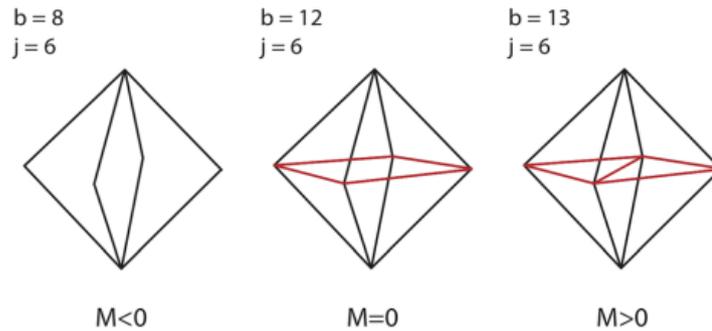


Figura 1.3 Criterio di Maxwell [1]

La connettività alta o bassa delle strutture non è un parametro sufficiente per caratterizzare il comportamento meccanico di una cella. A tal proposito Maxwell nel 1864 ha introdotto il criterio di Maxwell, una formulazione che permette di definire se le celle hanno un comportamento prevalente a flessione o a trazione e quindi di identificarne il comportamento meccanico. In letteratura sono presenti due formulazioni, una per le strutture 2D (1.1) e una per le strutture 3D (1.2), un esempio di quest'ultima è visibile in Figura 1.3.

$$M = b - 2j + 3 = 0 \quad (1.1)$$

$$M = b - 3j + 6 = 0 \quad (1.2)$$

In esse b è il numero di strutture che compongono la cella e j è il numero di nodi/vincoli che le connettono. Se $M < 0$, i nodi sono vincolati e la cella è sottoposta a carico allora la struttura ha un comportamento prevalentemente a flessione; se invece i nodi non sono vincolati e la cella è sottoposta a carico, la struttura si piega su sé stessa e non presenta alcuna rigidità o forza. Se $M = 0$ la cella ha un comportamento a trazione sia che i nodi siano vincolati che non, se invece $M > 0$ la cella è troppo vincolata e presenta stress interni anche se non sottoposta a carichi esterni.

1.3 Additive Manufacturing

I primi tentativi di dare vita a delle strutture lattice [3] sono stati fatti sfruttando tecnologie quali stampaggio a iniezione, prototipazione rapida, fusione a cera persa e elettro deposizione. Inizialmente si partiva da fili metallici, i quali venivano piegati su loro stessi fino a generare una struttura reticolare. Su queste strutture venivano poi saldate delle piastre metalliche in modo da creare delle superfici di riferimento dando così vita a delle strutture sandwich (Figura 1.4).

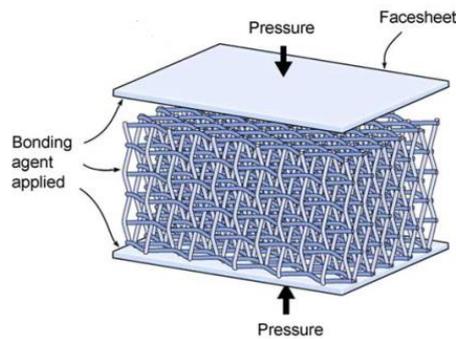


Figura 1.4 Struttura Sandwich [3]

Test su questi tipi di struttura hanno portato alla scoperta che aggiungendo delle piastre sulla superficie di una struttura lattice si ottiene un aumento delle proprietà meccaniche dovuto all'aumento dei vincoli imposti alla struttura reticolare.

Un ulteriore tentativo è stato fatto partendo da lamine metalliche, le quali venivano poi corrugate e disposte l'una vicino all'altra fino a formare una struttura a nido d'ape (Figura 1.5). Questa tipologia di struttura ha trovato impiego soprattutto per l'assorbimento di urti.

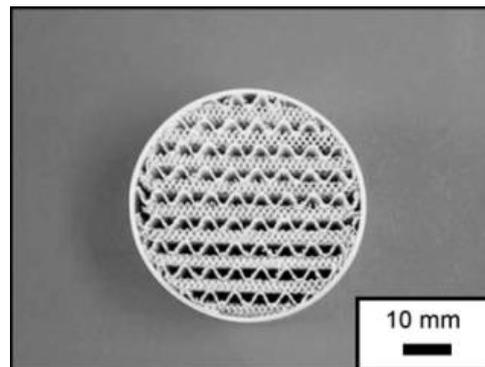


Figura 1.5 Struttura a nido d'ape [3]

Una tecnica più laboriosa ma che permise di raggiungere risultati migliori fu quella di partire da fogli metallici e forarli con fori esagonali. Successivamente la struttura che ne deriva veniva piegata su se stessa generando un reticolo a base tetraedrica (Figura 1.6).

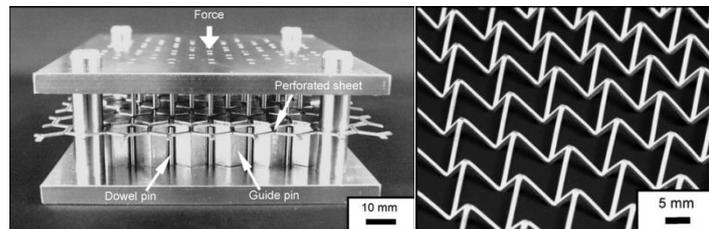


Figura 1.6 Struttura reticolare ottenuta da fogli forati e piegati [3]

Da qualche anno si è diffusa molto l'Additive Manufacturing la quale è una tecnologia innovativa che rende possibile la produzione, in poche ore e senza l'uso di utensili, di oggetti di geometria complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su un sistema CAD 3D [4]. Il primo brevetto per questo tipo di tecnologia è stato depositato per la Stereolitografia nel 1984. Da quella data ad oggi sono state fatte molte ricerche e tuttora l'Additive Manufacturing è considerata a tutti gli effetti una tecnologia produttiva, anche se il campo principale di applicazione è la prototipazione rapida.

Dal punto di vista produttivo la caratteristica principale è che gli oggetti non vengono creati dal pieno come con le tradizionali tecnologie sottrattive ad asportazione di truciolo, le quali tramite l'utilizzo di utensili rimuovono da un blocco di materiale le parti in eccesso per dare vita al componente finale. Con l'Additive manufacturing non sono necessari utensili e i pezzi crescono per addizione di materiale, la quale può avvenire con diverse metodologie e partendo da materiali molto diversi tra loro, sia per tipologia che per stato fisico.

1.3.1 Ciclo dell'Additive Manufacturing

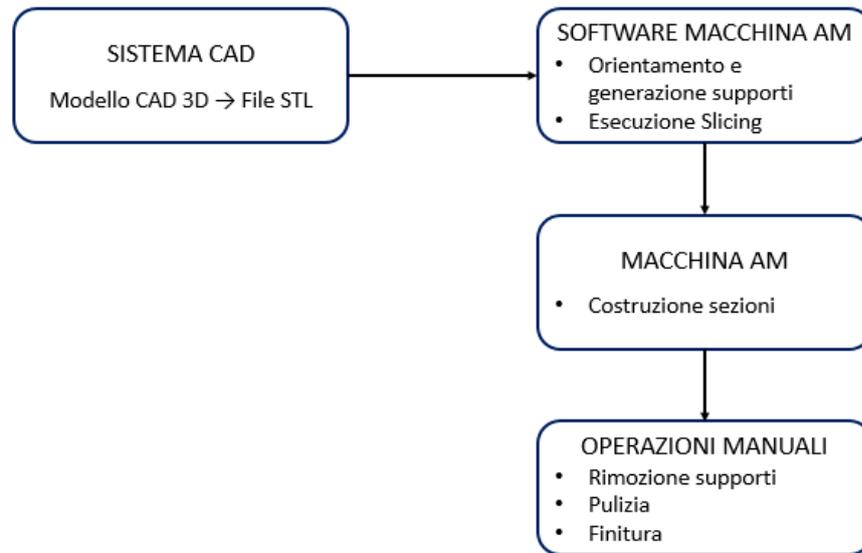


Figura 1.7 Ciclo dell' Additive Manufacturing

Il prerequisito per l'utilizzo di questa tecnologia è la disponibilità del modello matematico del componente che si intende realizzare. Una volta realizzato il modello CAD, tramite il software stesso di modellazione oppure tramite dei software appositi, si procede alla conversione dello stesso in formato .stl (standard triangulation language). Questo file è composto dalle superfici del nostro modello 3D approssimate con tanti triangoli la cui dimensione varia in funzione del livello di precisione che si intende ottenere. Maggiore è la risoluzione richiesta minore è la dimensione dei triangoli utilizzati. Si apre quindi il file .stl in un apposito software che consente di posizionare il componente nel piano di stampa. Il posizionamento deve essere fatto secondo una serie di principi volti alla buona riuscita della stampa del manufatto [8], alcuni dei quali sono: angoli di inclinazione del pezzo, orientamento rispetto al recoater, superfici estetiche da preservare, ecc... Vengono quindi generati i supporti i quali hanno la triplice funzione di ancorare il componente alla piattaforma, supportare le superfici sporgenti e dissipare il calore generatosi all'interno dei pezzi durante la stampa. La fase successiva prevede quindi lo slicing del pezzo comprensivo di supporti. In questa fase il nostro componente viene affettato da piani paralleli al piano della macchina e distanti tra loro di un layer. Vengono così ottenute le sezioni di costruzione, le quali sono i dati utilizzati dalla

macchina per generare il percorso laser durante la stampa. Si procede quindi alla stampa del componente, la quale avviene in modo diverso in funzione della tecnologia utilizzata. Rimangono infine da effettuare le operazioni di post-processo le quali prevedono in generale una pulizia dei pezzi, dei possibili trattamenti termici, la rimozione dei supporti, operazioni volte al miglioramento della finitura superficiale, verniciature ecc...

1.3.2 Tecniche di Additive Manufacturing

Come precedentemente accennato sono oggi presenti sul mercato molte tecniche di Additive Manufacturing [9] le quali si differenziano tra loro per lo stato dei materiali di partenza, la tipologia di materiali e i vari processi con cui l'oggetto finale viene realizzato. Una delle classificazioni principali è quella che vede queste tecnologie divise per stato dei materiali di partenza che, come visibile nella Figura 1.8, possono essere: polvere, liquido o solido.

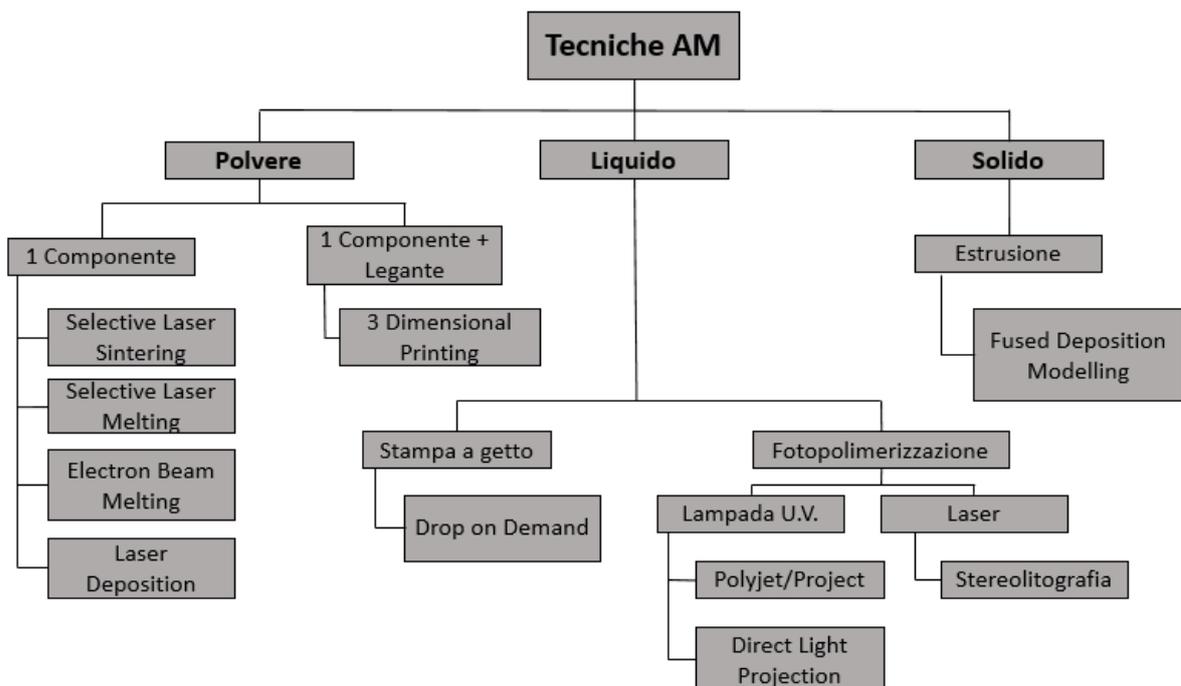


Figura 1.8 Tecniche di Additive Manufacturing [4]

L'unica tecnologia che parte da materiali allo stato solido è la **Fused Deposition Modelling** (FDM) (Figura 1.9). Questa tecnologia sfrutta il principio dell'estrusione: del materiale plastico viene fatto pervenire ad un ugello, il quale fonde e distribuisce il materiale sulla piattaforma di lavoro in modo da creare uno strato dell'oggetto che si intende realizzare.

Una volta completato il primo strato la piattaforma si abbassa di un layer e provvede alla deposizione del secondo strato. Questo procedimento viene ripetuto fino al completamento del manufatto. Per fare sì che il materiale plastico sia apportato sempre nelle stesse condizioni la temperatura dell'ugello è mantenuta costante per mezzo di radiatori. Anche la temperatura della piattaforma è mantenuta costante ma a una temperatura inferiore rispetto a quella dell'estrusore in quanto il suo scopo è consentire la corretta solidificazione del filamento al contatto con essa e provvedere alla stabilità del componente durante tutta l'operazione di stampa. Per consentire la continuità della stampa il materiale plastico è apportato sotto forma di filamenti ed è stoccato in bobine a bordo macchina. Solitamente sono presenti almeno due estrusori con i rispettivi materiali, uno utilizzato per la costruzione del componente e l'altro per la costruzione dei supporti. I particolari prodotti con questa tecnologia non richiedono complesse operazioni di post trattamento a parte la rimozione dei supporti, che in alcuni casi può essere fatta per solubilizzazione degli stessi in acqua o altro liquido, e un eventuale trattamento manuale laddove si intenda migliorare la finitura superficiale. La precisione di queste macchine dipende in modo significativo dalle dimensioni dell'ugello e dal sistema di posizionamento dello stesso.

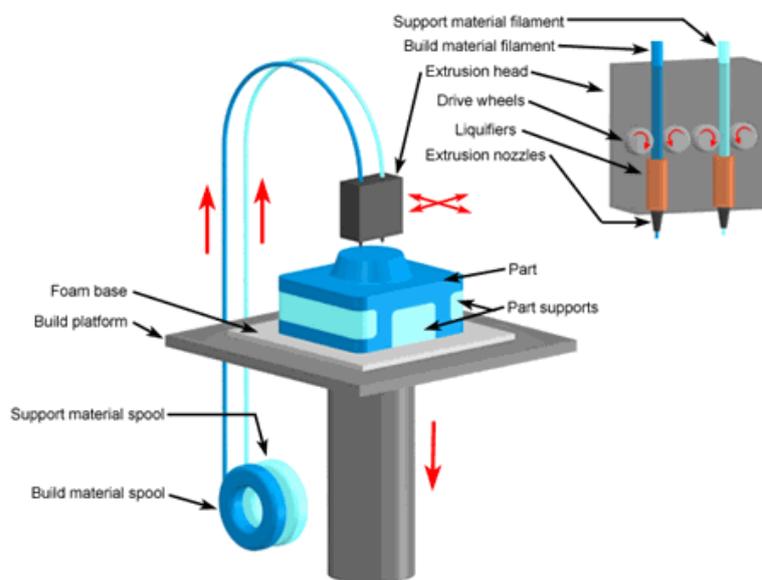


Figura 1.9 Fused Deposition Modelling [5]

La **Stereolitografia** (SLA) basa il suo funzionamento sul principio della fotopolimerizzazione. All'interno di una vasca piena di resina liquida è presente una piattaforma che si posiziona alla distanza di un layer dal pelo libero della resina, la quale viene fatta solidificare per mezzo di un laser a luce ultravioletta (Figura 1.10). Una volta completato il primo strato la piattaforma si abbassa e il processo si ripete fino al completamento dell'oggetto. Alla fine della fase di stampa si ottiene un componente che viene definito "green", il quale ha la forma del componente finale ma non le sue caratteristiche meccaniche. Si procede quindi alla rimozione dei supporti e al lavaggio dei componenti in modo da rimuovere la resina in eccesso e infine si effettua un post trattamento in un forno a UV per completare la polimerizzazione e ottenere le caratteristiche meccaniche. La stereolitografia è la tecnologia per materie plastiche con la precisione più elevata 0.025 mm.

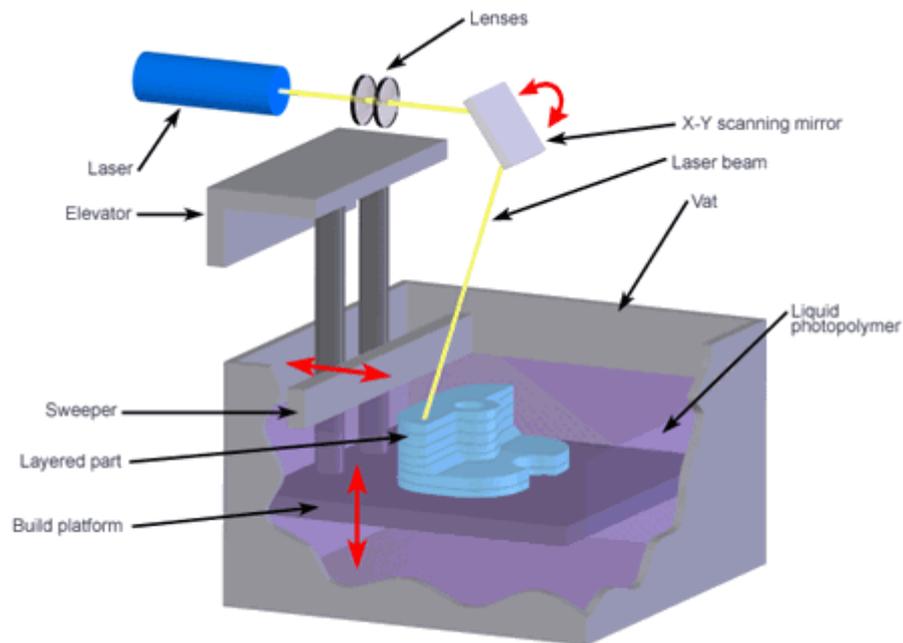


Figura 1.10 Stereolitografia [6]

Polyjet/Project sono due nomi diversi per indicare la stessa tecnologia. Il fotopolimero è depositato tramite una testina di stampa multiugello la quale deposita piccole gocce di materiale che vengono solidificate istantaneamente tramite una lampada UV installata su di essa. Questa tecnologia permette di utilizzare contemporaneamente più materiali differenti, i

quali possono essere anche miscelati tra loro per ottenere caratteristiche meccaniche intermedie. I supporti, in materiale diverso dal pezzo, sono idrosolubili e non richiedono quindi trattamenti successivi per essere rimossi. È possibile ottenere una deposizione vettoriale grazie alla capacità della testina di muoversi simultaneamente sugli assi x e y, garantendo così un'accuratezza delle parti elevata. Uno dei limiti principali di questa tecnologia è la lentezza del processo.

Direct Light Projection (DLP) è una tecnologia che sfrutta lo stesso principio della Stereolitografia, la fotopolimerizzazione. A differenza della Stereolitografia in questo caso abbiamo un proiettore di luce UV sotto alla piattaforma che solidifica istantaneamente tutta la sezione del nostro componente. La piattaforma quindi si alza di un layer e il processo si ripete fino al completamento dell'oggetto (Figura 1.11). Alla fine del processo avremo il pezzo appeso alla piattaforma per mezzo dei supporti i quali dovranno essere rimossi meccanicamente. Si hanno precisioni superiori alla Stereolitografia con tempistiche di realizzazione inferiori. Il limite sono le dimensioni di stampa che risultano ridotte a causa della perdita di efficacia della luce su profili di dimensioni elevate.

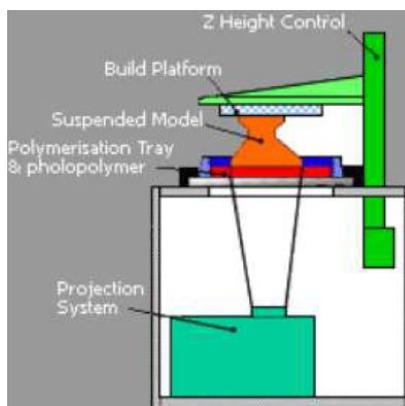


Figura 1.11 Direct Light Projection [7]

3 Dimensional Printing (3DP) basa il suo processo sulla deposizione, tramite una testina di stampa, di un legante su un letto di materiale. Inizialmente veniva utilizzata cellulosa rapidamente sostituita dal gesso. Lo sviluppo ha portato all'utilizzo delle testine di stampa di HP con la possibilità di ottenere componenti colorati. Una volta realizzato il componente è

necessario un post trattamento di infiltrazione in modo da consolidare la parte e conferirle le caratteristiche meccaniche.

Selective Laser Sintering (SLS) basa il suo principio di funzionamento sulla sinterizzazione di polimeri tramite un laser (Figura 1.12). All'interno della macchina è presente una piattaforma sulla quale, tramite un rullo per il livellamento, viene steso un sottile strato di polimero sotto forma di polvere. Il laser provvede quindi alla sinterizzazione di una sezione dell'oggetto, completata la quale si ha l'abbassamento della piattaforma e la deposizione di un nuovo strato di materiale. Questo processo si ripete fino al completamento del nostro componente. Con questa tecnologia non sono necessari supporti in quanto la polvere provvede a sostenere i pezzi durante la stampa. La temperatura della camera di lavoro viene mantenuta ad un valore prossimo a quella di fusione del materiale, in modo che il laser debba fornire solo più l'energia necessaria per la sinterizzazione. Completata la stampa è necessario aspettare che il build, composto dai pezzi immersi nella polvere non sinterizzata, si raffreddi per poi estrarre i pezzi, pulirli dalla polvere e effettuare eventuali trattamenti volti al miglioramento della resa estetica degli stessi.

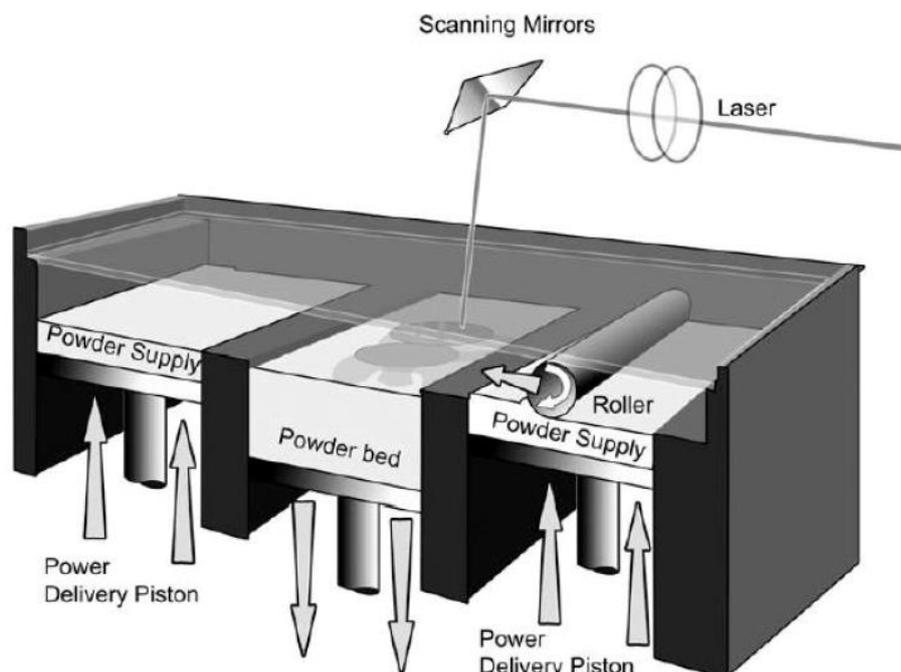


Figura 1.12 Selective Laser Sintering [8]

Selective Laser Melting (SLM) sfrutta un processo del tutto simile al Selective Laser Sintering. La differenza principale risiede nel fatto che non viene utilizzata la sinterizzazione per la solidificazione dei granuli di polvere ma il materiale viene completamente fuso in modo selettivo. Per ottenere tale risultato è necessario utilizzare laser ad alta energia ed un'atmosfera inerte per prevenire l'ossidazione dei metalli. Con questa tecnica si possono fare strati molto fini e quindi ottenere precisioni maggiori, raggiungendo un livello di densità del 99.8%. Completata la stampa del componente è necessario effettuare un trattamento di distensione per rimuovere le tensioni interne generatisi durante il processo e successivamente è possibile rimuovere il pezzo dalla piattaforma tramite l'eliminazione meccanica dei supporti.

Electron Beam Melting (EBM) è una tecnica molto simile al Selective Laser Sintering in quanto una sorgente di energia, composta da un fascio di elettroni opportunamente concentrato e accelerato, colpisce il materiale in forma granulare provocandone la fusione completa. Per una corretta focalizzazione del fascio sul piano di lavoro è necessario creare il vuoto nella camera, il che previene anche la formazione di ossidi metallici nelle polveri e consente di lavorare con materiali molto reattivi con l'ossigeno. La camera di lavoro viene mantenuta a una temperatura di circa 800 – 900 °C e ciò consente di avere una buona stabilità della forma e un livello di tensioni residue all'interno dei pezzi inferiore rispetto al SLM. Il processo EBM ha una velocità di scansione superiore rispetto al SLM ma ha tolleranze e rugosità superficiali maggiori.

Laser Deposition è una tecnologia che sfrutta un laser per fondere la polvere metallica durante la deposizione puntuale per mezzo di ugelli. Il punto di fusione è protetto da un gas inerte per evitare ossidazioni. Come conseguenza di queste caratteristiche la macchina non necessita di una camera di lavoro e non ci sono limiti alle dimensioni dei pezzi realizzabili. Nasce però l'esigenza di un sofisticato controllo di processo in grado di ottimizzare la potenza e il fuoco del laser, l'afflusso di polvere e l'apporto di gas protettivo per garantire la qualità

metallurgica dello strato deposito. I componenti realizzati con questa tecnologia necessitano di una finitura alle macchine utensili.

2 Scelta del reticolo

In questo capitolo a seguito di un'analisi delle varie tipologie di reticolo presenti in letteratura verrà effettuata una scelta in funzione dei nostri obiettivi e delle nostre esigenze. Successivamente a partire dalla scelta effettuata verranno fatte delle modifiche per migliorarne le proprietà meccaniche.

2.1 Analisi bibliografica

Sono stati effettuati diversi studi sulle strutture lattice, in primis sono state studiate quelle tipologie di struttura presenti anche nella metallografia come la cubica a corpo centrato e a facce centrate alle quali sono state apportate successivamente delle modifiche. Rehme e Emmelmann [9] hanno studiato il processo di Selective Laser Melting e hanno fatto molte prove su tipologie di reticoli diverse tra loro in modo da analizzarne le differenze. I reticoli da loro studiati sono visibili in Figura 2.1.

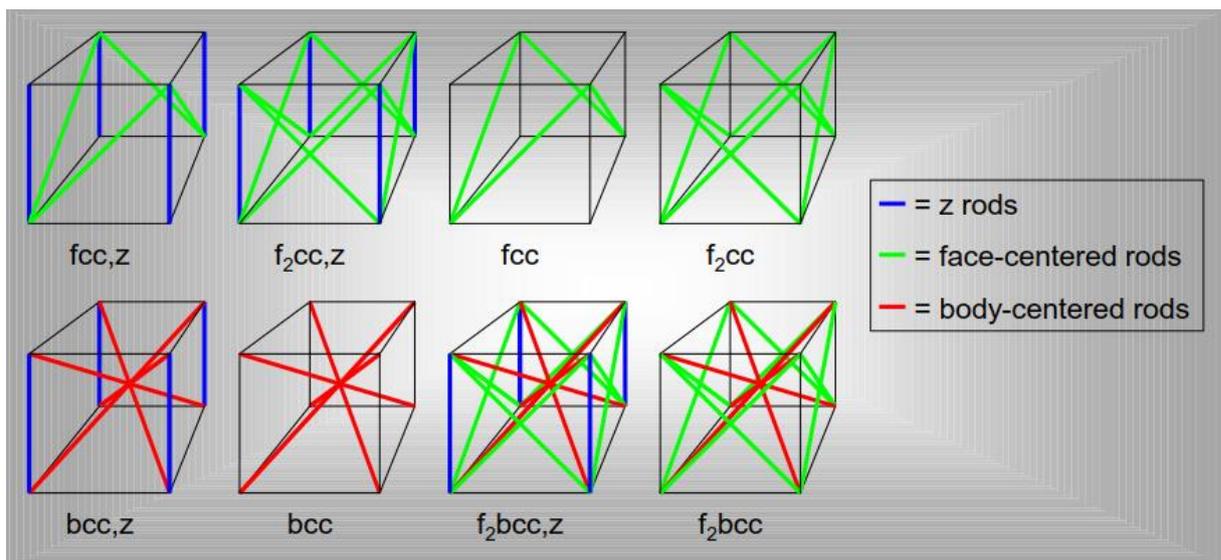


Figura 2.1 Strutture studiate da Rehme e Emmelmann [9]

Partendo dalle strutture a base cubica a corpo centrato (bcc) e cubica a facce centrate (fcc) sono state fatte delle prove inserendo dapprima delle aste verticali e successivamente si è provato ad unire le strutture bcc, fcc e le aste verticali.

SCELTA DEL RETICOLO

Nella Tabella 2.1 sono visibili i risultati delle prove da loro effettuate su provini aventi 10 celle da 2.5 mm l'una in ogni direzione. Nella Tabella 2.2 sono visibili i valori di tensione di snervamento rapportati alla densità del provino.

Tabella 2.1 Risultati prove Rehme e Emmelmann

	ρ_{rel} [%]	Tensione di snervamento σ_y [MPa]			Grafico qualitativo tensione-deformazione
		x	y	z	
fcc,z	8.2	2.34	2.23	5.78	
f₂cc,z	12.9	6.10	6.05	10.6	
fcc	5.6	0.904	0.945	0.826	
f₂cc	10.6	4.06	3.98	4.80	
bcc,z	19.0	5.08	4.94	7.41	
bcc	17.1	4.47	3.65	3.73	
F₂bcc,z	27.3	13.7	11.5	12.3	
F₂bcc	25.2	13.8	11.2	10.3	

Tabella 2.2 Risultati prove Rehme e Emmelmann rapportati alla densità

	fcc,z	f₂cc,z	fcc	f₂cc	bcc,z	bcc	F₂bcc,z	F₂bcc
σ_y / ρ_{rel} [MPa]	42.1	58.8	15.9	40.4	30.6	23.1	45.8	46.7
σ_y [Mpa/kg]	285.1	401.1	105.8	276.1	206.8	163.2	308.6	313.0

Facendo un confronto si osserva come a parità di densità relativa la struttura bcc abbia delle proprietà meccaniche superiori alla fcc, inserendo le aste verticali è invece la fcc ad avere le proprietà superiori. Emerge inoltre che i reticoli misti presentano la tensione di snervamento superiore. Dai grafici ottenuti si osserva che le strutture a base bcc hanno una curva tensione - deformazione che si presta meglio all'assorbimento di energia rispetto a quella ottenuta con base fcc, in quanto dopo allo snervamento è presente un lungo tratto a tensione lievemente crescente fino ad arrivare alla densificazione.

Altri studi sono stati effettuati da Mazur et Al. [10] i quali hanno studiato diverse tipologie di reticoli realizzati in Ti-6Al-4V tramite SLM: in Figura 2.2 partendo da sinistra è possibile osservare struttura cubica a corpo centrato (bcc), struttura cubica a facce centrate con aste verticali (fccz), struttura cubica a corpo e facce centrate con aste verticali (fbccz) e infine struttura cubica a corpo e facce centrate con aste verticali e orizzontali (fbccxyz).

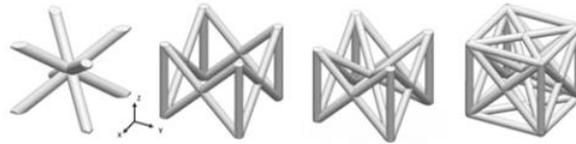


Figura 2.2 Reticoli studiati da Mazur et Al. [10]

Confrontando le varie strutture reticolari è emerso che la bcc presenta il modulo elastico inferiore, indicativo della tendenza per questo tipo di struttura a flettere e della bassa densità relativa posseduta rispetto alle altre tipologie analizzate. Presenta inoltre una bassa resistenza alla compressione e una bassa rigidezza, le quali unite al comportamento prevalente a flessione di questa struttura confermano che è adatta per subire grosse deformazioni prima di rompersi. Comportamento opposto si ha invece con la struttura fbccxyz la quale presenta un comportamento prevalente a trazione e modulo elastico e resistenza a compressione maggiori tra tutte le tipologie analizzate. Delle considerazioni valide per qualsiasi tipologia di reticolo sono che aumentando la densità relativa aumentano il modulo elastico e la resistenza a compressione. Aumentando le dimensioni delle celle si ha un aumento della cedevolezza della struttura e quindi una riduzione della resistenza a compressione, la quale invece aumenta se le celle sono piccole e molto vincolate. Inserire delle strutture verticali all'interno delle celle comporta un aumento della rigidezza e un aumento della resistenza a compressione. Se ne deduce quindi che le celle con le strutture verticali più vincolate siano in grado di assorbire una quantità maggiore di energia.

Uno dei primi tentativi effettuati per migliorare la capacità di assorbire energia di queste tipologie di struttura è stato fatto creando le Triply Periodic Minimal Surface Structures (TPMS) [11] (Figura 2.3).

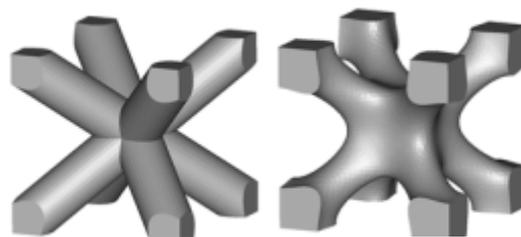


Figura 2.3 Confronto tra struttura bcc (a sinistra) e bcc TPMS (a destra) [11]

Queste strutture sono state ottenute a partire dalle strutture bcc in acciaio 316L le quali risultano, come già accennato precedentemente, particolarmente adatte per l'assorbimento di energia e l'assorbimento di impatti grazie al lungo tratto piano e al loro regime di basso indurimento prima della densificazione. Il problema principale è che tendono a fratturare vicino ai nodi a causa di una troppo elevata concentrazione degli stress. Per ovviare a questo problema si è deciso di creare le TPMS nelle quali il materiale viene allocato secondo una formulazione matematica che sposta una parte del volume verso i nodi alleggerendo le aste di collegamento. Analizzando questo tipo di struttura è emerso che le caratteristiche meccaniche delle TPMS migliorano molto rispetto alle strutture bcc normali quando si hanno frazioni volumiche del 30%, per frazioni volumiche inferiori si ha un miglioramento minimo o addirittura una diminuzione delle proprietà meccaniche quando si è intorno al 10% (Figura 2.4).

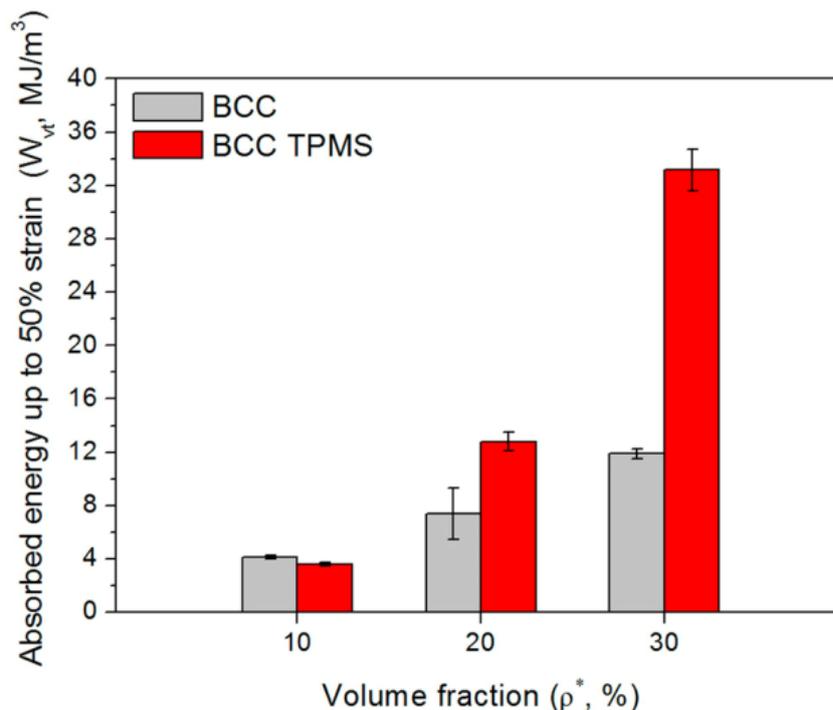


Figura 2.4 Confronto proprietà bcc e bcc TPMS [11]

Successivamente si è cercato di unire le proprietà delle strutture TPMS a quelle delle strutture sheet-based lattice [12] in modo da ottenere strutture che avessero le caratteristiche meccaniche delle TPMS e i benefici di avere dei fogli di materiale sulle superfici. Le strutture

analizzate sono visibili in Figura 2.5. Queste strutture risultano avere un'elevata area superficiale rispetto al volume, caratteristica che le rende ottime per applicazioni di scambio di calore, trasferimenti di massa e isolamenti acustici, oltre che eliminare gli stress concentrati presenti a causa degli spigoli nelle strutture lattice tradizionali.

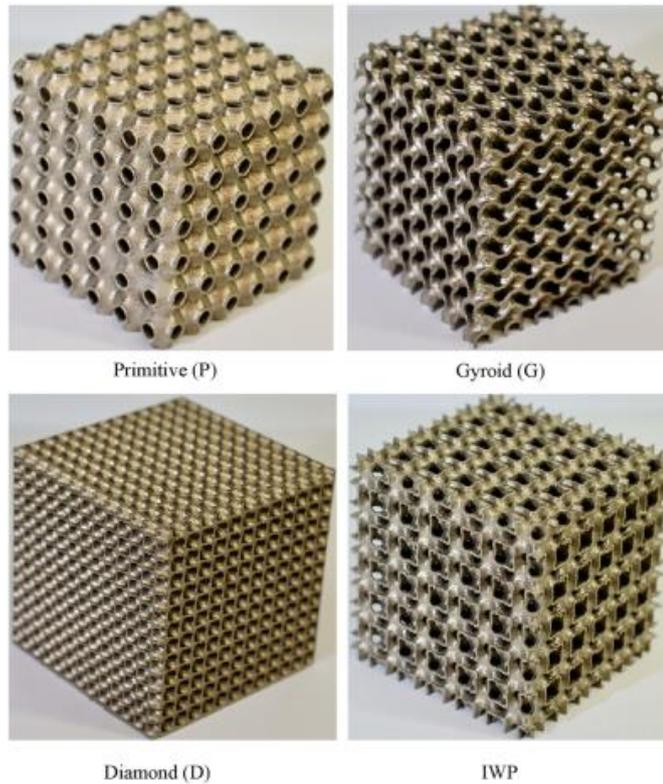


Figura 2.5 Strutture sheet based + TPMS [12]

Analizzando le varie tipologie di reticolo presentate si è effettuata una scelta sui tipi di struttura da utilizzare per questa tesi. Per effettuare questa scelta sono stati presi in considerazione i nostri obiettivi principali: riuscire a creare delle strutture lattice infiltrate e ottenere le migliori proprietà possibili per quanto riguarda assorbimento di energia meccanica e di urti. In funzione di ciò sono state escluse subito le strutture sheet based + TPMS in quanto presentando superfici molto complesse rendono molto difficile il processo di infiltrazione. Strutture reticolari più complesse quali $F_{2bcc,z}$ o $fbccxyz$ sono state escluse in quanto l'aggiunta di tutte quelle aste non comporta, a parità di densità relativa, particolari benefici per l'aumento del carico lungo l'asse z ma conferisce proprietà migliorate lungo gli altri assi, cosa che al momento a noi non interessa valutare. Inoltre queste strutture risultano molto più

complicate da infiltrare a causa della perdita di carico derivante dal maggior numero di aste. Sono inoltre state escluse le strutture TPMS in quanto per le densità relative che si intende utilizzare (al massimo 10%) presentano caratteristiche meccaniche inferiori rispetto alle strutture base da cui partono. Si è quindi scelto di procedere utilizzando delle tipologie di reticolo base che risultano ottime per l'assorbimento energetico: la struttura bcc e la struttura bcc-z. Si è scelto di effettuare i test su entrambe queste tipologie di struttura in quanto la prima presenta un comportamento prevalente a flessione mentre la seconda un comportamento prevalente a trazione. In questo modo è possibile andare ad osservare in che modo l'infiltrazione agisca su entrambe le tipologie di struttura.

Prove di assorbimento dell'energia con queste strutture sono già state effettuate da Turner et al. [13] che ha messo a confronto i reticoli bcc e bccav (una struttura bcc alla quale sono state aggiunte delle strutture verticali al centro delle celle) visibili in Figura 2.6.

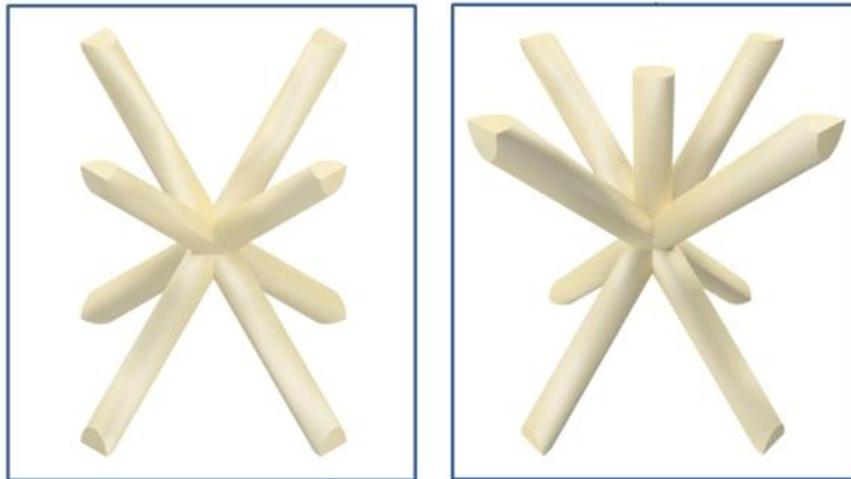


Figura 2.6 Struttura bcc a sinistra e bccav a destra [13]

Dagli studi effettuati risulta che a parità di diametro delle aste le strutture bccav possono sopportare un carico maggiore con una deformazione minore rispetto alla bcc e questo comporta un'area sottesa alla curva bccav più ampia e quindi una quantità maggiore di energia assorbita. Le aste verticali offrono alla struttura la capacità di resistere a carichi maggiori e questo aumento di rigidità consente di far sì che in seguito ad un impatto la velocità si riduca più velocemente e la profondità di penetrazione sia inferiore rispetto alla

struttura bcc. La rigidezza delle strutture bccav qui studiate è sicuramente superiore a quella delle strutture bcc ma se rapportata alla densità relativa la bcc ha la capacità di assorbire una quantità di energia specifica maggiore della bccav.

Ulteriori analisi su questi tipi di strutture sono stati effettuati da Smith et al. [14] e Mckown et al. [15] i quali hanno studiato il comportamento delle strutture bcc e bcc-z (Figura 2.7) sia sotto carico quasi statico che sotto test di impatto.

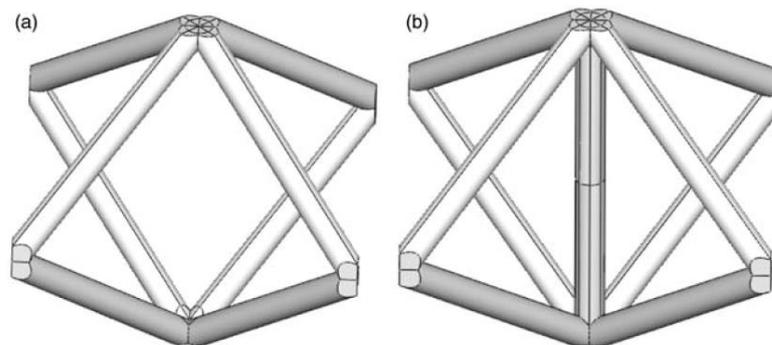


Figura 2.7 Celle elementari bcc e bcc-z [14]

Dagli studi in campo quasi statico è emerso che le strutture bcc-z presentano un modulo elastico e una tensione di snervamento maggiori delle bcc grazie alla presenza delle travi verticali. Le strutture bcc collassano in modo stabile e non ci sono zone di frattura localizzata, nelle strutture bcc-z si ha invece un collasso localizzato per carico di punta delle strutture verticali con formazione di bande di scorrimento a 45° che continua fino alla fase di densificazione. L'energia assorbita in funzione della densità relativa dalle strutture bcc-z è circa il 150% delle strutture bcc.

Analizzando i risultati ottenuti dai test di impatto si è riscontrato per le due tipologie di struttura un comportamento simile a quello emerso nei test quasi statici: bcc presenta una deformazione uniforme lungo il provino mentre bcc-z ha un cedimento per carico di punta delle strutture verticali con la formazione di bande di scorrimento a 45° . Si è inoltre osservato che un aumento della tensione di snervamento in campo quasi statico comporta un aumento dell'energia di impatto assorbita, si può quindi pensare di utilizzare i test in campo quasi statico per caratterizzare anche la resistenza all'impatto.

Una caratteristica interessante è che aumentando la velocità di deformazione si genera un aumento della tensione di snervamento, per tenere conto del quale si utilizza l'equazione di Cowper-Symonds:

$$\frac{\sigma_y^d}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (2.1)$$

Dove σ_y^d e σ_y stanno rispettivamente per le tensioni di snervamento dinamiche e quasi statiche mentre $\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione. D e q sono assunti simili a quelli dell'acciaio 316L solido e sono rispettivamente 1704.5 s^{-1} e 5.2. Dai test effettuati risulta che la tensione di snervamento durante i test di impatto è superiore del 65-100% rispetto a quella delle prove quasi statiche.

2.2 Progettazione del reticolo mediante modellazione numerica

Come suggerito da Ushima et al. [16] e da Smith et al. [17] le proprietà meccaniche a compressione delle lattice structures sono legate in modo significativo alle loro proprietà geometriche. Emerge quindi la possibilità di aumentare molto l'assorbimento energetico aumentando il diametro delle aste e in particolare aumentando la densità relativa della struttura. Durante la progettazione è necessario prestare molta attenzione ai nodi in quanto utilizzando elementi trave è presente una mancanza di contatto nei nodi la quale è causa di cedimenti. Per ovviare a ciò si suggerisce di aumentare il diametro delle aste in prossimità dei nodi in modo da favorire il contatto tra le aste. Durante i loro studi viene evidenziato che la durezza iniziale, la tensione di snervamento e l'energia assorbita possono essere aumentate in modo drastico cambiando l'angolazione della struttura e in particolare facendo la cella più alta e stretta nella direzione del carico. Si suggerisce infine l'utilizzo di almeno 5 celle al fine di non risentire in modo importante degli effetti di bordo, se possibile sarebbe però auspicabile l'utilizzo di un numero di celle maggiore in quanto incrementa considerevolmente la ripetibilità dei test.

Si è deciso di partire dalle strutture precedentemente analizzate in letteratura e apportare delle modifiche in modo da migliorare la resistenza delle stesse. Vengono di seguito analizzate le singole celle, estrapolate quindi dal loro contesto, in modo da osservare il miglioramento di proprietà dovuto alle modifiche strutturali. Verranno effettuate in seguito ulteriori analisi con l'obiettivo di simulare la resistenza all'espansione della cella dovuta alla presenza della gomma infiltrata e delle altre celle circostanti.

Per tutte le analisi FEM è stata utilizzata una struttura con le proprietà geometriche presentate in Tabella 4.1, è stata imposta una deformazione del 5% lungo l'asse z e come materiale è stato impostato un acciaio 316L il quale presenta le caratteristiche elencate in Tabella 2.3. In particolare è stato applicato un supporto fisso a un'estremità della cella e a quella opposta è stato imposto uno spostamento corrispondente a una deformazione del 5%.

Tabella 2.3 Proprietà acciaio AISI 316L

Modulo elastico	180000 MPa
Coefficiente di Poisson	0.3
Densità	8 g/cm ³
Carico di snervamento	530 MPa

2.2.1 Struttura a diamante

La prima struttura analizzata è la struttura bcc classica la quale presenta 4 aste inclinate di 45° collegate tra loro alle estremità. Per verificare che le modifiche da noi apportate portassero benefici si è deciso di fare un'analisi FEM della struttura originale e di tutte le modifiche effettuate mettendo in evidenza l'energia assorbita dalla struttura in seguito a una deformazione del 5%.

Nella Figura 2.8 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura bcc.

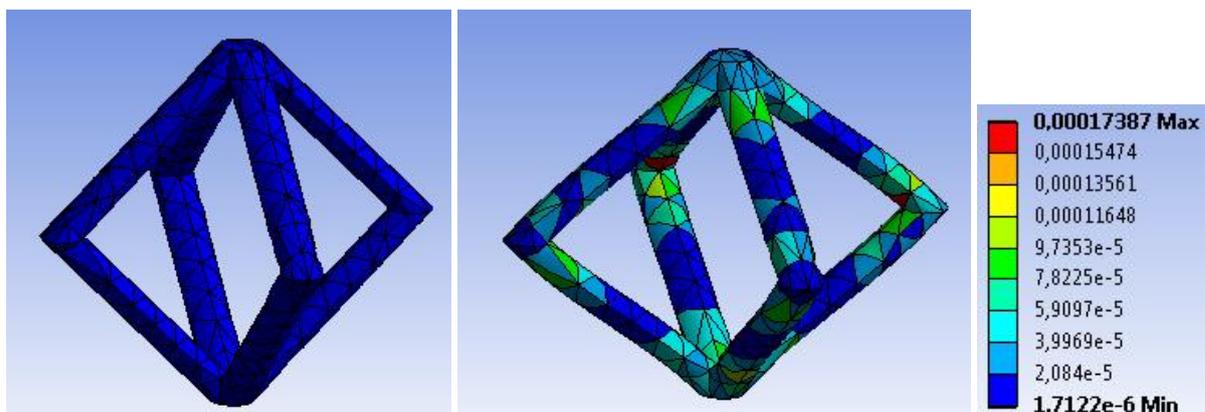


Figura 2.8 bcc – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 0.02 J.

La prima modifica che si è deciso di fare è stata cambiare l'angolo della struttura in modo da aumentare la resistenza della stessa per i carichi verticali, rendendola così direzionale. A tal proposito l'angolo è stato modificato fino a raggiungere un rapporto tra la larghezza e l'altezza della cella pari a 0.5. Nella Figura 2.9 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura bcc con la variazione degli angoli.

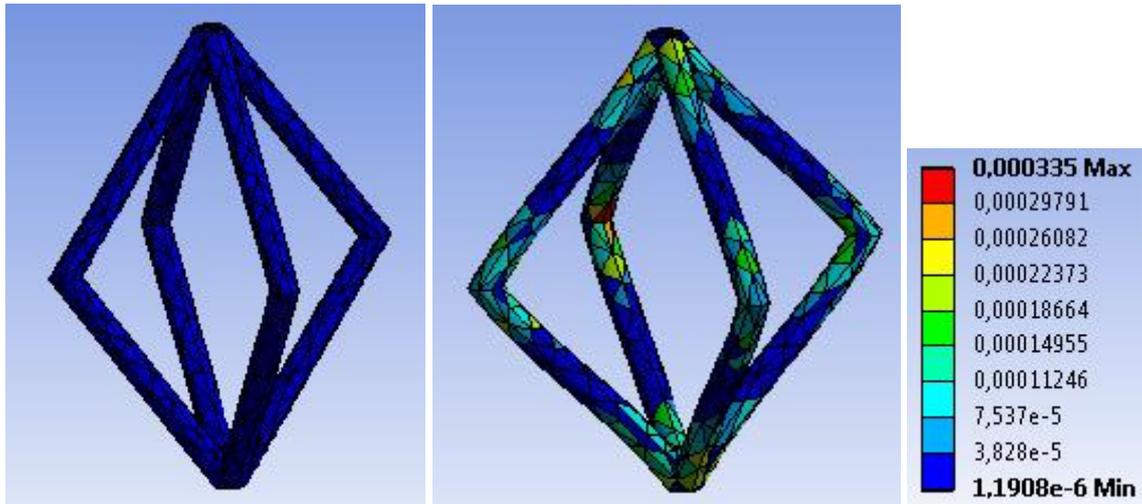


Figura 2.9 bcc direzionale – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 0.058 J. Si nota che solo con la variazione dell'angolo di lavoro, a parità di deformazione, si ha un aumento di quasi 3 volte dell'energia assorbita.

Avendo ottenuto conferma dalle simulazioni FEM che le zone più sollecitate sono i nodi si è deciso di inserire delle sfere in corrispondenza degli stessi in modo da rinforzare l'area più sollecitata e già di per sé più soggetta a difetti durante la stampa. Abbiamo dato a questa struttura il nome di struttura a diamante.

Nella Figura 2.10 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura a diamante.

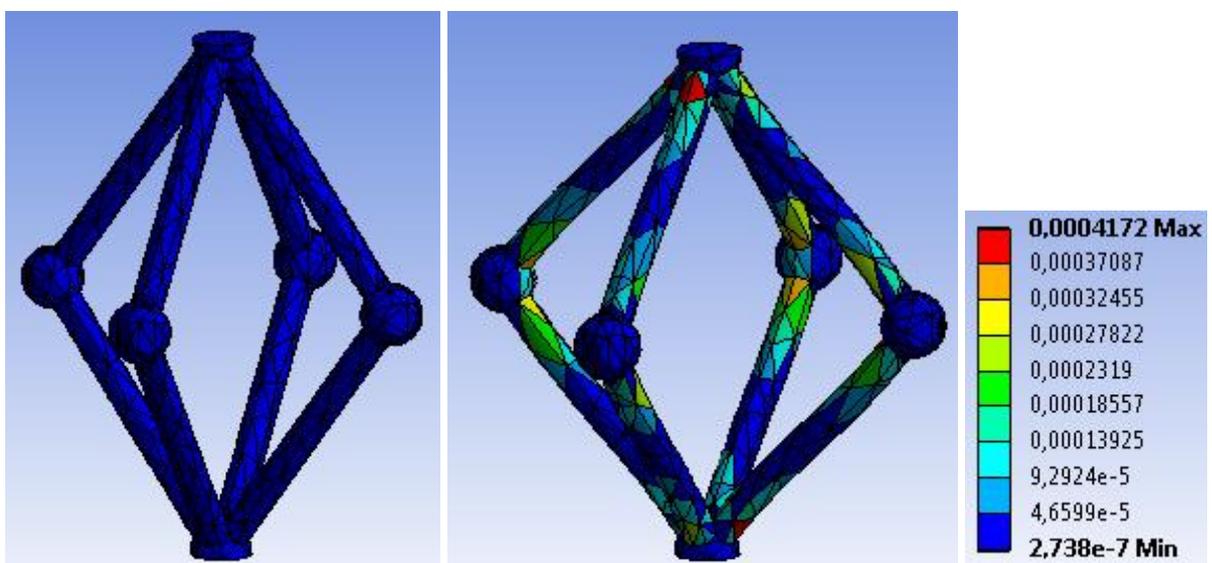


Figura 2.10 Diamante – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 0.068 J. Dalle analisi FEM è emerso che tramite l'aggiunta delle sfere ai nodi si ha un aumento dell'energia assorbita del 17%.

In conclusione si osserva che tramite le modifiche apportate si è ottenuto un aumento dell'energia di deformazione assorbita del 240%.

Si è a questo punto analizzata la singola cella con l'inserimento della gomma all'interno in modo da osservare la variazione di energia ottenuta. Le proprietà della gomma inserita sono riportate in Tabella 2.4 .

Tabella 2.4 Proprietà gomma

Durezza	30 ShoreA
Resistenza a trazione	6 MPa
Coefficiente di Poisson	0.4
Modulo elastico	3.7 MPa
Densità	1.056 g/cm ³
Allungamento a rottura	690%

Nella Figura 2.11 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura a diamante circondata da gomma. Nella prima immagine è visibile la struttura nella sua interezza mentre nella seconda si mette in evidenza solo il reticolo.

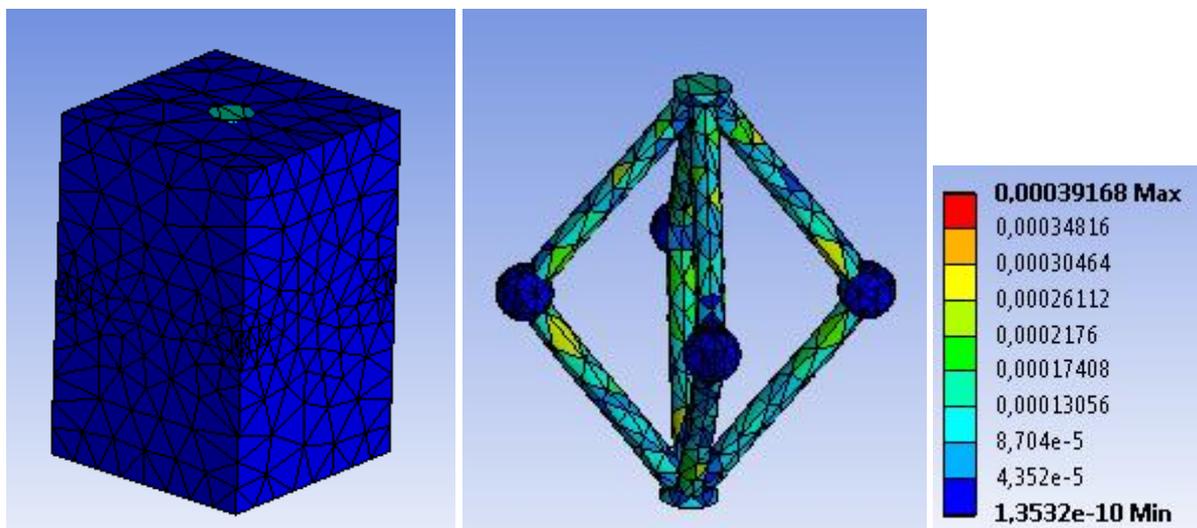


Figura 2.11 Struttura a diamante con gomma – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 0.0743 J con un aumento rispetto alla stessa tipologia di reticolo senza gomma del 9.3%. Un'ulteriore prova è stata effettuata impedendo alla cella di dilatarsi nel piano e consentendogli quindi solo di comprimersi nella direzione del carico. Tale risultato è stato ottenuto posizionando dei carrelli nei nodi esterni della cella orientati in modo che il solo spostamento ammissibile fosse lungo l'asse della cella stessa. Questa prova è stata fatta per simulare l'impedimento all'espansione laterale dovuto alla presenza della gomma e delle celle adiacenti. Si tratta di un'approssimazione ottimistica in quanto nella realtà la dilatazione della cella è ostacolata ma non è completamente impedita. L'energia di deformazione così assorbita è pari a 1.52 J che corrisponde a un incremento del 1945.7% rispetto alla stessa cella libera di dilatarsi.

2.2.2 Struttura a Diamante e Colonne

Mantenendo le modifiche apportate alla struttura di base a diamante si sono analizzate le strutture bcc-z e bcc,z presentate in letteratura, le quali dispongono rispettivamente di una struttura verticale nel nodo centrale della cella e una struttura verticale per nodo esterno della stessa. Nella Figura 2.12 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura bcc-z.

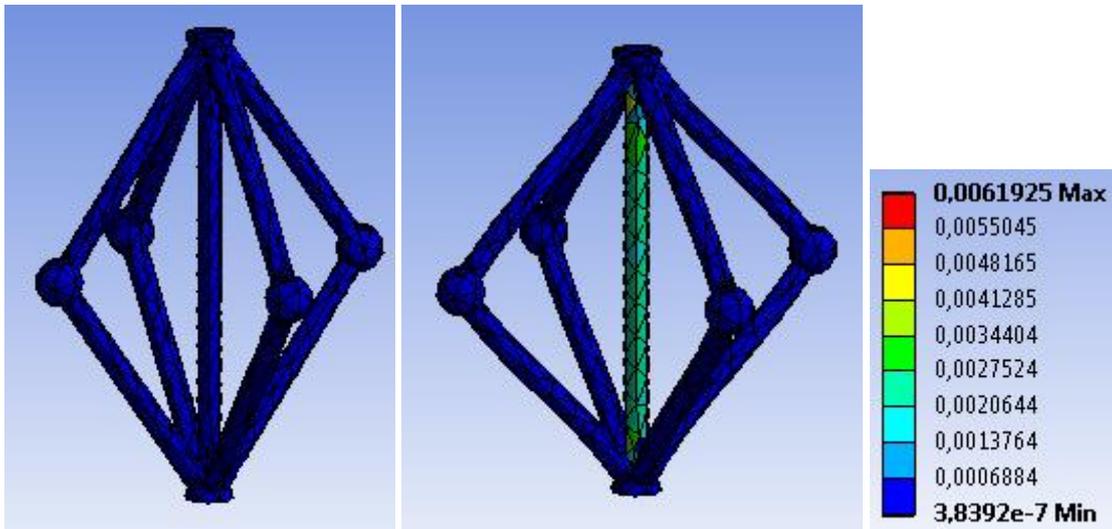


Figura 2.12 bcc-z – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 0.53 J.

Nella Figura 2.13 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura bcc,z.

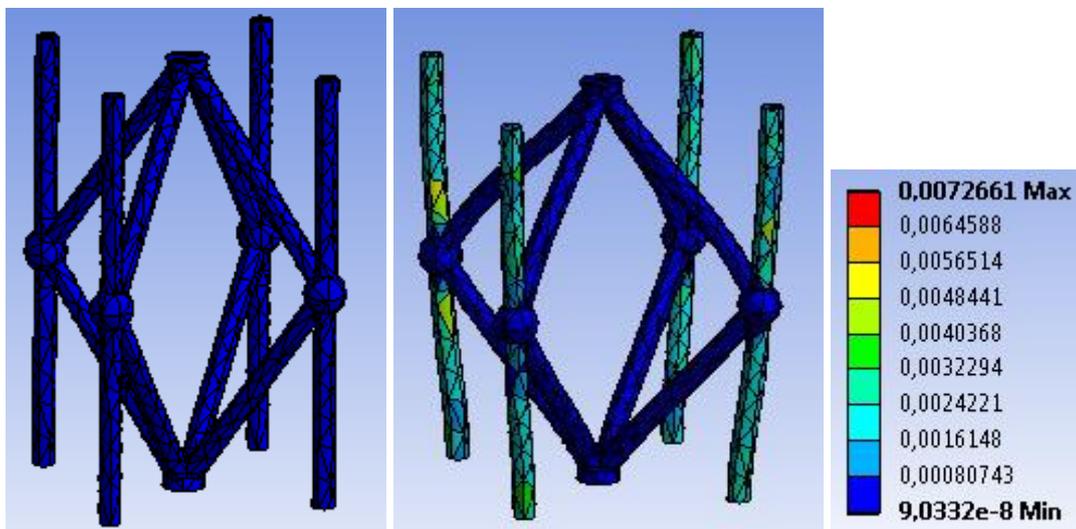


Figura 2.13 bcc,z – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 1.94 J.

L'inserimento delle aste verticali nei nodi esterni comporta un aumento di massa di 0.03g che fa passare la struttura da 0.12g a 0.15g ma con un notevole aumento di energia assorbita.

Per estremizzare al massimo l'irrigidimento dovuto alla presenza delle aste verticali si è deciso di utilizzare una struttura denominata a Diamante e Colonne. Questo tipo di struttura prevede come base la struttura a diamante e l'inserimento di un'asta verticale in ogni nodo. Nella Figura 2.14 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura a diamante e colonne.

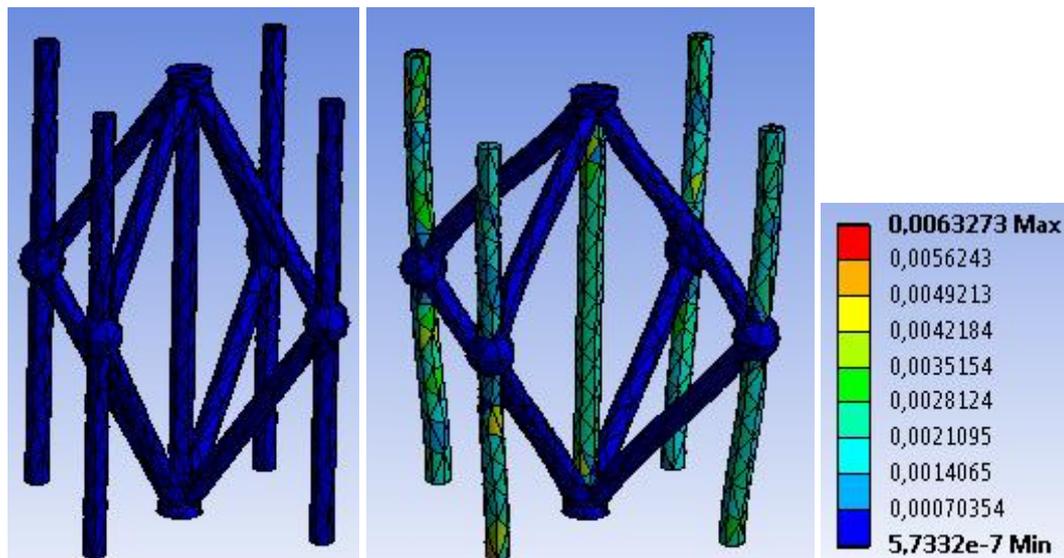


Figura 2.14 Diamante e Colonne – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 2.4 J.

Rispetto alla struttura bcc,z si ha un' aumento dell'energia assorbita del 23.7% e un aumento di peso di 0.02g.

Si è a questo punto analizzata la singola cella con l'inserimento della gomma all'interno in modo da osservare la variazione di energia ottenuta. Le proprietà della gomma inserita sono riportate in Tabella 2.4 .

Nella Figura 2.15 sono visibili i risultati dell'analisi FEM sulla struttura a diamante e colonne circondata da gomma. Nella prima immagine è visibile la struttura nella sua interezza mentre nella seconda si mette in evidenza solo il reticolo.

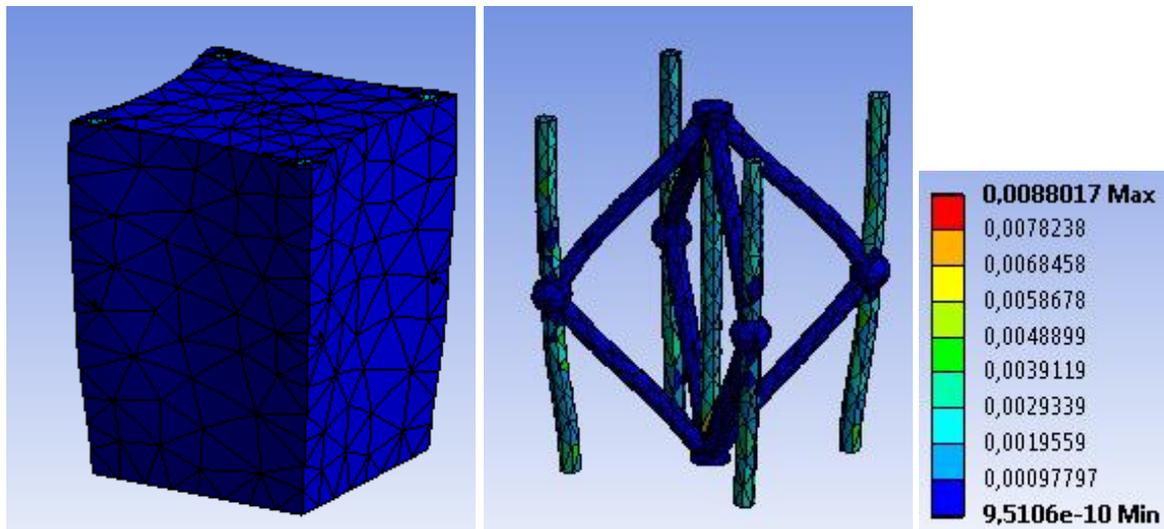


Figura 2.15 Struttura a diamante e colonne con gomma – Energia assorbita

L'energia di deformazione totale assorbita da questa struttura per una deformazione del 5% è pari a 2.44 J con un aumento rispetto alla stessa tipologia di reticolo senza gomma del 1.7%. Un'ulteriore prova è stata effettuata impedendo alla cella di dilatarsi nel piano e consentendogli quindi solo di comprimersi nella direzione del carico. Tale risultato è stato ottenuto posizionando dei carrelli nei nodi esterni della cella orientati in modo che il solo spostamento ammissibile fosse lungo l'asse della cella stessa. Questa prova è stata fatta per simulare l'impedimento all'espansione laterale dovuto alla presenza della gomma e delle celle adiacenti. Si tratta di un'approssimazione ottimistica in quanto nella realtà la dilatazione della cella è resa più difficoltosa a causa delle celle adiacenti ma non è completamente impedita. L'energia di deformazione così assorbita è pari a 3.36 J che corrisponde a un incremento del 37.7% rispetto alla stessa cella libera di dilatarsi.

2.2.3 Osservazioni

Nella Tabella 2.5 sono riassunti i dati ottenuti tramite le simulazioni FEM effettuate sulle singole celle estrapolate dal loro contesto.

Tabella 2.5 Riassunto dati FEM

Provino	Energia assorbita [J]
Bcc	0.020
Bcc direzionale	0.058
Diamante	0.068
Diamante con gomma	0.0743
Diamante con gomma vincolato	1.52
Bcc-z	0.53
Bcc,z	1.94
Diamante e colonne	2.4
Diamante e colonne con gomma	2.44
Diamante e colonne con gomma vincolato	3.36

Si osserva come le modifiche apportate alle celle le rendano più resistenti e quindi capaci di assorbire una quantità maggiore di energia durante la deformazione. Analizzando invece i dati relativi alle celle in cui è stata inserita la gomma si osserva come l'aumento di energia assorbita sia significativo nella cella a diamante mentre poco influente in quella a diamante e colonne. La bassa influenza della gomma è dovuta anche alle piccole deformazioni prese in considerazione in questa analisi, durante le prove sperimentali ci si aspetta un'influenza maggiore della gomma in quanto crescente all'aumentare della deformazione. Dalle prove ideali effettuate per simulare l'impedimento all'espansione provocato dalla gomma e dalle celle adiacenti emerge che entrambe le strutture ne traggono beneficio, cosa che è però particolarmente evidente nella struttura a diamante. Ci si aspetta pertanto che l'infiltrazione comporti un irrigidimento generale dei reticoli con particolare influenza della gomma per grandi deformazioni.

Al fine di dimostrare che l'aumento di proprietà meccaniche e in particolare di energia assorbita ottenuto tramite l'infiltrazione non è dovuto semplicemente alla somma delle

proprietà meccaniche dei due materiali ma all'effetto restrittivo che la gomma ha sul reticolo sono state effettuate delle simulazioni sulla struttura a diamante alla quale sono stati imposti dei vincoli elastici ai nodi laterali. Variando la resistenza di questi vincoli (S1 e S2) è stato simulato l'impedimento all'espansione della cella provocato dall'infiltrazione di gomme di durezza crescente e nella Figura 2.16 è visibile l'aumento di proprietà che ne deriva.

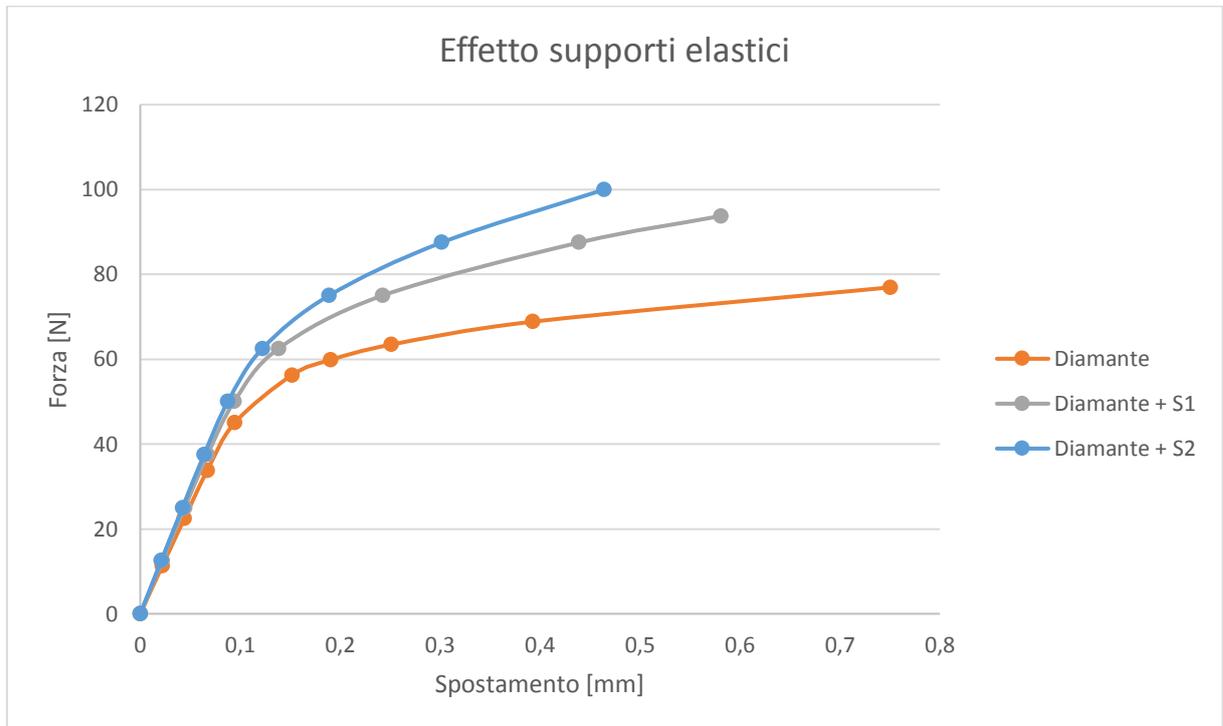


Figura 2.16 Simulazione impedimento all'espansione tramite supporti elastici

Si osserva come l'impedimento all'espansione della cella aumenti leggermente il modulo elastico equivalente nella prima parte della curva e ne trasli la seconda parte più in alto aumentando di molto l'energia assorbita.

3 Attrezzature e materiali

In questo capitolo verranno illustrate le macchine e i materiali utilizzati per realizzare le strutture di prova mediante microfusione di polvere e successiva infiltrazione con resina polimerica. A seguire si descriveranno le attrezzature di laboratorio utilizzate nelle prove sperimentali

3.1 Attrezzature

Le attrezzature utilizzate sono:

- Macchina SLM
- Macchina per elettroerosione a filo
- Macchina SLA
- Macchina per il lavaggio
- Forno UV
- Macchina per sabbiatura
- Macchina per l'infiltrazione
- Forno
- Macchina di prova servoidraulica

3.1.1 *Macchina SLM: EOS M270*

La macchina utilizzata per la stampa dei reticoli metallici è una EOS M270 (Figura 3.1) che sfrutta il principio di Selective Laser Melting per l'ottenimento dei manufatti. Le caratteristiche principali di questa macchina sono riportate nella Tabella 3.1. Il software di controllo della macchina permette di modificare una serie di parametri in modo da poter ottimizzare la qualità dei componenti prodotti. In funzione del materiale da noi selezionato, acciaio 316L, sono stati impostati i valori presenti nella Tabella 3.2.

Tabella 3.1 Dati tecnici EOS M270

Volume di stampa effettivo	250 mm x 250 mm x 215 mm
Velocità di costruzione	2 - 20 mm ³ /s
Spessore dei Layer	20 - 100 μm
Tipo di laser	Yb - laser, 200 W
Precisione dell'ottica	F - Theta - lens, scanner ad alta velocità
Velocità di scansione	Fino a 7.0 m/s
Diametro di messa a fuoco del laser	100 - 500 μm
Potenza	5.5 kW
Generatore di azoto	Standard
Fornitura di aria compressa	7000 hPa; 20 m ³ /h



Figura 3.1 EOS M270

Tabella 3.2 Parametri di Stampa

Potenza del laser	195 W nominali
Diametro di messa a fuoco del laser	0.1 mm
Distanza tra le passate	0.12 mm
Spessore dei Layer	40 μm
Velocità di scansione riempimento	750 mm/s a 195 W
Velocità di scansione contorno	700mm/s e 60W
Contenuto di ossigeno	<1.5% (solitamente 0.8%)

3.1.2 Macchina per elettroerosione a filo: Charmilles Robofil 330F

La macchina a elettroerosione utilizzata per separare i provini dalla piattaforma di stampa rimuovendo nel contempo i supporti è una Charmilles Robofil 330F visibile in Figura

3.2. Le caratteristiche tecniche principali sono riportate in Tabella 3.3.



Figura 3.2 Charmilles Robofil 330F

Tabella 3.3 Dati tecnici Robofill 330F

Corsa X, Y, Z programmabile	400 mm x 300 mm x 400 mm
Velocità massima di lavorazione	300 mm/min
Velocità di movimento assi	Da 0 mm/min a 900 mm/min
Dispositivo di misura lineare	Righe ottiche
Velocità di svolgimento filo	Da 0.5 m/min a 15 m/min
Dimensioni massime pezzo	900 mm x 600 mm x 400 mm
Peso massimo pezzo	1000 kg

3.1.3 Macchina SLA: ProX 800

La macchina utilizzata per costruire il master in Stereolitografia è una ProX 800 della 3D Systems visibile in Figura 3.3. Le caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 3.4.



Figura 3.3 ProX 800

Tabella 3.4 Dati tecnici ProX 800

Volume di costruzione	650 mm x 750 mm x 550 mm
Peso massimo delle parti	75 kg
Risoluzione massima	4000 DPI
Accuratezza	0.025 mm - 0.05 mm per parti fino a 25.4 mm
Requisiti elettrici	200-240 V AC; 50-60 Hz, 30 A
Temperatura di lavoro	20 - 26 °C
Strategia di scansione	Fine per superfici esterne, ampia per l'interno

3.1.4 Macchina per il lavaggio: Ultrakleen

Ultrakleen è un'attrezzatura ad ultrasuoni la quale genera delle onde di pressione che agitano il liquido di lavaggio ad alta velocità causando delle micro-esplosioni, note come cavitazioni. Queste esplosioni creano un'azione di lavaggio contro le superfici solide a contatto con il liquido, rimuovendo rapidamente residui e agenti contaminanti. Nel nostro caso questa macchina viene utilizzata per rimuovere i residui di resina dai componenti realizzati in Stereolitografia. In funzione della resina da rimuovere si utilizzano due tipologie differenti di liquidi di lavaggio: la prima comprende una base acqua con aggiunta di solventi sgrassanti mentre la seconda una miscela di alcoli tra cui isopropano e etanolo.

3.1.5 Forno UV: ProCure 750

La ProCure 750 della 3DSystems è una camera a UV che fornisce lo step finale del post processo per i pezzi ottenuti tramite Stereolitografia. Una volta che i pezzi sono stati lavati, sono stati rimossi i supporti e sono stati asciugati possono essere messi all'interno della camera UV. All'interno di questa macchina sono esposti a raggi UV per un determinato periodo di tempo in modo da ottenere l'indurimento finale. L'interno della macchina è equipaggiato con lampade UV, pareti riflettenti e un piano girevole, in modo da assicurare un'esposizione uniforme su tutte le superfici e un indurimento completo delle parti.

Tabella 3.5 Dati tecnici ProCure 750

Dimensione massima pezzi	63 cm x 105 cm x 105 cm
Velocità di rotazione	1 RPM
Sorgente UV	3 lampade fluorescenti con lunghezza d'onda tra 300 nm e 460 nm
	19 lampade fluorescenti con lunghezza d'onda tra 380 nm e 480 nm

3.1.6 *Macchina per sabbiatura: Silco*

La sabbiatrice a pressione Silco è una macchina realizzata per il trattamento e la finitura delle superfici. L'impianto è particolarmente idoneo alla pulizia di matrici, alla rifinitura e pulizia di acciai inossidabili, particolari ossidati, particolari trattati termicamente, eliminazione di bave derivate da lavorazioni meccaniche, preparazione superficiale di gomma e poliuretano fino alla sabbiatura di particolari in vetro, ceramica, plastica, policarbonato. La cabina di lavoro è mantenuta in depressione da un aspiratore che assolve anche il compito di depolverazione della cabina. La separazione delle particelle esauste e delle polveri in sospensione avviene tramite un particolare camino dimensionato in funzione delle caratteristiche dell'aspiratore. La proiezione della graniglia avviene mediante una lancia di sabbiatura ad alta efficienza che sfrutta la potenza di un serbatoio a pressione posto alla base della tramoggia di raccolta. Possono essere usati tutti i tipi di graniglia, sia sferica che angolare, nel nostro caso è stato usato ossido di alluminio di dimensione 80 - 100 grid.

3.1.7 *Macchina per l'infiltrazione*

Macchina prodotta da Fi Automazione per la colata sotto vuoto. Con questa macchina si possono creare parti in alta qualità con una grande varietà di resine poliuretatiche. Gli stampi possono avere dimensioni massime di 520 mm x 445 mm x 425 mm, i parametri macchina sono controllati da un PLC e il livello di vuoto raggiunto dalla macchina può essere variato in funzione della resina utilizzata. Il materiale viene caricato allo stato liquido all'interno di una coppa nel miscelatore dove viene miscelato sotto vuoto per renderlo omogeneo. Successivamente la macchina provvede alla colata sotto vuoto del materiale all'interno dello stampo. Completata la colata è necessario inserire i pezzi in un forno per ultimare la catalisi della resina.

3.1.8 Forno industriale

Si tratta di un semplice forno industriale il quale viene utilizzato per scaldare gli stampi prima del processo di colata e per fare completare la catalisi alle resine dopo tale processo. La temperatura viene mantenuta costante a 70 °C.

3.1.9 Macchina di prova servoidraulica: Instron 8801

La Instron 8801 (Figura 3.4) è una macchina di prova capace di eseguire test statici, dinamici, di fatica ad alto o basso numero di cicli e di meccanica della frattura. Dispone di una capacità di carico di 100 kN. Tramite il software Console si ha il controllo completo del sistema da PC per effettuare la taratura e la configurazione della macchina. Sono inoltre presenti una cella di carico in grado di compensare carichi inerziali e un'ampia gamma di morse, dispositivi e accessori.



Figura 3.4 Instron 8801

3.2 Materiali

I materiali utilizzati sono:

- Resina per SLA
- Polvere per SLM
- Silicone per la creazione dello stampo
- Resina poliuretanica semirigida
- Elastomero poliuretano

3.2.1 Resina per SLA: Accura Xtreme Gray

Il materiale utilizzato per la produzione dei pezzi in Stereolitografia è l'Accura Xtreme Gray. Il materiale si presenta liquido allo stato grezzo e dopo che si è conferita al pezzo la forma voluta tramite la stampa è necessario un trattamento di invecchiamento in forno a UV per conferire le caratteristiche meccaniche elencate nella Tabella 3.6.

Tabella 3.6 Proprietà Accura Xtreme Gray

Resistenza a trazione	38 - 44 MPa
Modulo elastico	1790 - 1980 MPa
Allungamento a rottura	14 - 22 %
Resistenza a flessione	57 - 71 MPa
Modulo a flessione	1520 - 2070 MPa
Resistenza all'impatto	35 - 52 J/m
Temperatura di deflessione	62 °C
Temperatura di transizione vetrosa	70 - 74 °C

3.2.2 Polvere per SLM: LaserForm 316L

Il materiale utilizzato per il processo di stampa dei reticoli in SLM è il LaserForm 316L. Si tratta di un acciaio inossidabile a basso contenuto di carbonio ($C < 0.030\%$) che consente di ottenere pezzi privi di cricche e con una densità prossima al 100%. Le proprietà del materiale sono riportate in Tabella 3.7.

Tabella 3.7 Proprietà LaserForm 316L

Proprietà	Dopo Distensione	Dopo Rinvenimento
Modulo elastico		
Nel piano x - y	180 ± 15 GPa	180 ± 15 GPa
Carico di rottura		
Nel piano x - y	660 ± 20 MPa	610 ± 30 MPa
Lungo l'asse z	570 ± 30 MPa	540 ± 30 MPa
Tensione di snervamento Rp0.2%		
Nel piano x - y	530 ± 20 MPa	370 ± 30 MPa
Lungo l'asse z	440 ± 20 MPa	320 ± 20 MPa
Allungamento a rottura		
Nel piano x - y	39 ± 5 %	51 ± 5 %
Lungo l'asse z	49 ± 5 %	66 ± 5 %
Riduzione di area		
Nel piano x - y	65 ± 5 %	61 ± 5 %
Lungo l'asse z	65 ± 5 %	62 ± 5 %
Durezza Rockwell B	90 ± 6 HRB	83 ± 4 HRB
Resistenza all'impatto	215 ± 15 J/cm ²	220 ± 15 J/cm ²
Temperatura di fusione	1370-1400 °C	1370-1400 °C
Densità	8 g/cm ³	8 g/cm ³

3.2.3 Silicone per la creazione dello stampo: Axson ESSIL 291

Si tratta di un silicone ottenuto per poliaddizione combinando insieme una resina e un 10% di catalizzatore. Presenta buona trasparenza, ottima resistenza chimica a contatto con poliuretani, facilità di mescolamento, vulcanizzazione per poliaddizione. Se lasciato indurire a temperatura ambiente presenta ritiri ridotti mentre se si velocizza l'indurimento inserendolo

in un forno a 70 °C si hanno ritiri maggiori. Le proprietà meccaniche di questo silicone sono presentate in Tabella 3.8.

Tabella 3.8 Proprietà silicone Axson ESSIL 291

Durezza	38 ShoreA
Resistenza a trazione	5 MPa
Allungamento a rottura	350 %
Resistenza alla lacerazione	24 kN/m
Coefficiente di dilatazione lineare	$3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Ritiro lineare	<0.1%
Ritiro lineare dopo trattamento a 70 °C	<0.7%

3.2.4 Resina poliuretanic semirigida: Renishaw 8045

La resina semirigida utilizzata per le prime prove è la Renishaw 8045. Si tratta di una resina poliuretanic tricomponente con caratteristiche meccaniche molto simili al Polipropilene. Le proprietà di questa resina sono riportate nella Tabella 3.9. Una volta completata l'infiltrazione è necessaria una permanenza in un forno a 70°C per 1 ora per completare la polimerizzazione.

Tabella 3.9 Proprietà resina Renishaw 8045

Resistenza a trazione	24 MPa
Modulo elastico	700 MPa
Allungamento a rottura	60 %
Resistenza a flessione	22 MPa
Modulo a flessione	580 MPa
Resistenza all'impatto	16 kJ/m ²
Temperatura di deflessione	53 °C
Durezza	70 ShoreD

3.2.5 Elastomero poliuretano: Axson UPX8400-1

La resina utilizzata per infiltrare i provini con la gomma è la Axson UPX8400-1. Si tratta di una resina tricomponente composta da poliolo, isocianato ed extender. In funzione del rapporto con cui questi vengono miscelati è possibile ottenere durezze ShoreA che vanno da 25 a 95. Nella Tabella 3.10 sono elencate le proprietà della gomma ottenuta con questa resina per diversi livelli di durezza ShoreA. Si fa notare che la temperatura massima di utilizzo è 70°C. Una volta completata l'infiltrazione questa resina necessita di una permanenza in forno a 70°C per 2.5 ore in modo da completare la polimerizzazione.

Tabella 3.10 Proprietà Axson UPX8400-1

Durezza	Allungamento	Resistenza a trazione
95 ShoreA	660 %	19.6 MPa
65 ShoreA	680 %	15 MPa
40 ShoreA	590 %	7 MPa
30 ShoreA	690 %	6 MPa

4 Definizione del processo di infiltrazione

In questo capitolo verrà presentato il processo utilizzato per l'infiltrazione dei provini. Tale processo parte con la realizzazione delle lattice structure metalliche con la tecnologia Selective laser sintering e la successiva infiltrazione tramite vacuum casting, tecnica per la quale è necessario realizzare prima un master in Stereolitografia.

4.1 Creazione della lattice structure metallica

La prima fase consiste nel creare il modello del reticolo che si vuole poi successivamente infiltrare. A tal proposito sono stati realizzati con il software 3DXpert due provini, uno con la struttura a diamante (D) e uno a diamante e colonne (D+C) visibili in Figura 4.1 e le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 4.1.

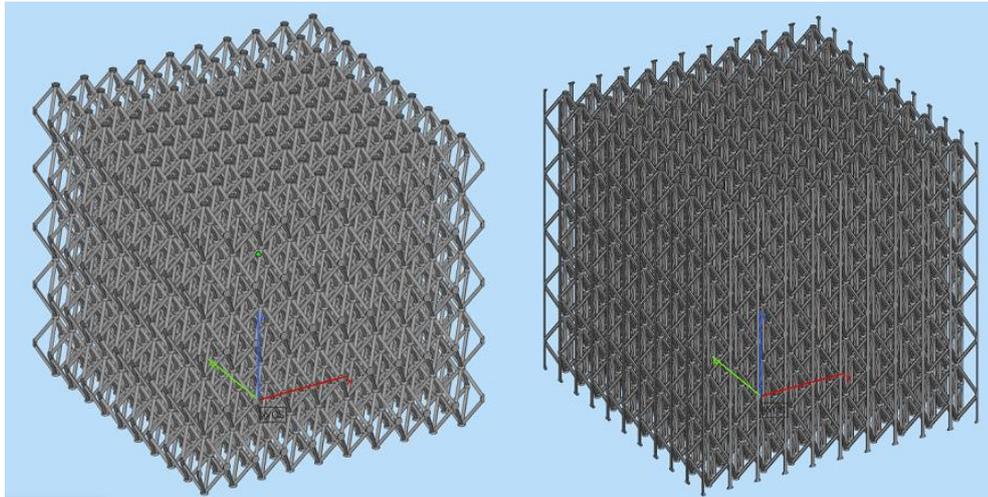


Figura 4.1 Provino con struttura a Diamante a sinistra e Diamante e colonne a destra

Tabella 4.1 Proprietà struttura Diamante e Diamante e colonne

Provino	Cella	Cella x [mm]	Cella y [mm]	Cella z [mm]	Φ nodo [mm]	Φ connettore [mm]	ρ_{rel} [%]
1	D	5	5	10	1.19359	0.59679	5
2	D+C	5	5	10	1	0.5	5

Sono quindi stati disposti i provini sul piano della macchina e successivamente è stato applicato un fattore di scala pari allo 0.25% sugli assi x e y in modo da compensare i ritiri presenti durante la fase di stampa. Sono stati generati i supporti i quali sono necessari per permettere ai reticoli di rimanere ancorati alla piattaforma di stampa, per fornire del materiale in cui poter effettuare il taglio di separazione e per far sì che avvenga una rimozione di calore dai pezzi, i quali altrimenti tenderebbero a deformarsi. Nella Figura 4.2 è possibile vedere l'aggiunta dei supporti, che per strutture di questo tipo si limitano a un estrusione di 1 mm nella parte inferiore del reticolo.

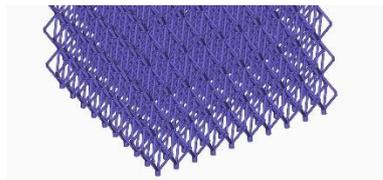


Figura 4.2 Supporti lattice structure

Sempre tramite lo stesso software si è quindi effettuato lo slicing dei pezzi ed è stato inviato il file alla stampante, una EOS M270. Dopo aver impostato i parametri necessari per la stampa (Tabella 3.2) sono stati stampati i provini in acciaio 316L (Figura 4.3).

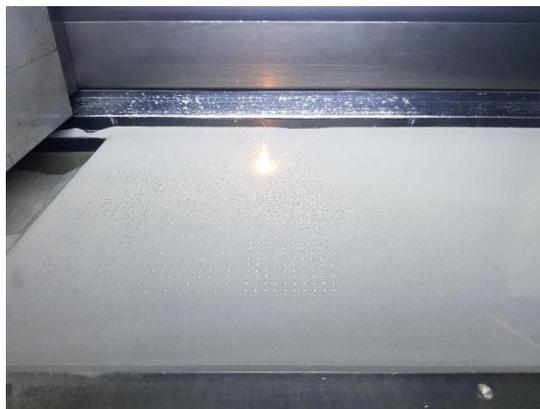


Figura 4.3 Stampa dei provini

Solitamente completata la stampa è necessario effettuare un trattamento termico di distensione in modo da rimuovere le tensioni interne, le quali potrebbero portare alla distorsione dei pezzi durante la rimozione degli stessi dalla piattaforma e alla loro fragilità. Il trattamento solitamente effettuato sui pezzi in acciaio 316L prevede la permanenza per 2 ore

in un forno a 800°C. In questo caso non è stato necessario effettuare alcun trattamento termico in quanto le lattice structure prodotte presentano aste molto sottili all'interno delle quali non si hanno tensioni residue importanti.

Si procede quindi alla rimozione dei provini dalla piattaforma di lavoro tramite elettroerosione a filo con una Charmilles Robofil 330F e nella Figura 4.4 è possibile osservare il risultato ottenuto.

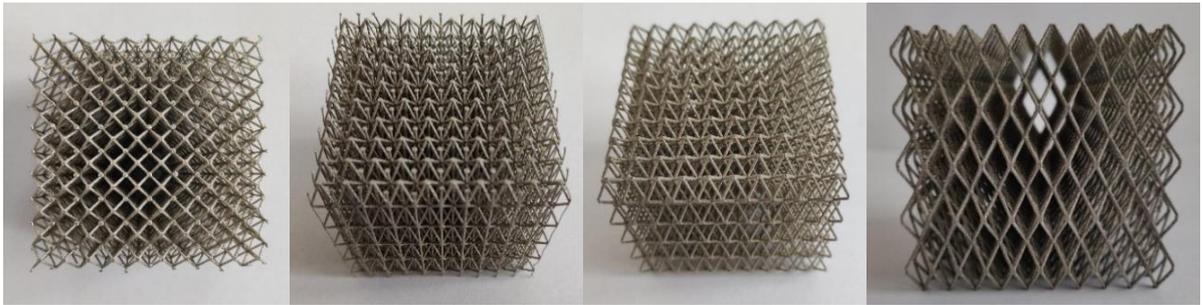


Figura 4.4 Reticoli completato il processo di stampa

4.2 Creazione del master in stereolitografia

Il master da realizzare deve essere un cubo di dimensioni tali da contenere completamente i reticoli metallici, si è quindi realizzato tramite SolidWorks un cubo di dimensioni 50 mm x 50 mm x 50mm visibile in Figura 4.5.

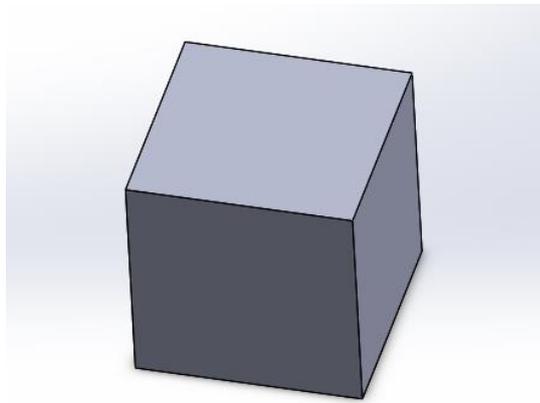


Figura 4.5 Modello cad del Master

Il modello è stato quindi esportato in formato .stl e aperto con Materialize Magics per prepararlo per la stampa. Siccome le dimensioni di questo componente sono ridotte si è scelto di non applicare nessun fattore di scala in quanto i ritiri dovrebbero essere minimi. Si è quindi passati al posizionamento del cubo sul piano di stampa e alla generazione dei relativi supporti visibili in Figura 4.6.

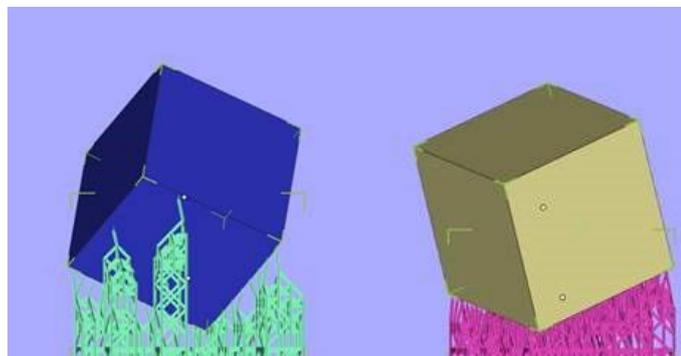


Figura 4.6 Supporti e orientamento dei master

Per precauzione si è scelto di stampare due volte il componente con due orientamenti diversi in modo da assicurarci la corretta realizzazione di almeno uno di essi. In Figura 4.7 è possibile osservare la posizione dei cubi sul piano di stampa della macchina.



Figura 4.7 Piano di stampa Stereolitografia

I componenti sono quindi stati mandati in stampa su una ProX 800 della 3D Systems e il materiale utilizzato per la loro realizzazione è l'Accura Xtreme Gray. Nella Figura 4.8 è possibile osservare la piattaforma della macchina a stampa completata.



Figura 4.8 Piano di stampa ProX 800

Sono quindi stati staccati i pezzi dalla piattaforma e rimossi i supporti. Si procede poi a un lavaggio con un solvente in una macchina a ultrasuoni (Ultrakleen) per rimuovere la resina in eccesso e al successivo inserimento dei pezzi per 40 minuti in un forno a raggi UV (Pro Cure 750) per completare la polimerizzazione e fare sì che i pezzi raggiungano le proprietà meccaniche volute. Si effettua infine una seppiatura dei pezzi in modo da rimuovere qualsiasi traccia dei supporti e nella Figura 4.9 è possibile osservare il risultato finale.

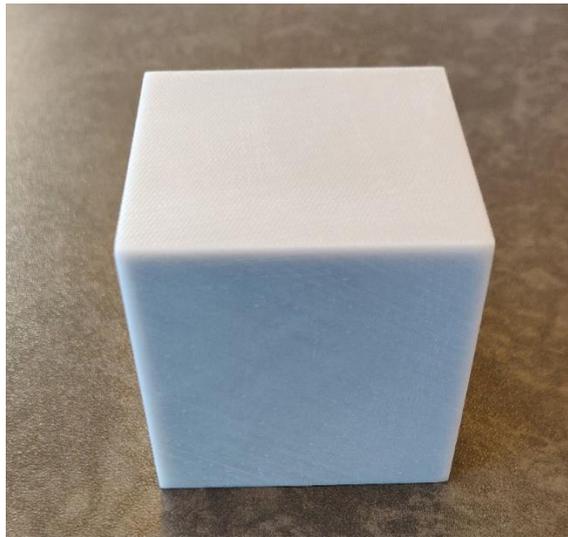


Figura 4.9 Master in stereolitografia finito

4.3 Creazione dello stampo in silicone

La creazione dello stampo al silicone viene effettuata partendo dal master precedentemente creato in stereolitografia il quale viene sabbiato in modo da renderlo liscio e pulito da eventuali agenti esterni presenti su di esso. Successivamente è necessario creare la zona di divisione dello stampo. Questa operazione consiste nell'individuare il punto in cui è preferibile aprire successivamente lo stampo per consentire di estrarre agevolmente i pezzi e creare un segno che permetta l'individuazione di tale zona dopo la creazione dello stampo stesso. Siccome questi pezzi sono molto semplici si sceglie di aprire lo stampo alla sommità del cubo. Si procede quindi ad attaccare del nastro al provino in modo da generare una piccola aletta (Figura 4.10) che andrà a creare una discontinuità nel silicone indicando il punto in cui dividere successivamente lo stampo.

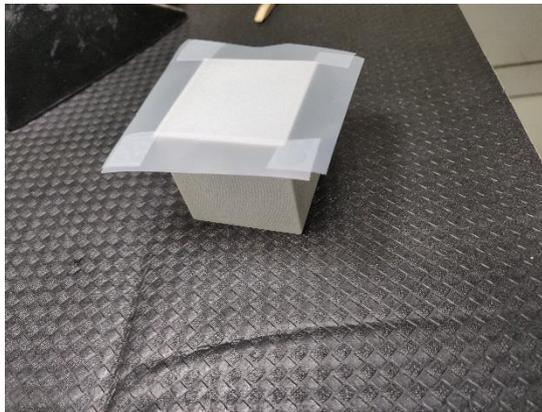


Figura 4.10 Master con traccia di divisione

Si procede quindi alla realizzazione della cassa (Figura 4.11) che conterrà lo stampo al silicone durante la sua fase di creazione. Per fare ciò si procede all'incollaggio di 5 pezzi di legno appositamente tagliati i quali definiscono i lati esterni del nostro stampo al silicone. Le dimensioni della cassa sono state scelte considerando circa 2 cm di distanza dal master per ogni lato e altri 2-4 cm sopra e sotto lo stesso. Questo per fare in modo che durante l'operazione di infiltrazione della resina plastica la parete dello stampo in silicone sia abbastanza spessa e non si dilati perdendo la forma voluta.



Figura 4.11 Cassa per lo stampo in silicone

Sono quindi stati eseguiti sul master 5 fori perimetrali del diametro di 0.2 mm nei quali sono stati inseriti dei bastoncini della stessa dimensione per creare i canali di sfiato, necessari per permettere la fuoriuscita dell'aria dallo stampo durante la fase di colata e evitare quindi l'insorgere di bolle all'interno dei pezzi. È stato poi effettuato un foro di diametro 10 mm nel quale è stato inserito un bastoncino della stessa dimensione per creare il canale di colata. Mantenendo il master sollevato dal fondo della scatola di circa 4 cm tramite degli spessori in legno, in modo da garantire lo spessore necessario alla creazione del fondo, è stata creata una struttura in grado di sorreggere e ancorare i vari canali durante la colata del silicone (Figura 4.12). Il master e la prima parte dei canali di colata sono quindi stati verniciati con una bomboletta nera il cui scopo è fungere da distaccante per il silicone e evidenziare maggiormente i bordi del master durante la fase di apertura dello stampo.

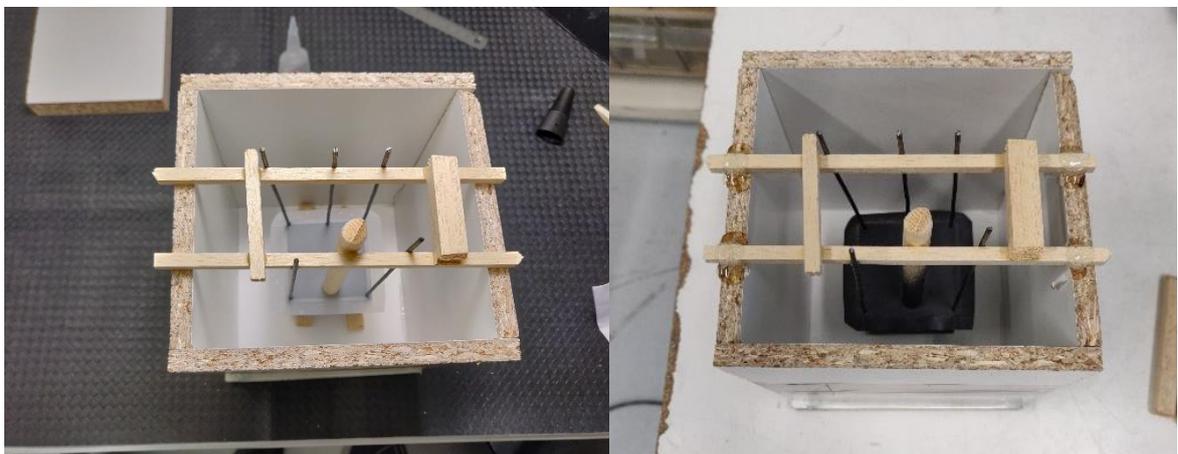


Figura 4.12 Master con canali e struttura di sostegno prima e dopo la verniciatura

Vengono quindi preparati circa 800 g di silicone i quali sono miscelati con un 10% di catalizzatore necessario per fare avvenire la solidificazione. La fase di miscelazione avviene

all'interno della macchina per il vuoto per una durata di 10 minuti in modo da rimuovere le bolle generatisi durante il processo (Figura 4.13).



Figura 4.13 Miscelazione del silicone con il catalizzatore

Completata la miscelazione il silicone viene colato manualmente nella scatola precedentemente creata con all'interno il master e tutti i canali di colata e di sfiato (Figura 4.14). Si aggiunge silicone fino a ricoprire completamente il master per uno spessore di circa 4 cm.



Figura 4.14 Colata del silicone

Al termine del riempimento la scatola con il silicone all'interno viene messa per circa 10 minuti all'interno della macchina del vuoto per eliminare le eventuali bolle generatisi durante il processo di colata che potrebbero portare alla nascita di imperfezioni nello stampo. Rimosse le bolle la scatola viene inserita in un forno a 70°C per 12 ore in modo da consentire al silicone di completare la catalisi.

All'uscita dal forno viene rimossa la struttura in legno e lo stampo si presenta come un blocco unico di silicone all'interno del quale è inglobato il master come visibile in Figura 4.15.

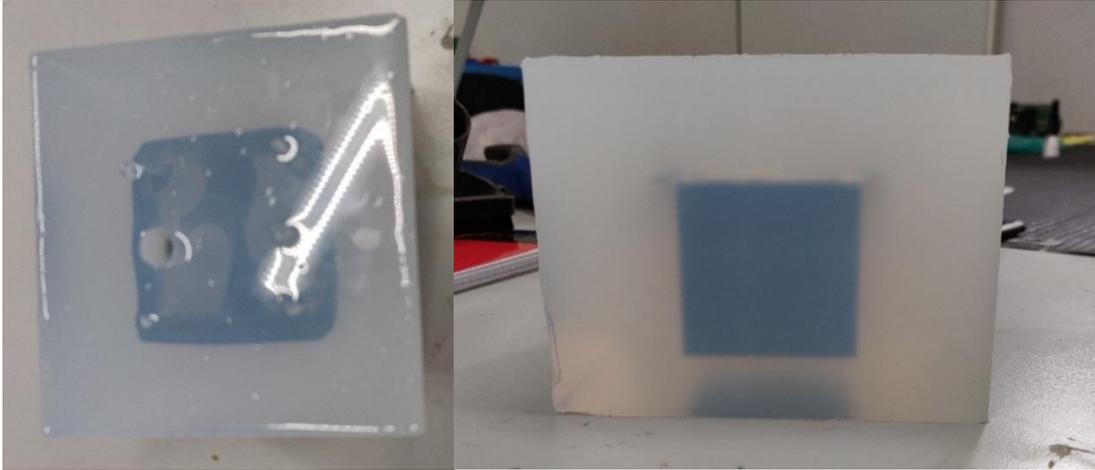


Figura 4.15 Stampo appena uscito dal forno

Si procede quindi alla divisione dello stampo nel punto in cui era stata inserita l'aletta di divisione. Il taglio viene fatto a mano generando una linea curva e mai uguale in modo da avere sempre un riferimento preciso per i centraggi futuri. Aperto lo stampo si estrae il master e si è pronti per le successive fasi di colata (Figura 4.16).

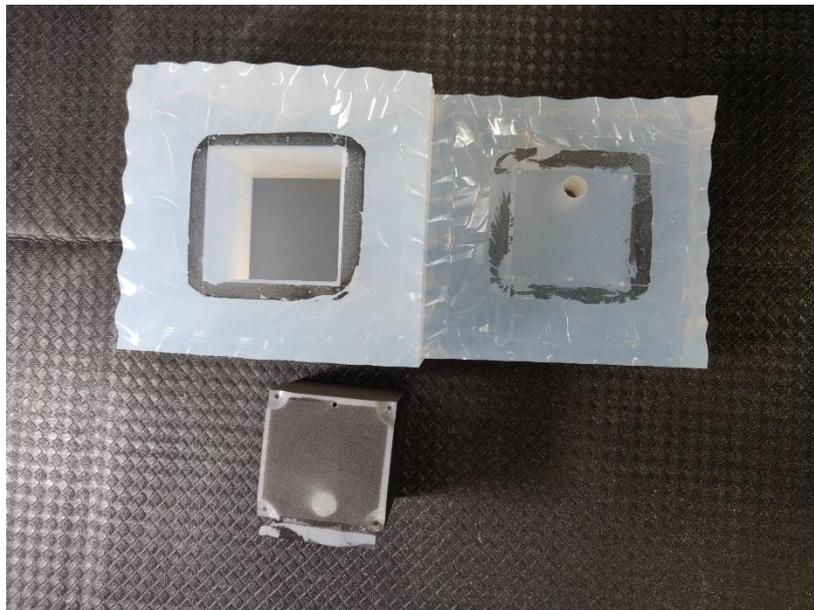


Figura 4.16 Apertura stampo e estrazione master

4.4 Processo di infiltrazione

La prima operazione da effettuare prima di una infiltrazione è mettere lo stampo in forno a 70 °C per 1 ora. Il raggiungimento della temperatura di lavoro è necessario per essere certi che le dimensioni siano esattamente quelle per cui è stato realizzato lo stampo e per far sì che non insorgano cricche nelle zone di contatto tra resina e silicone. Una volta scaldato lo stampo viene applicato del distaccante sulle pareti interne dello stesso per facilitare la successiva rimozione dei pezzi. Si inserisce quindi all'interno dello stampo la nostra lattice structure, la quale viene posizionata con il lato maggiore delle celle nella direzione del canale di colata in modo da facilitare l'inserimento del materiale (Figura 4.17).

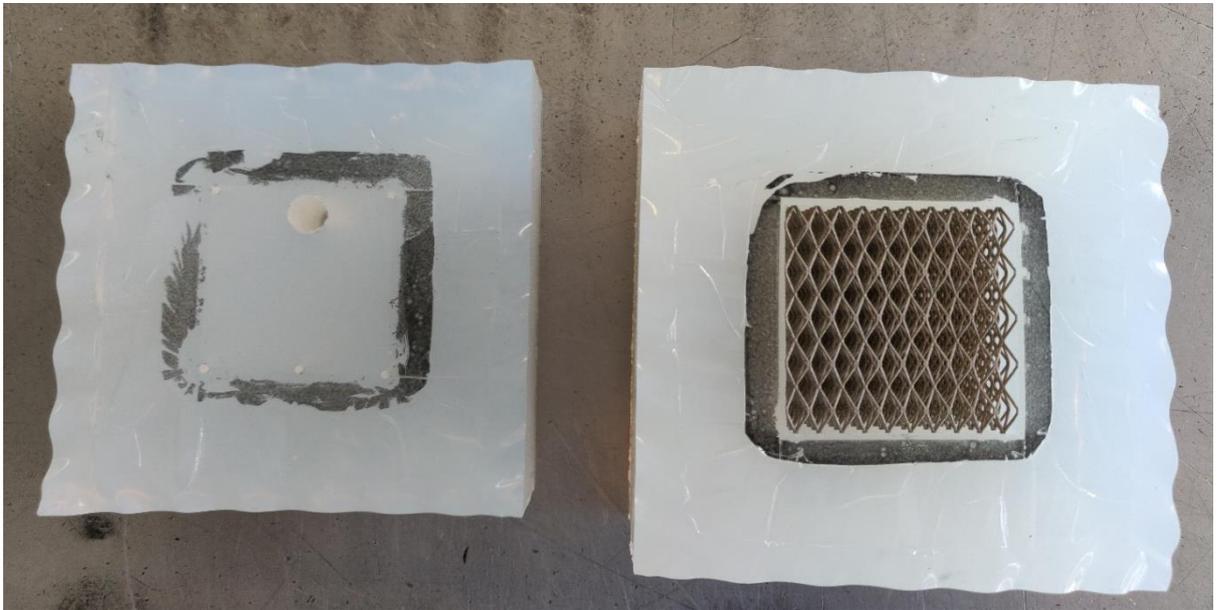


Figura 4.17 Posizionamento lattice structure nello stampo

Si procede quindi alla chiusura dello stampo tramite delle graffette metalliche e all'applicazione del canale di colata come visibile in Figura 4.18.

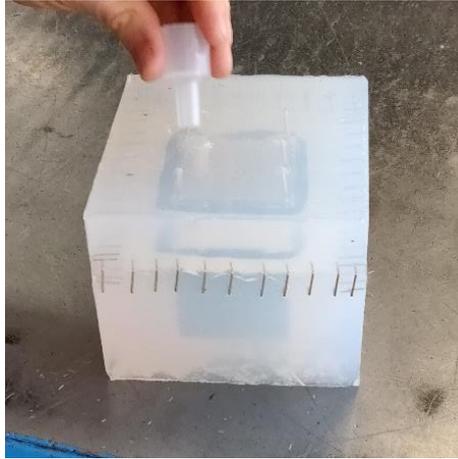


Figura 4.18 Chiusura stampo e applicazione canale di colata

Viene poi selezionato il materiale con cui infiltrare il provino che una volta preparato viene posizionato nel vano superiore della macchina utilizzata per l'infiltrazione. Nel vano inferiore viene posizionato lo stampo chiuso il quale viene collegato tramite un tubo all'imbuto in cui verrà colato il materiale. Nella Figura 4.19 è visibile la macchina pronta per l'infiltrazione senza il tubo di collegamento.



Figura 4.19 Macchina pronta per l'infiltrazione

L'infiltrazione inizia con la creazione del vuoto all'interno della macchina e il mescolamento del materiale che si intende colare. Completata la fase di miscelazione sotto vuoto si è certi che all'interno del materiale non siano presenti bolle e si procede alla colata. In questa fase il recipiente superiore si inclina e rovescia il materiale all'interno dell'imbuto collegato tramite un tubo allo stampo che si intende riempire. Tramite il vuoto si ottiene il riempimento dello stampo. Completata la colata è necessario lasciare lo stampo sotto vuoto all'interno della macchina ancora per qualche minuto in modo da rimuovere eventuali altre bolle generatisi durante il processo.

Lo stampo viene infine messo in forno a 70 °C per una quantità di tempo sufficiente a far completare la catalisi. Estratto dal forno è possibile aprire lo stampo e estrarre il provino. Si procede quindi alla rimozione del canale di colata e delle sbavature derivanti dal materiale infiltratosi nei canali di sfiato e il risultato ottenuto è quello visibile in Figura 4.20.

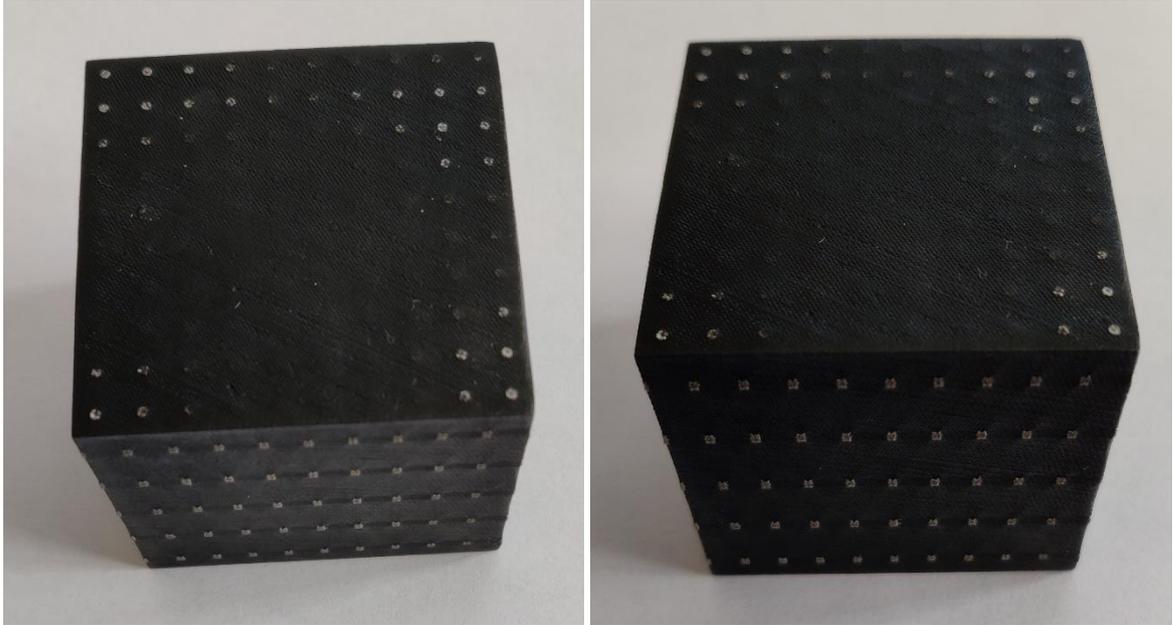


Figura 4.20 Provini infiltrati

Come visibile dall'immagine precedente si ottiene una struttura plastica nella quale è presente uno scheletro metallico.

4.5 Prove di caratterizzazione

Al fine di essere quasi sicuri di riuscire a infiltrare con successo i provini sin da subito si sono utilizzati reticoli con celle abbastanza grandi. Come visibile nella Tabella 4.1 le dimensioni di una singola cella sono state scelte come 5 mm x 5 mm x 10 mm. Grazie alle dimensioni elevate delle celle si ha una perdita di carico abbastanza bassa durante l'infiltrazione e i provini si riescono ad infiltrare senza lasciare vuoti. Il nostro obiettivo è sempre stato infiltrare queste strutture con delle gomme, per la prima prova si è però preferito usare una resina poliuretana (Renishaw 8045) in quanto essendo allo stato liquido meno viscosa della gomma rende più semplice il processo di infiltrazione. Le prime prove effettuate sono quindi state quelle visibili nella Tabella 4.2.

Tabella 4.2 Prove di caratterizzazione

Infiltrazione	Provino	Cella	Materiale infiltrato
1	1	D	Renishaw 8045
2	1	D	Axson UPX8400-1 ShA60
3	2	D+C	Axson UPX8400-1 ShA60

Dopo aver visto che si riusciva ad infiltrare senza problemi la struttura a diamante con la resina poliuretana Renishaw 8045 si è deciso di provare ad infiltrare lo stesso tipo di struttura con la gomma Axson UPX8400-1 con una durezza di 60 ShoreA. Visto l'esito positivo anche di questa prova si è scelto di testare il reticolo a diamante e colonne, il quale presenta una superficie di infiltrazione ridotta a causa delle aste verticali, direttamente con la gomma ed il risultato è stato ancora una volta positivo.

Si è deciso quindi di procedere in questo modo per tutte le infiltrazioni successive necessarie alla creazione dei provini su cui saranno poi effettuate le prove sperimentali.

5 Prove sperimentali

In questo capitolo verranno presentate le prove sperimentali effettuate e le relative osservazioni. Si è partiti dalle prove sui provini in gomma, si è passati poi alle prove sui reticoli metallici e infine sono stati testati i reticoli infiltrati.

Tutte le prove di compressione sono state eseguite in controllo di posizione con una velocità imposta di 2 mm/min e le dimensioni di tutti i provini sono di 50 mm x 50 mm x 50 mm.

5.1 Provini in gomma

Come prima cosa sono stati realizzati 3 provini in gomma di dimensioni 50 mm x 50 mm x 50 mm. Questi provini sono stati realizzati utilizzando la resina Axson UPX8400-1 miscelando in modo differente i suoi tre componenti in modo da ottenere le durezza ShoreA desiderate (Tabella 5.1).

Tabella 5.1 Rapporti di miscela per gomme

Durezza Provino	Rapporto di miscela		
	Poliolo	Isocianato	Extender
Shore A 30	100	100	450
Shore A 60	100	100	200
Shore A 90	100	100	0

L'obiettivo nel testare questi provini è avere dei dati certi sul comportamento del materiale plastico che andremo successivamente ad infiltrare all'interno dei reticoli.

5.1.1 Shore A 30

Il provino è stato posizionato in macchina (Figura 5.1) ed è stato sottoposto a una prova di compressione in ogni direzione per verificare l'isotropia dello stesso. Le prove, i cui grafici sono visibili in Figura 5.2, sono state effettuate comprimendo il campione solo di 8 mm in modo da essere certi di rimanere nella parte elastica.

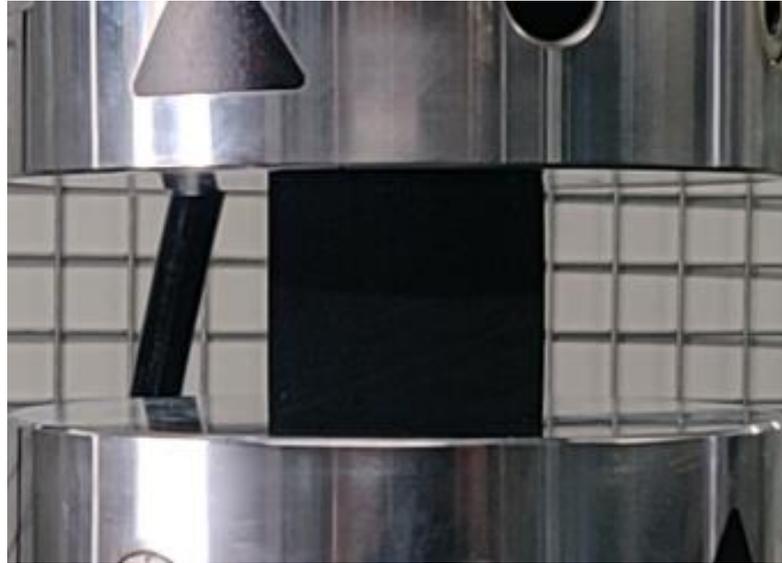


Figura 5.1 Provino gomma Shore A 30 pronto per la compressione

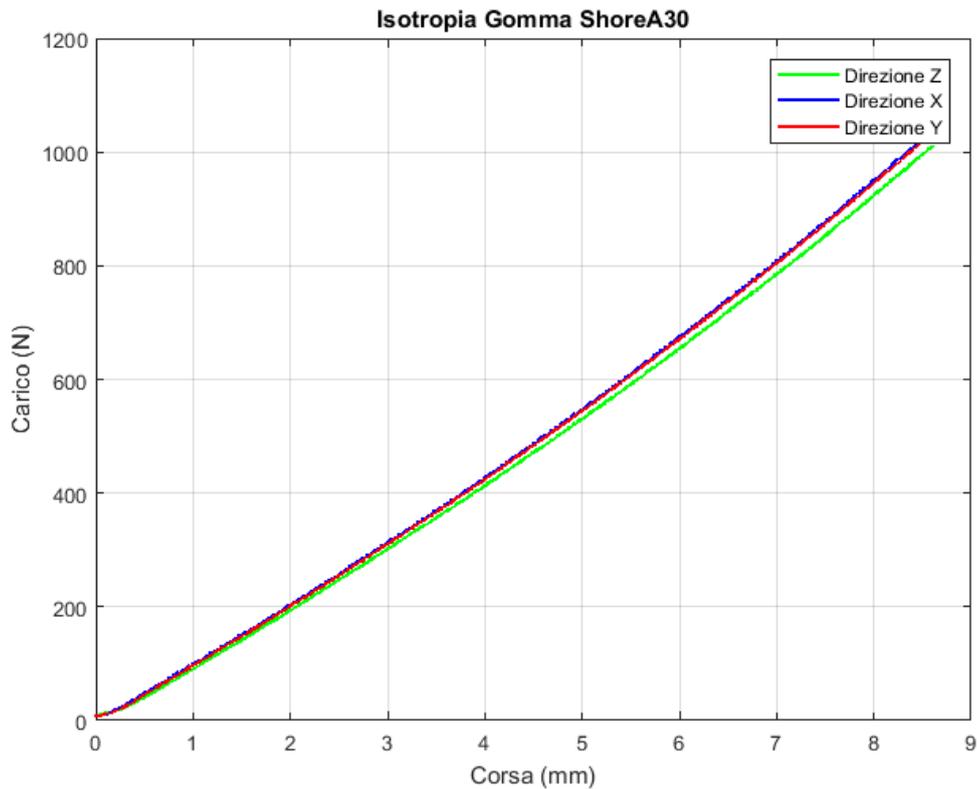


Figura 5.2 Controllo Isotropia Gomma Shore A 30

Analizzando le curve ottenute risulta evidente che il materiale è perfettamente isotropo ed è stato inoltre possibile calcolare la pendenza del tratto lineare pari a 185.15 N/mm e il modulo elastico equivalente pari a 3.7 MPa. Quest'ultimo è stato ricavato dividendo la tensione, ottenuta dividendo la forza applicata per l'area di base del provino pari a 25 mm², per la deformazione.

Successivamente è stata effettuata una prova di compressione completa per ottenere tutta la curva visibile in Figura 5.3. Dalla Figura 5.4 è possibile osservare che al momento dello scarico il provino è tornato in modo perfettamente elastico alle condizioni di partenza.

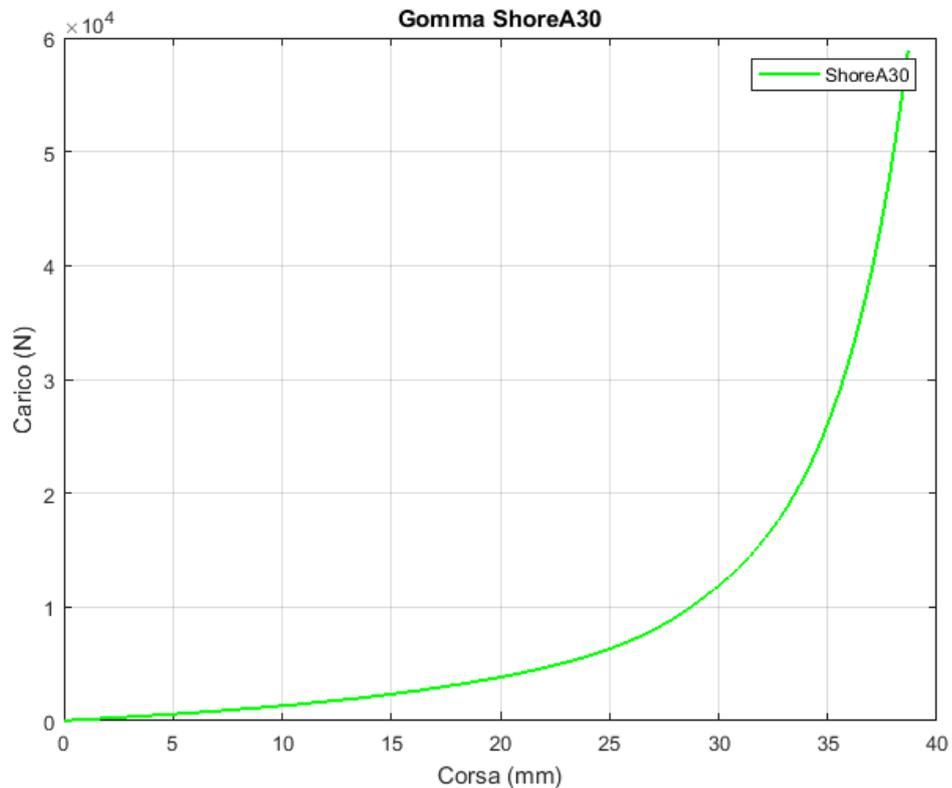


Figura 5.3 Prova compressione gomma Shore A 30



Figura 5.4 Ritorno provino gomma ShoreA30

5.1.2 Shore A 60

Il provino è stato posizionato in macchina (Figura 5.5) ed è stato sottoposto a una prova di compressione in ogni direzione per verificare l'isotropia dello stesso. Le prove, i cui grafici sono visibili in Figura 5.6, sono state effettuate comprimendo il campione solo di 3 mm in modo da essere certi di rimanere nella parte elastica.

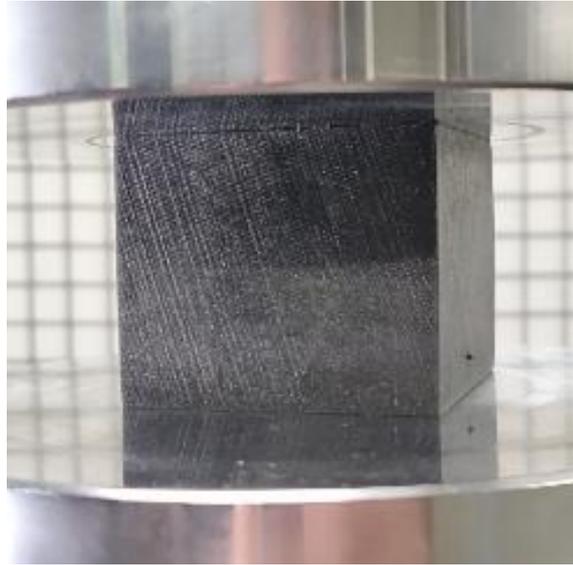


Figura 5.5 Provino gomma Shore A 60 pronto per la compressione

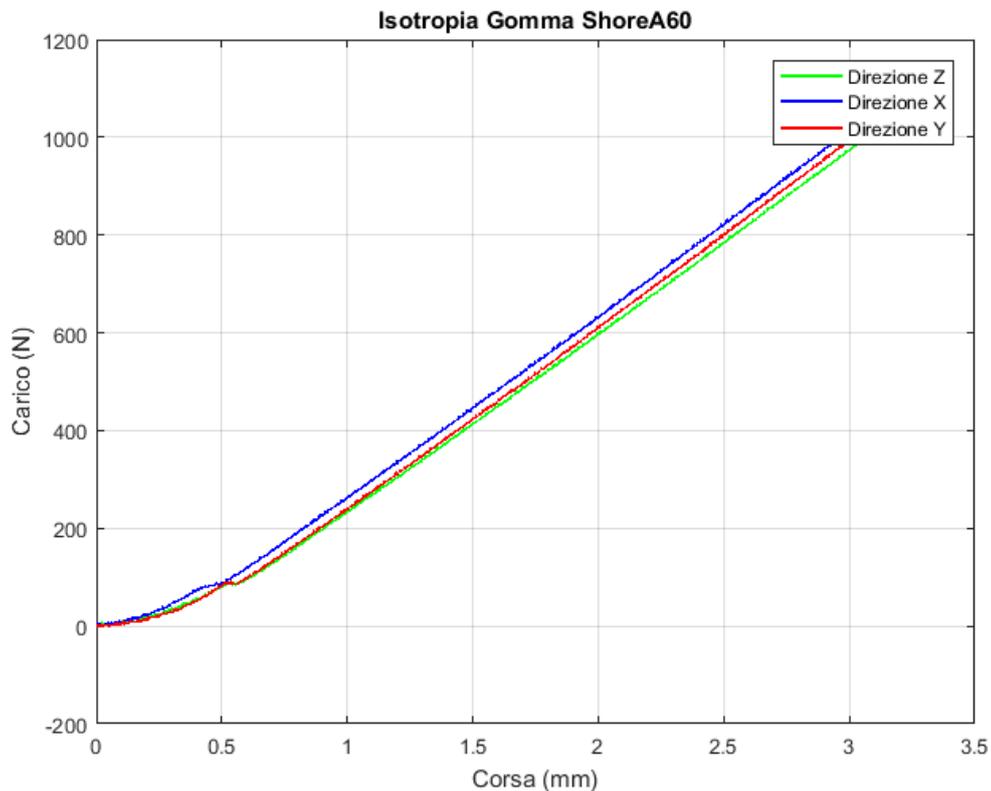


Figura 5.6 Controllo Isotropia Gomma Shore A 60

Analizzando le curve ottenute risulta evidente che il materiale è perfettamente isotropo ed è stato inoltre possibile calcolare la pendenza del tratto lineare pari a 544.38 N/mm e il modulo elastico equivalente pari a 10.89 MPa. Quest'ultimo è stato ricavato dividendo la tensione, ottenuta dividendo la forza applicata per l'area di base del provino pari a 25 mm², per la deformazione.

Successivamente è stata effettuata una prova di compressione completa per ottenere tutta la curva visibile in Figura 5.7. Dalla Figura 5.8 è possibile osservare che al momento dello scarico il provino è tornato quasi completamente alle condizioni di partenza, rimanendo con un leggero effetto a botte.

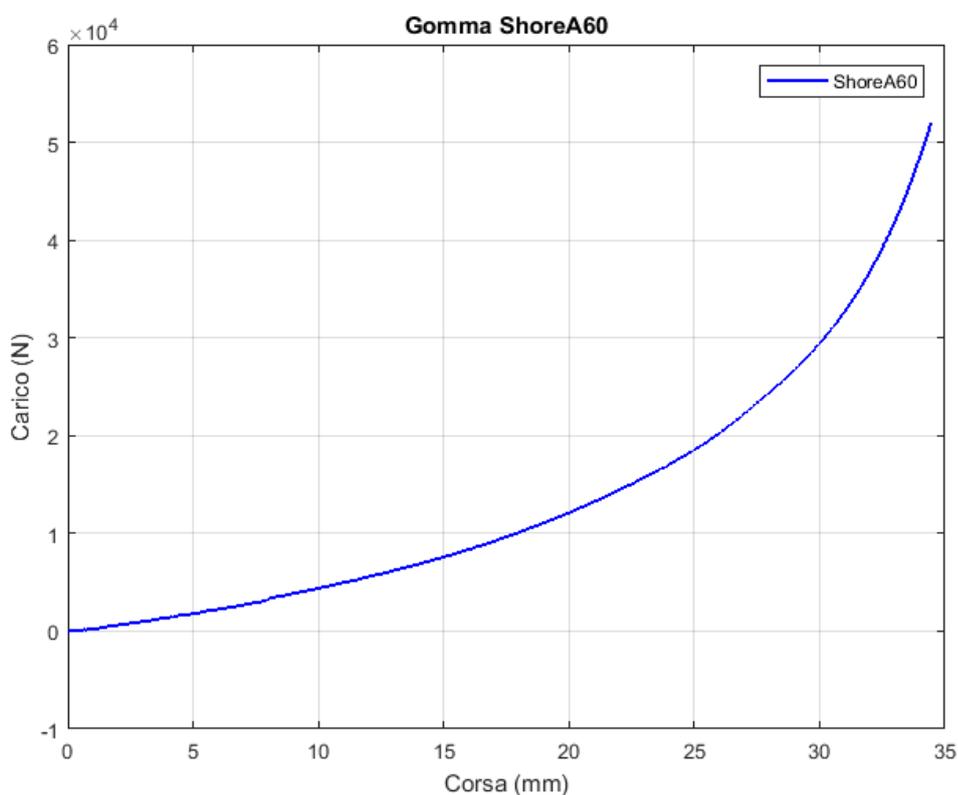


Figura 5.7 Prova compressione gomma Shore A 60



Figura 5.8 Ritorno provino gomma ShoreA60

5.1.3 Shore A 90

Il provino è stato posizionato in macchina (Figura 5.9) ed è stato sottoposto a una prova di compressione in ogni direzione per verificare l'isotropia dello stesso. Le prove, i cui grafici sono visibili in Figura 5.10, sono state effettuate comprimendo il campione solo di 1.6 mm in modo da essere certi di rimanere nella parte elastica.

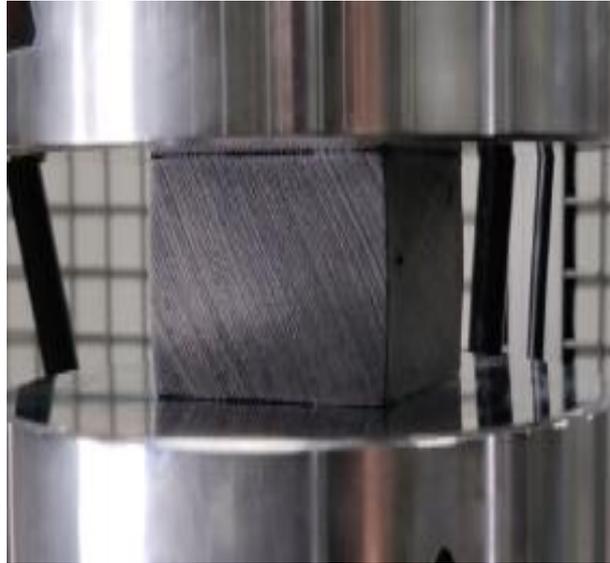


Figura 5.9 Provino gomma Shore A 90 pronto per la compressione

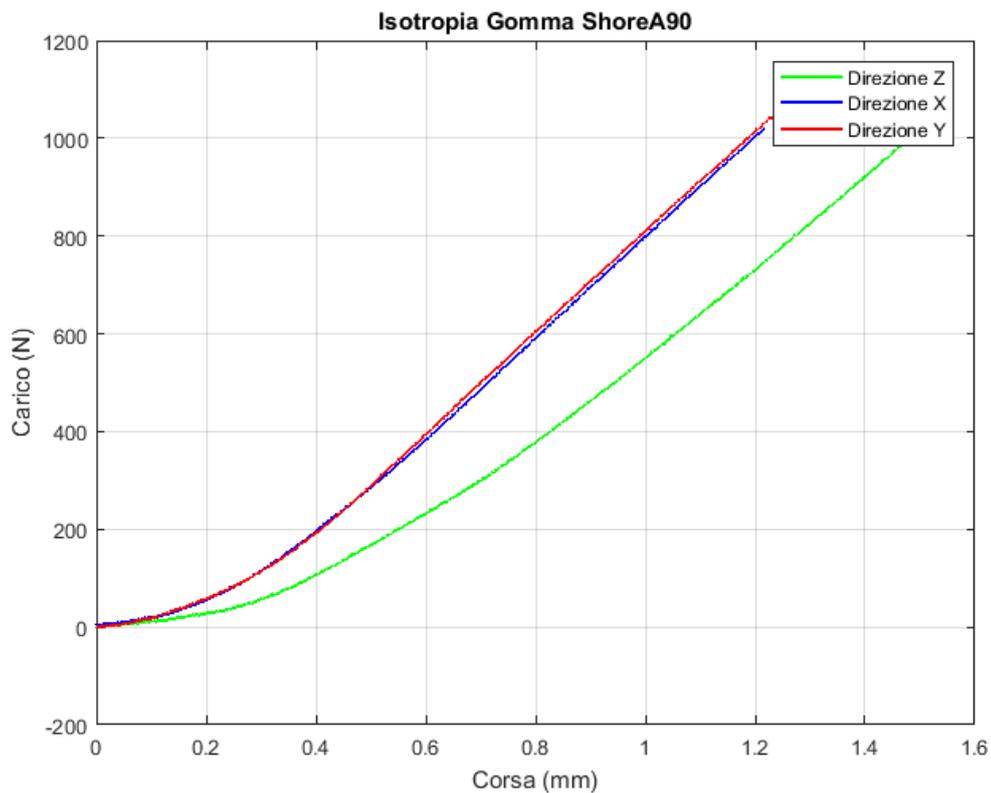


Figura 5.10 Controllo Isotropia Gomma Shore A 90

Analizzando le curve ottenute si nota una perfetta isotropia lungo le direzioni x e y e una curva con una pendenza diversa per la direzione z. Questa differenza può essere dovuta o a un leggero movimento del piano con cui sono state effettuate le prove, il quale è risultato essere leggermente libero, oppure al fatto che durante la prima prova, effettuata lungo l'asse z, il materiale si sia leggermente incrudito aumentando così la pendenza della curva per le due prove successive. Facendo riferimento alle due direzioni risultate isotrope si è calcolata la pendenza del tratto lineare pari a 911.61 N/mm e il modulo elastico equivalente pari a 18.23 MPa. Quest'ultimo è stato ricavato dividendo la tensione, ottenuta dividendo la forza applicata per l'area di base del provino pari a 25 mm², per la deformazione.

Successivamente è stata effettuata una prova di compressione completa per ottenere tutta la curva, visibile in Figura 5.11. Dalla Figura 5.12 è possibile osservare che al momento dello scarico il provino non è tornato alle condizioni di partenza, rimanendo con una forma a botte.

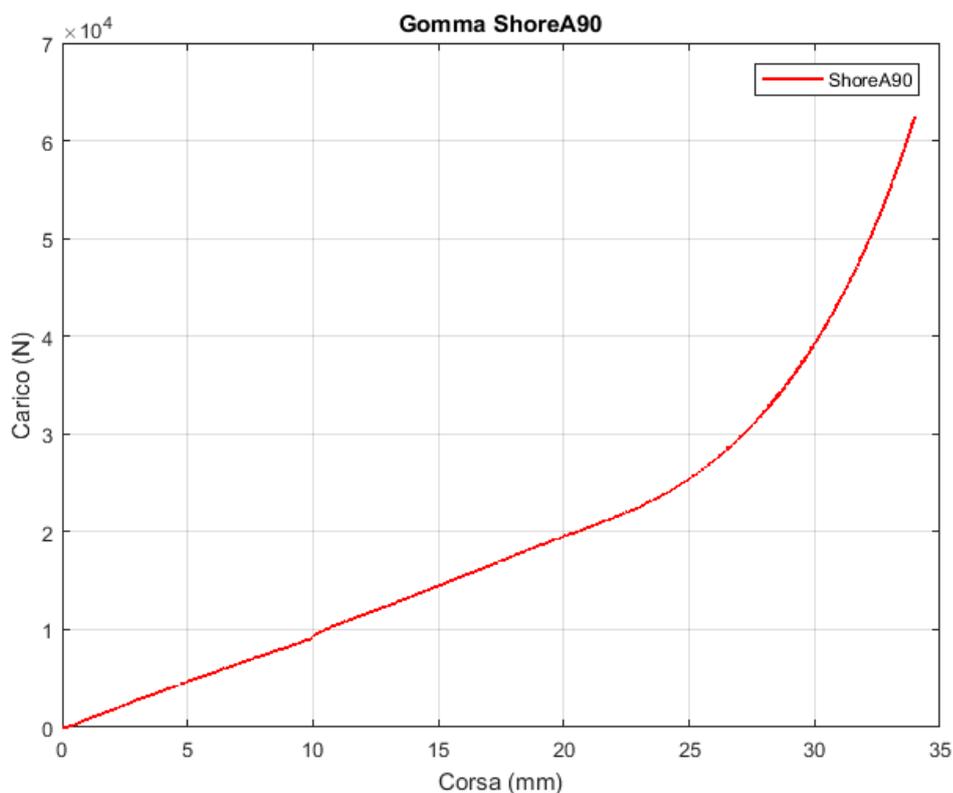


Figura 5.11 Prova compressione gomma Shore A 90



Figura 5.12 Ritorno provino gomma ShoreA90

5.1.4 Osservazioni

Confrontando i grafici delle gomme con durezza diversa (Figura 5.13) si osserva un aumento di rigidità crescente passando dalla gomma Shore A 30 alla Shore A 90. Aumenta inoltre l'area sottesa alla curva e quindi l'energia assorbita durante la compressione.

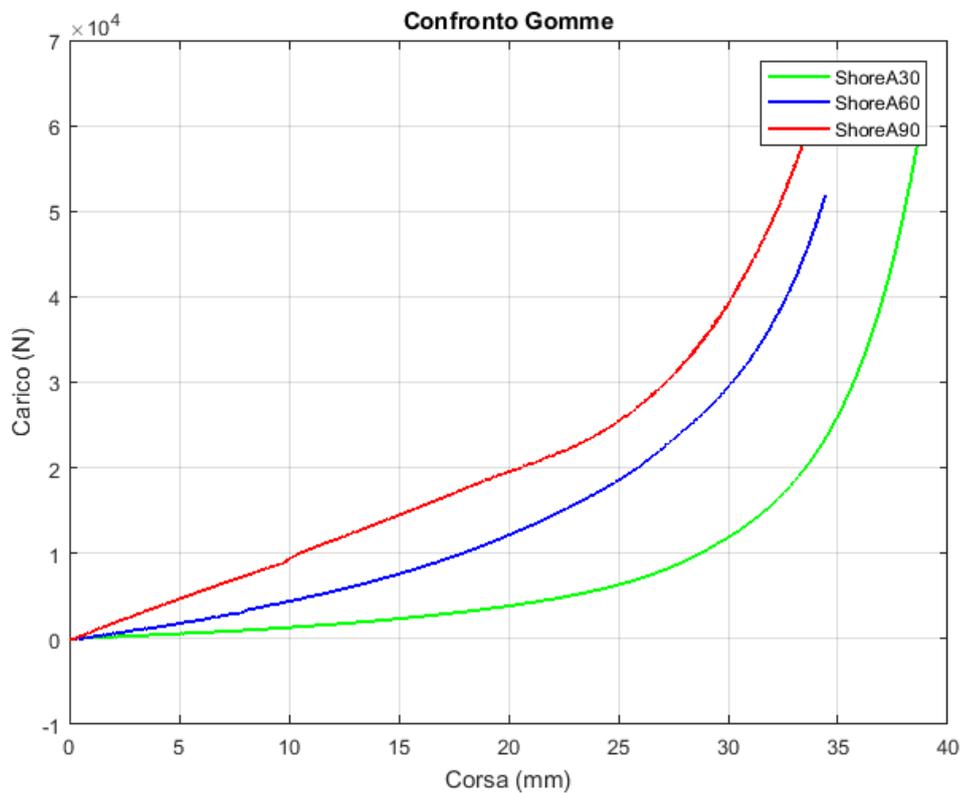


Figura 5.13 Confronto gomme a compressione totale

Per procedere con le infiltrazioni dei reticoli si è scelto di utilizzare le gomme con durezza Shore A 30 e Shore A 60 in quanto più morbide e quindi più adatte all'assorbimento di eventuali urti di media entità. Si è inoltre scelto di non utilizzare la gomma Shore A 90 in

quanto con la sua elevata durezza avrebbe reso più difficile osservare il comportamento dei reticoli infiltrati, i quali avendo delle densità relative abbastanza basse non godono di proprietà meccaniche elevatissime.

5.2 Reticoli metallici

Al fine di effettuare delle prove che consentano di monitorare l'influenza della durezza della gomma infiltrata e della densità relativa del reticolo sulle due tipologie di struttura prese in considerazione, si è deciso di vincolare tutti i parametri restanti. Sono quindi state fissate le dimensioni dei provini e le dimensioni delle celle, vincolando conseguentemente anche il numero delle stesse. Le dimensioni dei provini utilizzati sono riportati nella Tabella 5.2.

Tabella 5.2 Dimensioni provini

Dimensioni Provino	Cella x	Cella y	Cella z	Numero di celle
50 x 50 x 50 mm	5 mm	5 mm	10 mm	500

Si è scelto di utilizzare provini con un numero di celle superiore a 5 per ogni asse per evitare gli effetti di bordo e per fare sì che aumentasse la ripetibilità dei test effettuati. Sono quindi stati testati tre reticoli per tipo di struttura i quali presentano densità relativa crescente. Nella Tabella 5.3 sono elencati tutti i reticoli che sono stati testati.

Tabella 5.3 Reticoli stampati

Provino	Cella	Φ nodo [mm]	Φ connettore [mm]	ρ_{rel} [%]
D1	Diamante	1,19359	0,59679	5
D2	Diamante	1,46686	0,73343	7.5
D3	Diamante	1,69647	0,84823	10
DC1	Diamante e colonne	1	0,5	5
DC2	Diamante e colonne	1,20894	0,60447	7.5
DC3	Diamante e colonne	1,39746	0,69873	10

Una prima osservazione nasce dal fatto che per mantenere la densità relativa dei reticoli costante è stato necessario modificare il diametro dei nodi e dei connettori, ottenendo così diametri inferiori per le strutture a diamante e colonne le quali hanno più aste ma più sottili.

Conoscendo le problematiche legate alla stampa di reticoli di questo tipo si è deciso di pesare i campioni per verificare che le densità relative ipotizzate nel modello CAD fossero state rispettate durante la fase di stampa. Nella Tabella 5.4 sono indicati i pesi reali dei campioni e le reali densità relative.

Tabella 5.4 Pesi e densità relative reali dei reticoli

Provino	Peso [g]	ρ_{rel} [%]
D1	44	4.4
D2	67	6.7
D3	91	9.1
DC1	40	4
DC2	60	6
DC3	81	8.1

Si nota che durante il processo di stampa tutti i reticoli sono stati stampati con una quantità di materiale inferiore a quella ipotizzata e che i reticoli con il maggior numero di aste di minore diametro hanno risentito maggiormente di questa problematica.

5.2.1 *Provini con struttura a diamante*

Osservato che le modalità di cedimento di questa tipologia di provini sono le stesse per tutte le densità relative si è scelto di riportare le immagini soltanto di uno di essi, i dati relativi alle prove saranno invece riportati per tutti i provini analizzati.

Come visibile nella Figura 5.14 il provino essendo direzionale è stato posizionato in macchina con il lato lungo delle celle lungo l'asse z ed è stata effettuata la prova.

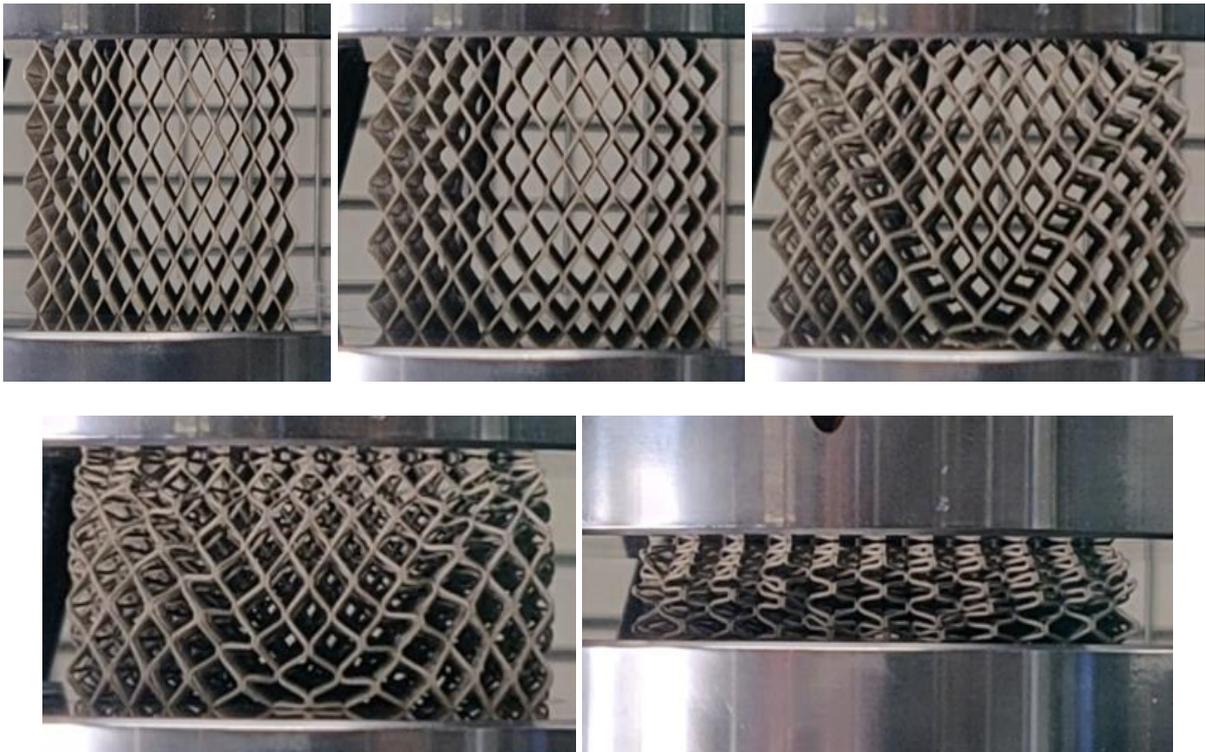


Figura 5.14 Prova di compressione provino D1

Dalle immagini emerge come durante la compressione si abbia in una prima fase un generale e omogeneo allargamento delle celle, il quale è seguito dal generarsi di piani di scorrimento a 45° e da un generale addensamento finale delle stesse. Osservando la Figura 5.15 si nota come durante la compressione il reticolo si sia ripiegato omogeneamente su se stesso senza cedimenti e senza particolari distorsioni. L'unica area distorta risulta essere nel centro del provino a causa dell'allargamento delle celle durante la compressione e alla mancanza di spazio per dilatarsi.

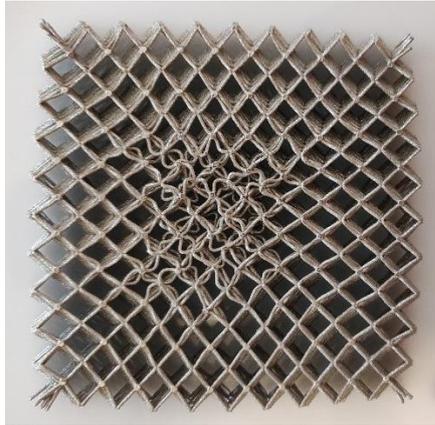


Figura 5.15 Provino D1 compresso

Nella Figura 5.16 è possibile osservare il grafico ottenuto durante la prova di compressione per tutti i provini con questa tipologia di reticolo.

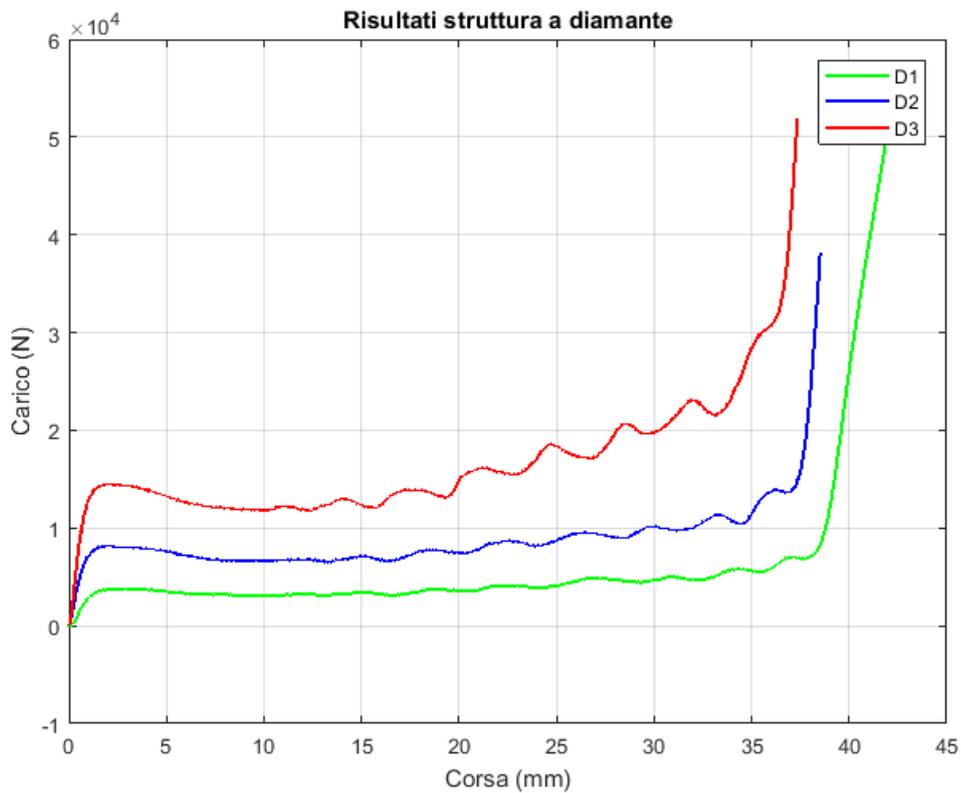


Figura 5.16 Prova di compressione provini con struttura a diamante

Dopo una prima fase di aumento graduale del carico si ha un appiattimento della curva la quale prosegue a carico praticamente costante fino a raggiungere la fase di densificazione, punto in cui la pendenza della curva aumenta drasticamente fino ad essere quasi verticale. Si nota che aumentando la densità relativa del provino aumentano la pendenza della curva nel

primo tratto lineare e la tensione alla quale si sviluppa il tratto piano a tensione costante. Si nota inoltre che con l'aumento della densità relativa aumenta l'ampiezza delle oscillazioni presenti nella parte piana della curva, insorge una leggera pendenza e la densificazione avviene per valori di compressione minori.

Lungo il primo tratto lineare è stato possibile calcolare la pendenza della curva e il modulo elastico equivalente le quali sono riportate in Tabella 5.5. Per il calcolo del modulo elastico equivalente è stata calcolata inizialmente la tensione, dividendo la forza applicata per l'area di base del provino, e successivamente la stessa è stata divisa per la deformazione.

Tabella 5.5 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente provini con struttura a diamante

Provino	Pendenza curva [N/mm]	E [MPa]
D1	3668	73.36
D2	9156	183.12
D3	14754	295

È stata inoltre calcolata l'energia assorbita durante la compressione per diversi valori della stessa, i risultati di tale calcolo sono riportati in Tabella 5.6.

Tabella 5.6 Energia assorbita provini con struttura a diamante

Provino	Energia assorbita [J] per mm di compressione				
	5	10	15	20	25
D1	15.81	32	48.01	65.23	84.7
D2	35.76	70.32	104.08	140.28	181.44
D3	63.34	124.65	186.01	252.50	334.10

Osservando i risultati si nota che sia il modulo elastico equivalente che l'energia assorbita aumentano maggiormente nel passaggio dal provino D1 al D2 piuttosto che nel passaggio dal provino D2 al D3. Questo ci porta alla conclusione che l'aumento di densità relativa nei reticoli metallici sia più significativo se effettuato partendo da bassi valori della stessa e diventi via via meno influente all'aumentare della densità relativa del provino.

5.2.2 *Provini con struttura a diamante e colonne*

Osservato che le modalità di cedimento di questa tipologia di provini sono le stesse per tutte le densità relative si è scelto di riportare le immagini soltanto di uno di essi, i dati relativi alle prove saranno invece riportati per tutti i provini analizzati.

Come visibile nella Figura 5.17 il provino essendo direzionale è stato posizionato in macchina con il lato lungo delle celle lungo l'asse z ed è stata effettuata la prova.

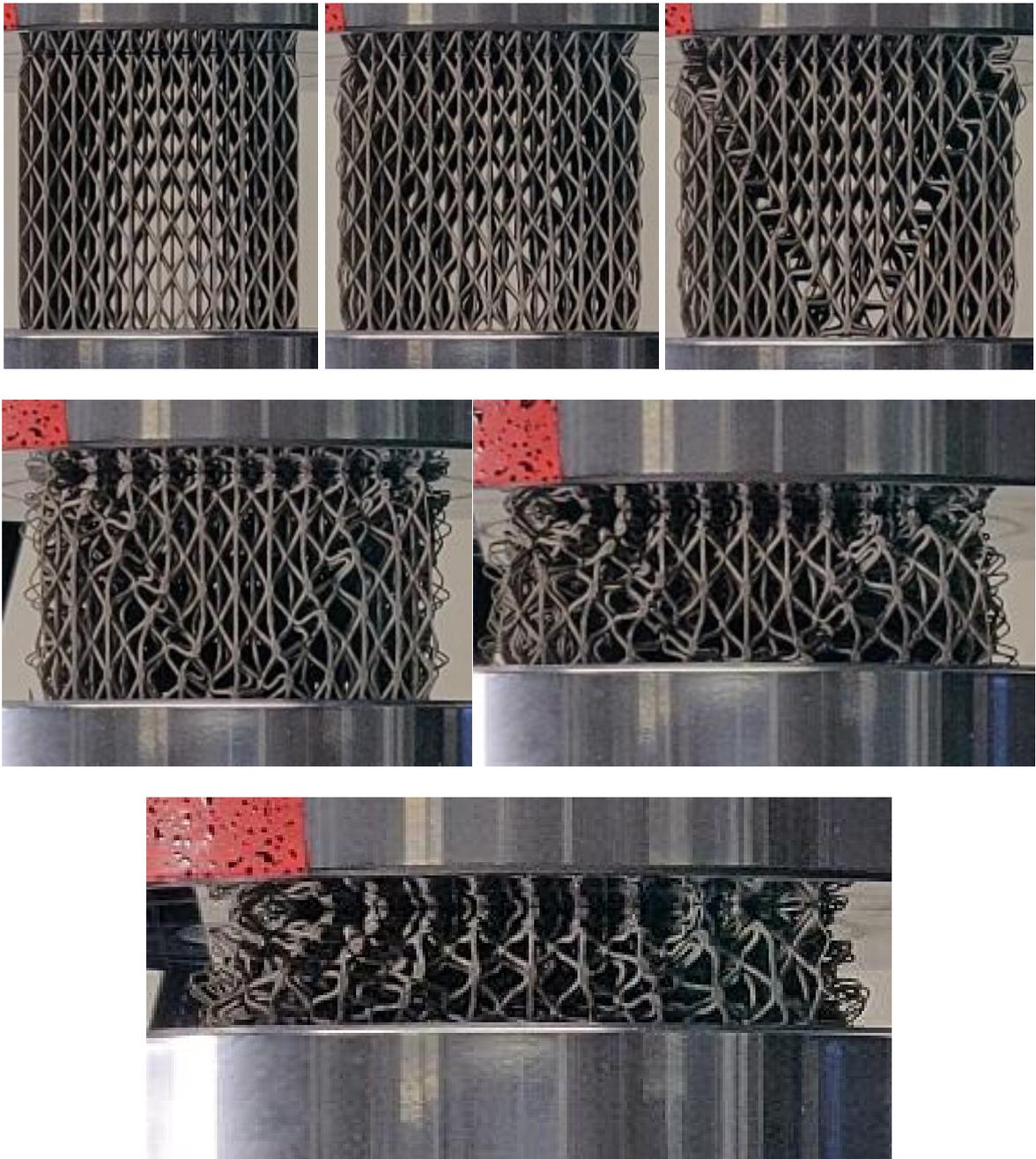


Figura 5.17 Prova di compressione provino DC3

Dalle immagini emerge come durante la compressione si presenti inizialmente il cedimento di alcune delle strutture verticali con un conseguente allargamento delle rispettive celle. Con il proseguire di questo fenomeno insorgono dei piani di scorrimento a 45° e successivamente si ha un addensamento della struttura. Si nota come a differenza della struttura a diamante, in cui tutte le celle si ripiegavano contemporaneamente e in modo ordinato su sé stesse, in questo caso si ha un addensamento disordinato e le strutture non tendono a cedere tutte contemporaneamente ma a piani.

Osservando la Figura 5.18 si nota come durante la compressione le strutture verticali presenti nella parte esterna del provino tendano a ripiegarsi su se stesse e poi sporgere verso l'esterno dello stesso, mentre quelle nella parte centrale tendano a ripiegarsi su se stesse e verso il centro del provino. La componente a diamante del reticolo tende a collassare su sé stessa in modo abbastanza omogeneo nella parte esterna mentre nella parte interna risulta essere molto distorta.

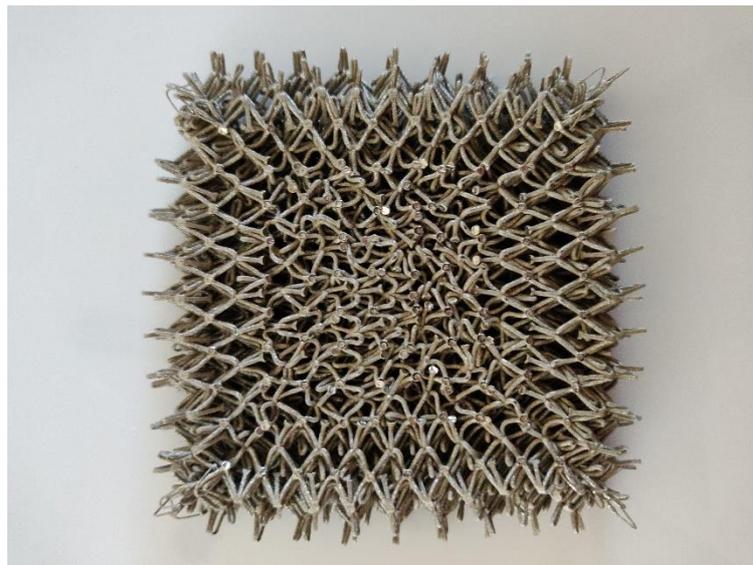


Figura 5.18 Provino DC3 compresso

Nella Figura 5.19 è possibile osservare il grafico ottenuto durante la prova di compressione per tutti i provini con questa tipologia di reticolo.

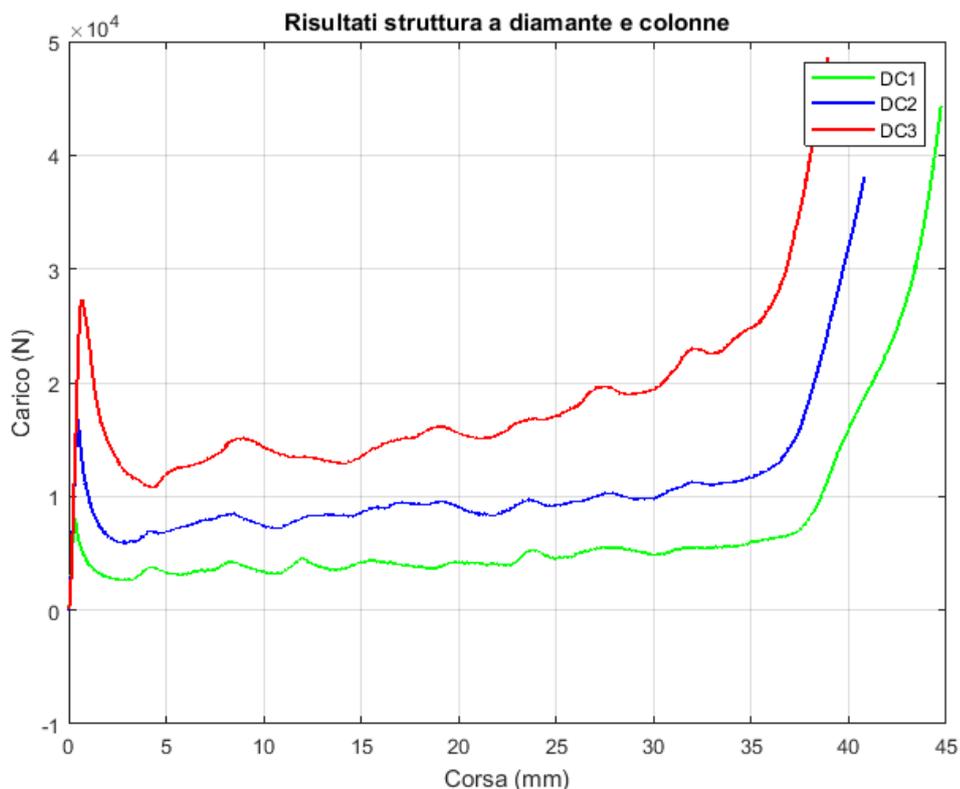


Figura 5.19 Prova di compressione provini con struttura a diamante e colonne

Dopo una prima fase di aumento graduale del carico si raggiunge un picco al quale si ha il cedimento per carico di punta delle strutture verticali con una conseguente diminuzione dello stesso. La curva procede poi con una parte piana a carico costante o leggermente crescente fino a raggiungere la densificazione, punto in cui la pendenza della curva aumenta drasticamente fino ad essere quasi verticale. Si osserva che aumentando la densità relativa del provino aumentano il carico a cui si ha il cedimento delle aste verticali, la pendenza della curva nel primo tratto lineare e la tensione alla quale si sviluppa il tratto piano. Si nota inoltre che con l'aumento della densità relativa aumenta l'ampiezza delle oscillazioni presenti nella parte piana della curva, insorge una leggera pendenza e la densificazione avviene per valori di compressione minori.

Lungo il primo tratto lineare è stato possibile calcolare la pendenza della curva e il modulo elastico equivalente le quali sono riportate in Tabella 5.7. Per il calcolo del modulo elastico equivalente è stata calcolata inizialmente la tensione, dividendo la forza applicata per l'area di base del provino, e successivamente la stessa è stata divisa per la deformazione.

Tabella 5.7 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente provini con struttura a diamante e colonne

Provino	Pendenza curva [N/mm]	E [MPa]
DC1	36339.65	726.79
DC2	48629.34	972.59
DC3	54565.06	1091.30

È stata inoltre calcolata l'energia assorbita durante la compressione per diversi valori della stessa, i risultati di tale calcolo sono riportati in Tabella 5.8.

Tabella 5.8 Energia assorbita provini con struttura a diamante e colonne

Provino	Energia assorbita [J] per mm di compressione				
	5	10	15	20	25
DC1	17.93	35.84	54.71	74.87	96.99
DC2	37.87	76.85	116.82	163.06	207.83
DC3	72.19	140.71	207.74	283.54	363.46

Osservando i risultati si nota che sia il modulo elastico equivalente che l'energia assorbita aumentano maggiormente nel passaggio dal provino DC1 al DC2 piuttosto che nel passaggio dal provino DC2 al DC3. Questo ci porta alla conclusione che l'aumento di densità relativa nei reticoli metallici sia più significativo se effettuato partendo da bassi valori della stessa e diventi via via meno influente all'aumentare della densità relativa del provino.

5.2.3 Osservazioni

Confrontando i grafici ottenuti dalle prove sulle strutture a diamante con quelle a diamante e colonne (Figura 5.20) emerge che a parità di densità relativa teorica le due strutture differiscono nel tratto iniziale e nel tratto finale, ma sono molto simili nel tratto piano a tensione costante. Nel tratto iniziale le prime presentano un modulo elastico inferiore e un passaggio diretto alla parte piana della curva, mentre le seconde presentano modulo elastico superiore e un picco di carico sopportato più elevato. Segue poi il tratto piano della curva il quale è molto simile per entrambe le tipologie di struttura sia per quanto riguarda il carico a cui si sviluppa, e quindi l'energia assorbita, sia per il punto di inizio della fase di densificazione. La pendenza della curva nell'ultima fase risulta essere maggiore per le

strutture a diamante. Questo potrebbe essere una conseguenza del fatto che ripiegandosi ordinatamente le aste si sovrappongono le une alle altre arrivando prima a densificare, oppure, al fatto che le strutture a diamante e colonne risultano avere meno materiale in conseguenza ai difetti di stampa.

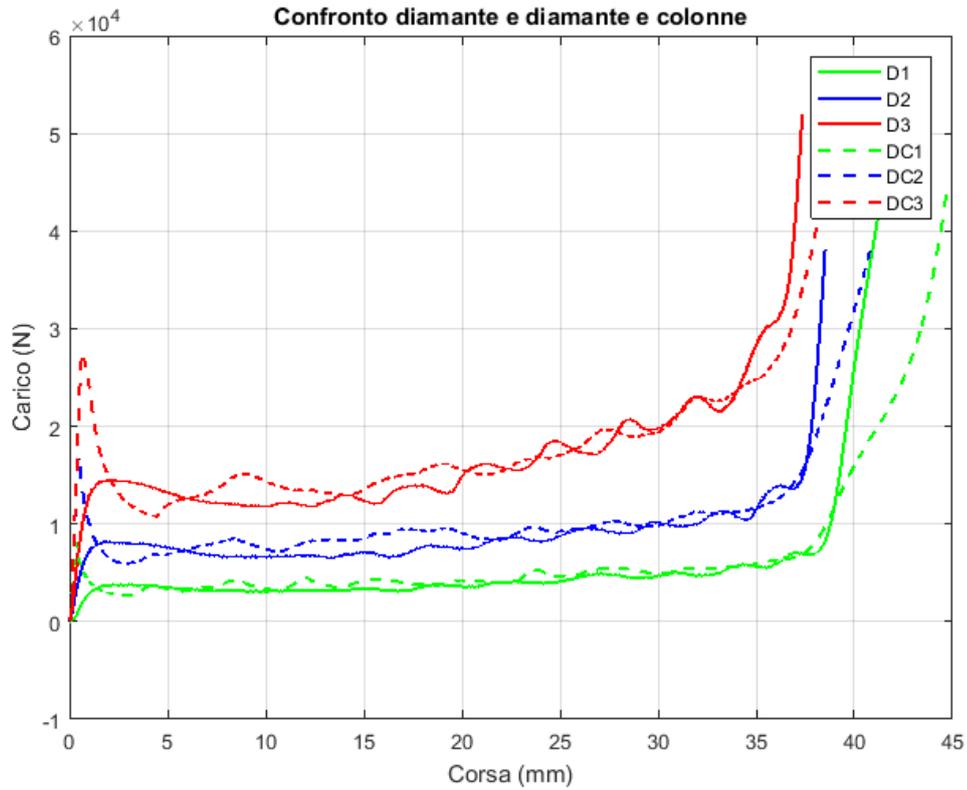


Figura 5.20 Confronto reticoli metallici

5.3 Reticoli metallici infiltrati

Vengono riportate qui le prove effettuate sui provini metallici infiltrati. Per svolgere un'analisi completa e poter fare dei confronti sono state infiltrate le tipologie di reticolo già analizzate in precedenza con gomma di due durezza diverse: Shore A 60 e Shore A 30. Nella Tabella 5.9 è possibile osservare tutti provini infiltrati e le rispettive caratteristiche.

Tabella 5.9 Provini infiltrati

Provino	Cella	ρ_{rel} reticolo [%]	Durezza gomma ShA
D1S6	Diamante	5	60
D1S3	Diamante	5	30
D2S6	Diamante	7.5	60
D2S3	Diamante	7.5	30
D3S6	Diamante	10	60
D3S3	Diamante	10	30
DC1S6	Diamante e colonne	5	60
DC1S3	Diamante e colonne	5	30
DC2S6	Diamante e colonne	7.5	60
DC2S3	Diamante e colonne	7.5	30
DC3S6	Diamante e colonne	10	60
DC3S3	Diamante e colonne	10	30

In seguito ai risultati ottenuti si è deciso di suddividere l'analisi in funzione della durezza della gomma infiltrata, in quanto si è riscontrato che a parità di durezza della gomma si osservano modalità di cedimento simili.

5.3.1 Reticoli infiltrati con gomma Shore A 60

Osservato che le modalità di cedimento per i provini infiltrati con questa durezza di gomma sono le stesse per tutte le densità relative e per entrambe le tipologie di reticolo metallico si è scelto di riportare le immagini soltanto di una densità relativa per tipologia di reticolo, i dati relativi alle prove saranno invece riportati per tutti i provini analizzati.

Nella Figura 5.21 e nella Figura 5.22 è possibile osservare rispettivamente le immagini relative alla prova di compressione dei provini D1S6 e DC1S6.

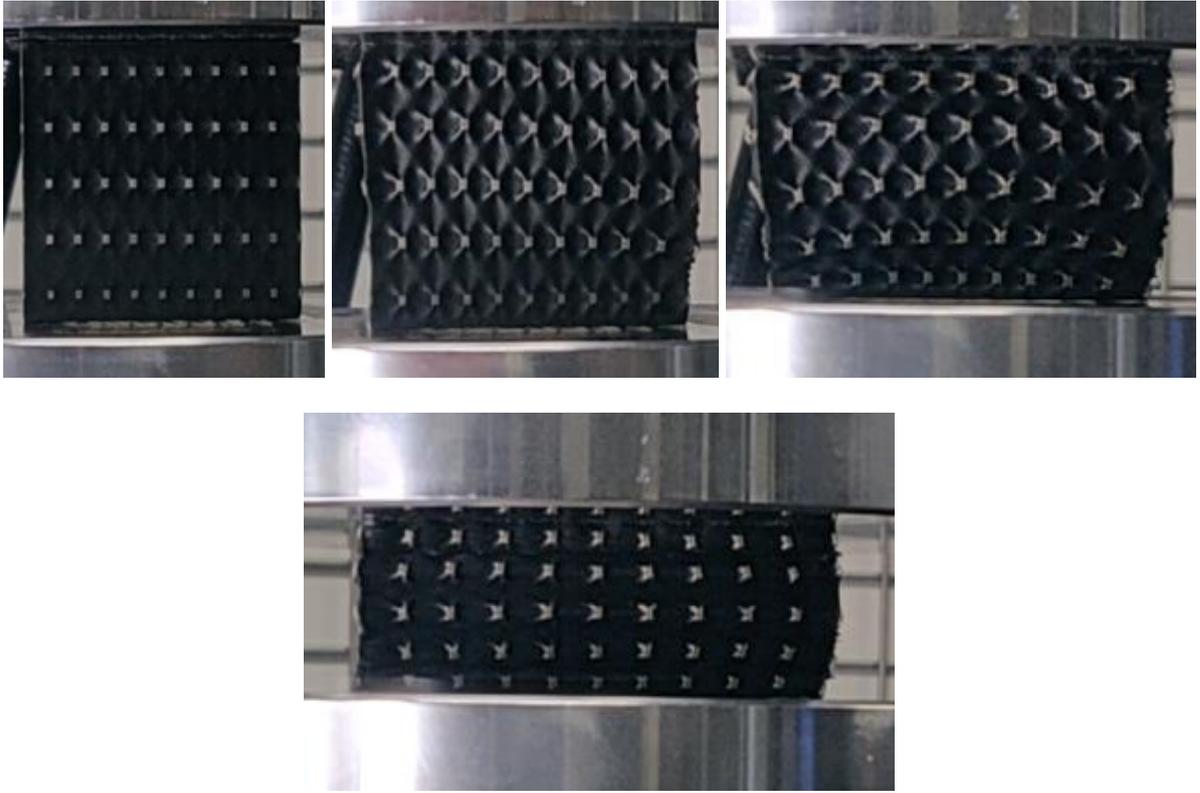


Figura 5.21 Prova di compressione provino D1S6

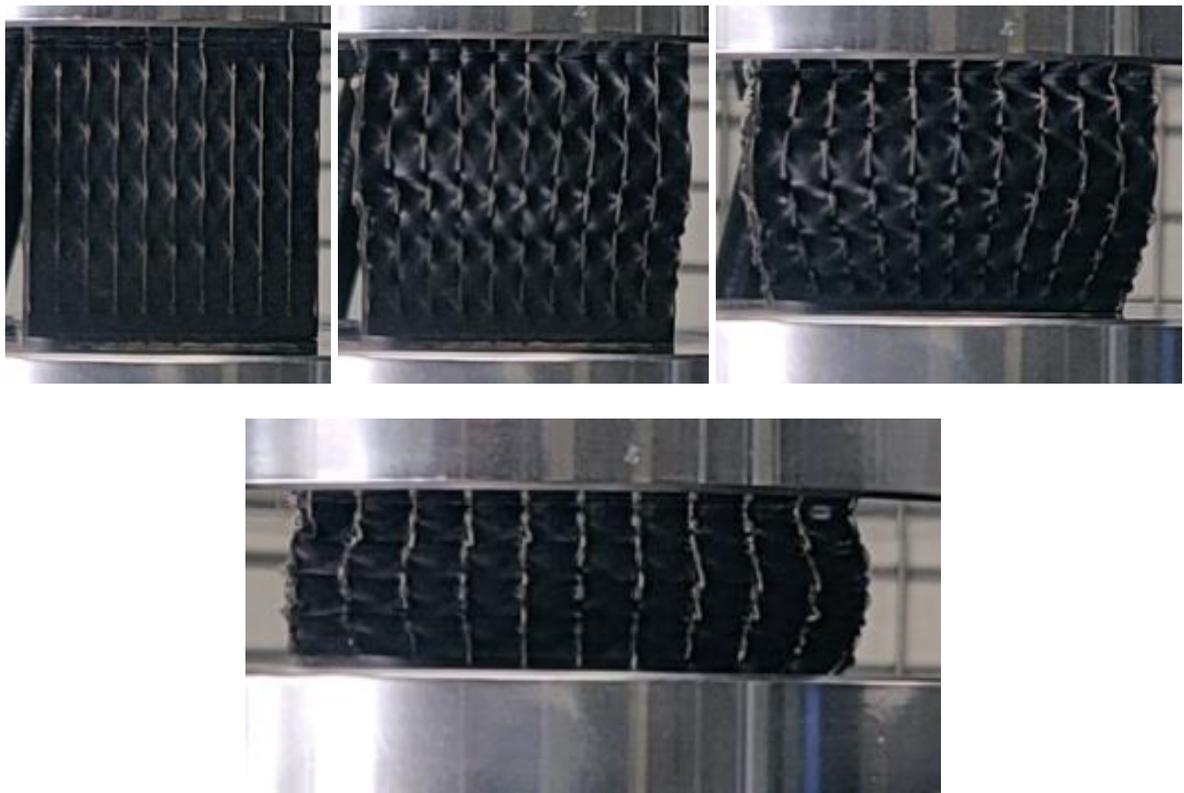


Figura 5.22 Prova di compressione provino DC1S6

Dalle immagini emerge che durante la compressione, per entrambe le tipologie di reticolo, si osserva un allargamento dello stesso. Solitamente il provino comincia ad allargarsi a partire da una delle due estremità per poi passare all'intero provino. Questo allargamento è dovuto alla compressione della gomma, la quale espandendosi modifica il modo in cui si deforma il reticolo. Nella Figura 5.23 è possibile osservare i due provini a fine compressione, si fa notare che i reticoli con bassa densità relativa allo scarico recuperano molto, aumentando la densità relativa invece questo fenomeno diminuisce. Ciò è dovuto alla combinazione tra resistenza del reticolo e durezza della gomma, con reticolo debole e gomma dura prevale la durezza della gomma, se il reticolo invece è più robusto non si ha più il ritorno della gomma che viene impedito dalla resistenza dello stesso.

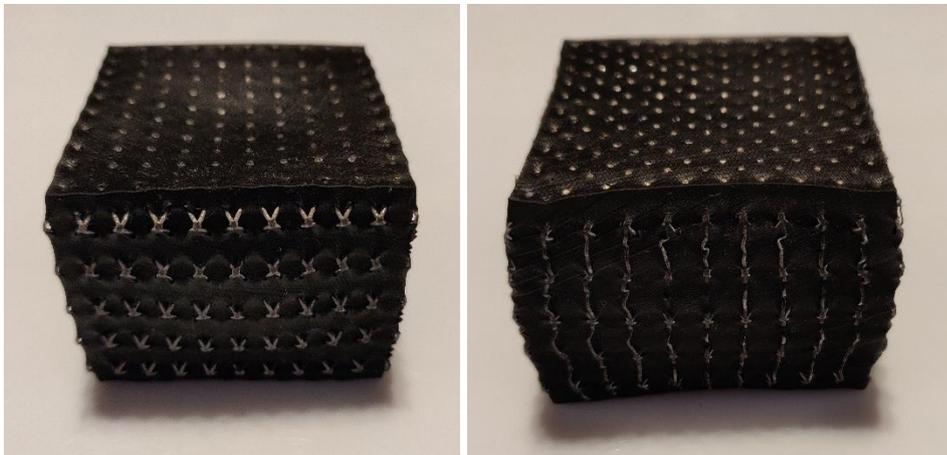


Figura 5.23 Provini D1S6 e DC1S6 dopo la compressione

Nella Figura 5.24 è possibile osservare il grafico ottenuto durante la prova di compressione per tutti i provini infiltrati con gomma Shore A 60.

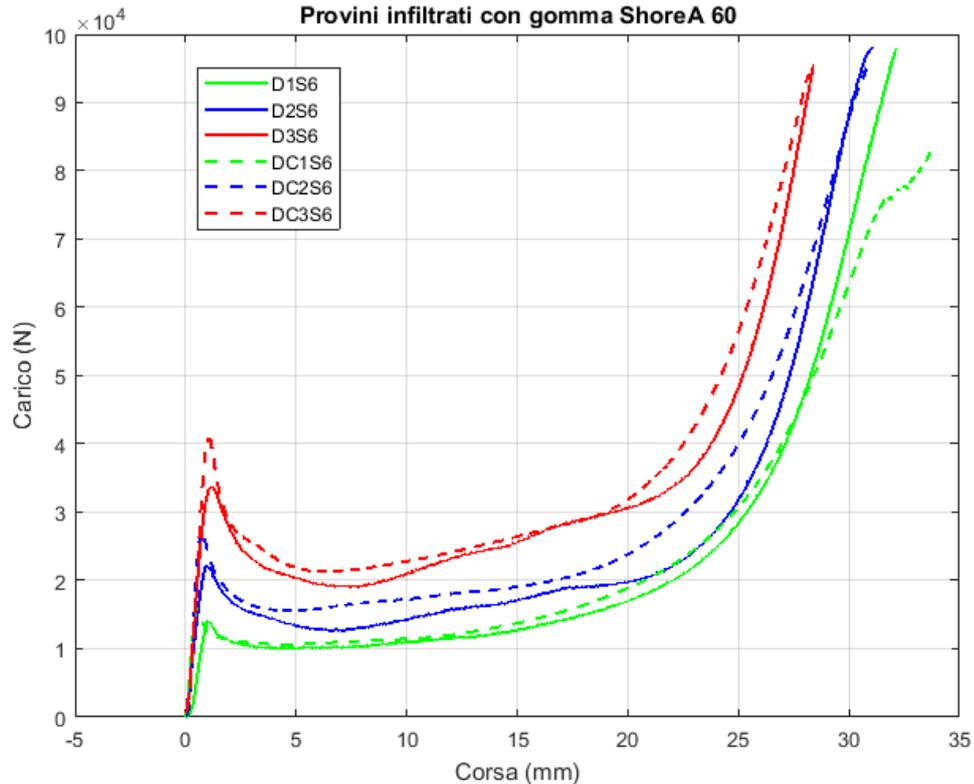


Figura 5.24 Prova di compressione provini infiltrati con gomma Shore A 60

Osservando il grafico si nota subito come con l'infiltrazione della gomma Shore A 60 compaia anche nei provini con la struttura a diamante un picco di carico. A parità di densità relativa teorica il picco raggiunto dai provini con struttura a diamante ha valori di carico inferiori rispetto a quello raggiunto dalla struttura a diamante e colonne e anche il modulo elastico equivalente è inferiore. Segue poi il tratto piano della curva che è più corto rispetto ai soli reticoli e che nella parte finale tende ad avere un andamento crescente, fino ad arrivare poi alla fase di densificazione dove le curve sono quasi verticali. Si nota come a parità di gomma infiltrata aumentando la densità relativa del reticolo metallico le curve presentino una resistenza maggiore lungo tutta la loro lunghezza e come la fase di densificazione inizi per valori di compressione inferiori. La prova è stata interrotta a valori di circa 95 kN in quanto il limite raggiungibile dalla macchina è di 100 kN.

Lungo il primo tratto lineare è stato possibile calcolare la pendenza della curva e il modulo elastico equivalente i quali sono riportati in Tabella 5.10. Per il calcolo del modulo

elastico equivalente è stata calcolata inizialmente la tensione, dividendo la forza applicata per l'area di base del provino, e successivamente la stessa è stata divisa per la deformazione.

Tabella 5.10 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente reticoli infiltrati con gomma Shore A 60

Provino	Pendenza curva [N/mm]	E [MPa]
D1S6	21131.63	422.63
D2S6	28985.00	579.70
D3S6	41218.34	824.67
DC1S6	39948.81	798.98
DC2S6	60837.83	1216.76
DC3S6	58773.58	1175.47

È stata inoltre calcolata l'energia assorbita durante la compressione per diversi valori della stessa, i risultati di tale calcolo sono riportati in Tabella 5.11.

Tabella 5.11 Energia assorbita reticoli infiltrati con gomma Shore A 60

Provino	Energia assorbita [J] per mm di compressione				
	5	10	15	20	25
D1S6	49.25	101.29	159.90	233.15	340.71
D2S6	77.04	143.02	222.02	315.55	435.36
D3S6	116.78	215.06	332.27	474.31	656.35
DC1S6	55.39	110.65	172.41	252.49	371.51
DC2S6	85.97	168.25	259.12	363.79	515.79
DC3S6	127.77	236.70	359.27	502.48	709.26

Osservando i risultati si nota che il modulo elastico equivalente è molto più elevato per i provini con la struttura a diamante e colonne mentre l'energia assorbita pur essendo sempre maggiore per la struttura a diamante e colonne risulta molto simile tra le due tipologie di struttura.

5.3.2 Reticoli infiltrati con gomma Shore A 30

Osservato che le modalità di cedimento per i provini infiltrati con questa durezza di gomma sono le stesse per tutte le densità relative e per entrambe le tipologie di reticolo metallico si è scelto di riportare le immagini soltanto di una prova, i dati saranno invece riportati per tutti i provini analizzati.

Nella Figura 5.25 è possibile osservare le foto relative alla prova di compressione del provino D2S3.

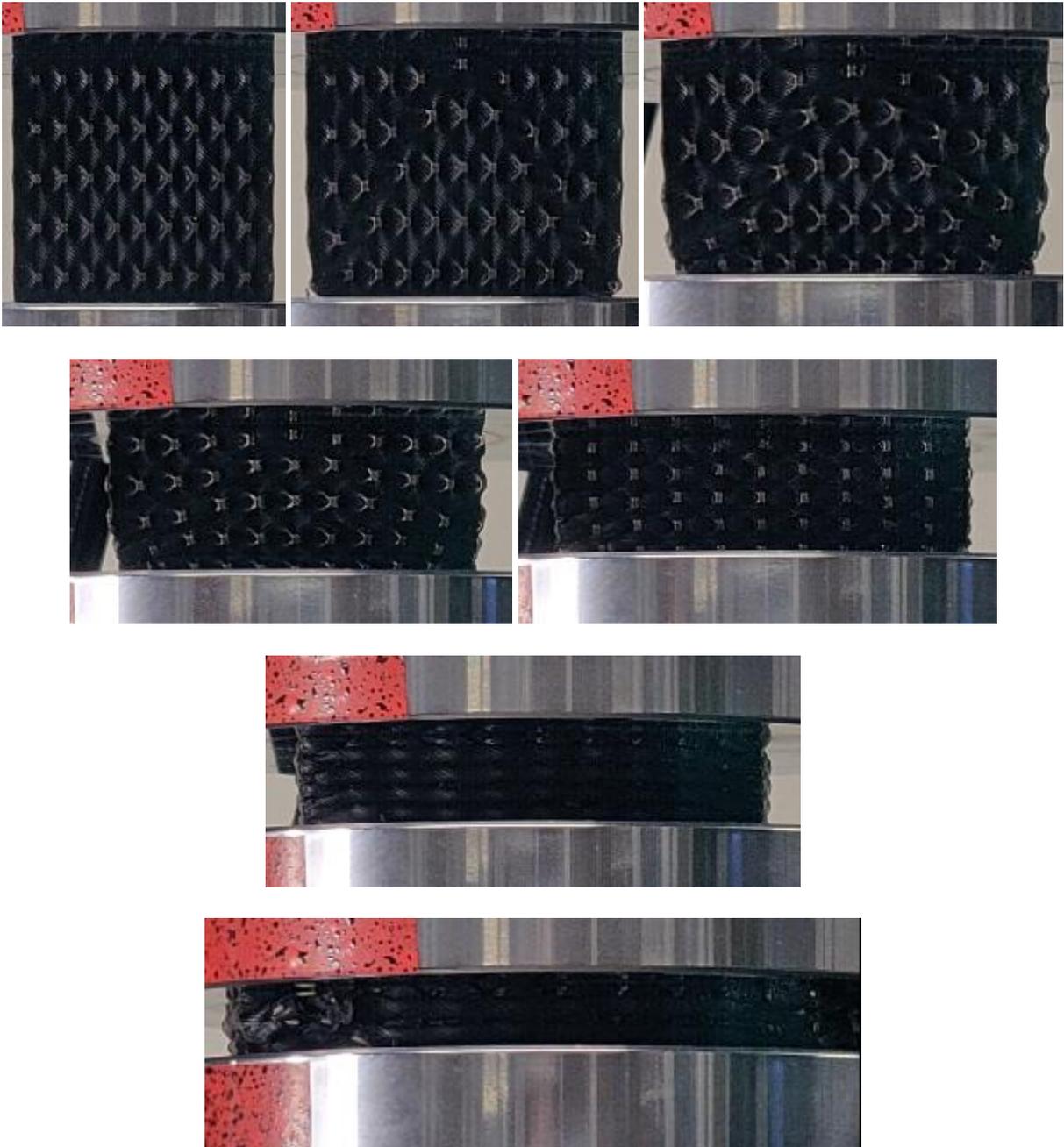


Figura 5.25 Prova di compressione provino D2S3

Dalle immagini precedenti si osserva come durante la compressione insorgano dei piani di scorrimento a 45°. Successivamente si ha un allargamento generale del provino fino al raggiungimento di un punto di compressione ordinata nel quale tutte le celle ritornano allineate con il loro piano di partenza. Proseguendo ancora con la compressione si osserva che la gomma continua a espandersi e il reticolo tende a contenerla. Si raggiunge infine un punto

in cui la forza di espansione della gomma è superiore alla resistenza a trazione del reticolo il quale inizia a spaccarsi.

Nella Figura 5.26 è possibile osservare il reticolo a fine compressione. Si nota come durante l'ultima fase di compressione la gomma abbia strappato il reticolo metallico forzandolo ad aprirsi verso l'esterno e, a compressione ultimata, il reticolo deformato non permetta alla gomma di ritornare alla condizione di partenza.

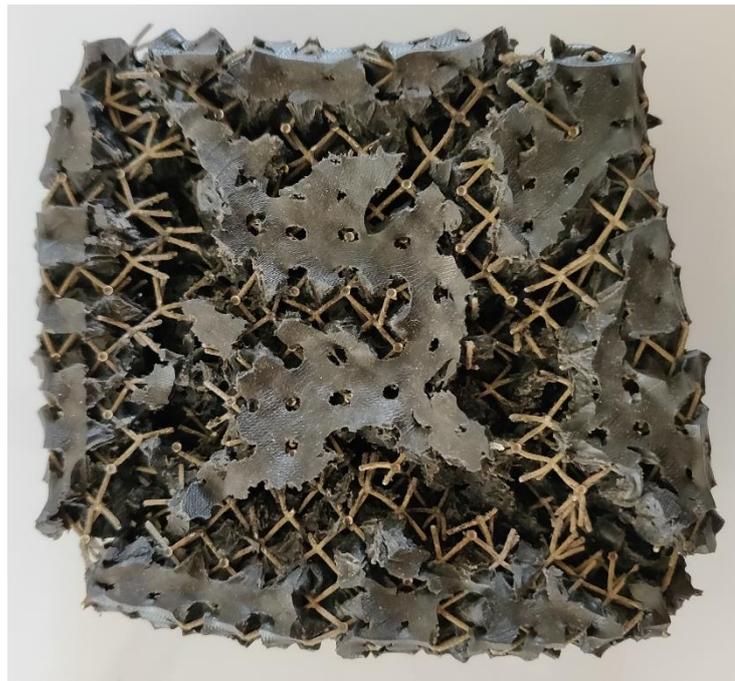


Figura 5.26 Provino D2S3 dopo la compressione

Nella Figura 5.27 è possibile osservare il grafico ottenuto durante la prova di compressione per tutti i provini infiltrati con gomma Shore A 30.

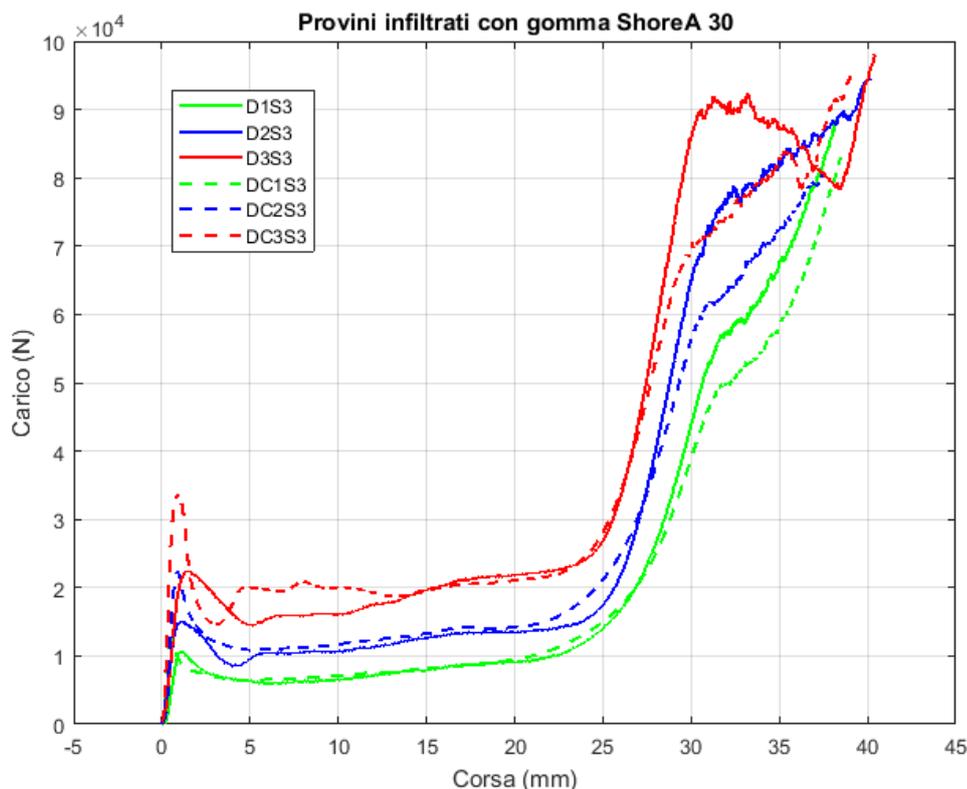


Figura 5.27 Prova di compressione provini infiltrati con gomma Shore A 30

Osservando il grafico si nota subito come con l'infiltrazione della gomma Shore A 30 compaia anche nei provini con la struttura a diamante un picco di tensione. A parità di densità relativa teorica il picco raggiunto dai provini con struttura a diamante ha valori di carico inferiori ed è più arrotondato rispetto a quello raggiunto dalla struttura a diamante e colonne, inoltre anche il modulo elastico equivalente è inferiore. Segue poi il tratto piano della curva che è più corto rispetto ai soli reticoli e che nella parte finale tende ad avere un andamento crescente, fino ad arrivare poi alla fase di densificazione dove le curve sono quasi verticali. Verso la fine di questa fase si nota un cambiamento di pendenza della curva la quale assume un andamento molto irregolare. Durante questo tratto si sta verificando la rottura a trazione del reticolo metallico a causa della troppa dilatazione della gomma. Si nota che a parità di gomma infiltrata, aumentando la densità relativa del reticolo metallico i provini presentano una resistenza maggiore lungo tutta la curva e la fase di densificazione inizia per valori di compressione inferiori. La prova è stata interrotta a valori di circa 95 kN in quanto il limite raggiungibile dalla macchina è di 100 kN.

Lungo il primo tratto lineare è stato possibile calcolare la pendenza della curva e il modulo elastico equivalente i quali sono riportati in Tabella 5.12. Per il calcolo del modulo elastico equivalente è stata calcolata inizialmente la tensione, dividendo la forza applicata per l'area di base del provino, e successivamente la stessa è stata divisa per la deformazione.

Tabella 5.12 Pendenza curva e Modulo elastico equivalente reticoli infiltrati con gomma Shore A 30

Provino	Pendenza curva [N/mm]	E [MPa]
D1S3	15984.79	319.70
D2S3	21366.1	427.32
D3S3	26183.99	523.68
DC1S3	36545.15	730.90
DC2S3	50609.67	1012.19
DC3S3	70357.14	1407.14

È stata inoltre calcolata l'energia assorbita durante la compressione per diversi valori della stessa, i risultati di tale calcolo sono riportati in Tabella 5.13.

Tabella 5.13 Energia assorbita reticoli infiltrati con gomma Shore A 30

Provino	Energia assorbita [J] per mm di compressione				
	5	10	15	20	25
D1S3	35.36	66.40	102.93	146.29	199.69
D2S3	53.38	105.70	163.62	230.00	302.53
D3S3	84.17	162.83	251.40	356.78	472.36
DC1S3	37.18	70.96	109.04	152.62	210.73
DC2S3	64.46	120.55	182.97	252.72	335.11
DC3S3	96.89	197.04	293.55	395.86	510.21

Osservando i risultati si nota che il modulo elastico equivalente è molto più elevato per i provini con la struttura a diamante e colonne mentre l'energia assorbita pur essendo sempre maggiore per la struttura a diamante e colonne risulta molto simile tra le due tipologie di struttura.

5.3.3 Osservazioni

Confrontando le curve ottenute infiltrando i reticoli con la gomma di due durezze diverse (Figura 5.28) si nota come i provini infiltrati con gomma Shore A 60 abbiano un picco iniziale a tensione maggiore e meno arrotondato di quelli infiltrati con gomma Shore A 30. Si nota inoltre che a parità di densità relativa l'infiltrazione con gomma Shore A 60 trasla le curve verso l'alto conferendo una maggiore resistenza e un maggiore assorbimento di energia a parità di compressione. Nel tratto finale della prova si osserva come i provini infiltrati con gomma Shore A 30 presentino il tratto irregolare in cui avviene il cedimento del reticolo a trazione, questo tratto non è presente nei provini infiltrati con gomma Shore A 60 e probabilmente sarebbe stato visibile se avessimo potuto continuare la prova con carichi maggiori. Emerge inoltre che, tralasciando il picco di carico raggiunto nel primo tratto della curva, non è presente molta differenza tra reticoli a diamante e a diamante e colonne a parità di densità relativa e gomma infiltrata.

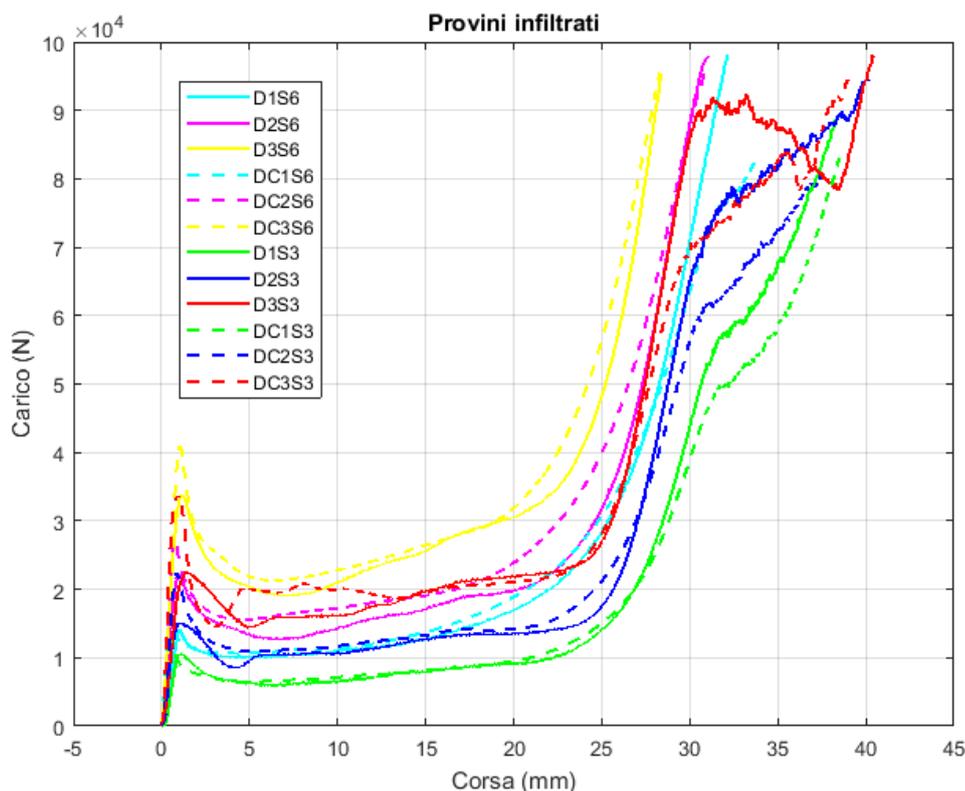


Figura 5.28 Prova di compressione provini infiltrati

Nella Figura 5.29 è possibile osservare in modo chiaro come l'infiltrazione delle gomme influisca sulla struttura a diamante, mentre in Figura 5.30 è possibile osservarlo sulla struttura a diamante e colonne. Questi due grafici sono riportati a titolo di esempio solo per una densità relativa in quanto, come visibile dai dati precedenti, l'andamento è lo stesso per tutte le varianti della stessa tipologia di reticolo.

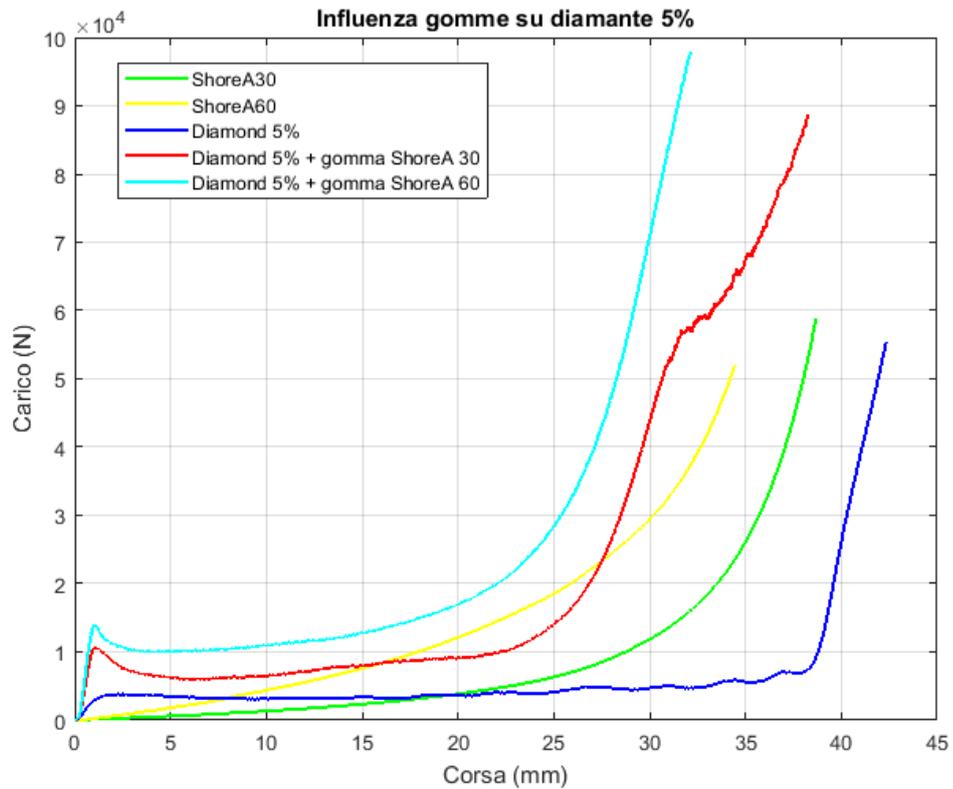


Figura 5.29 Influenza gomme su reticolo a diamante 5%

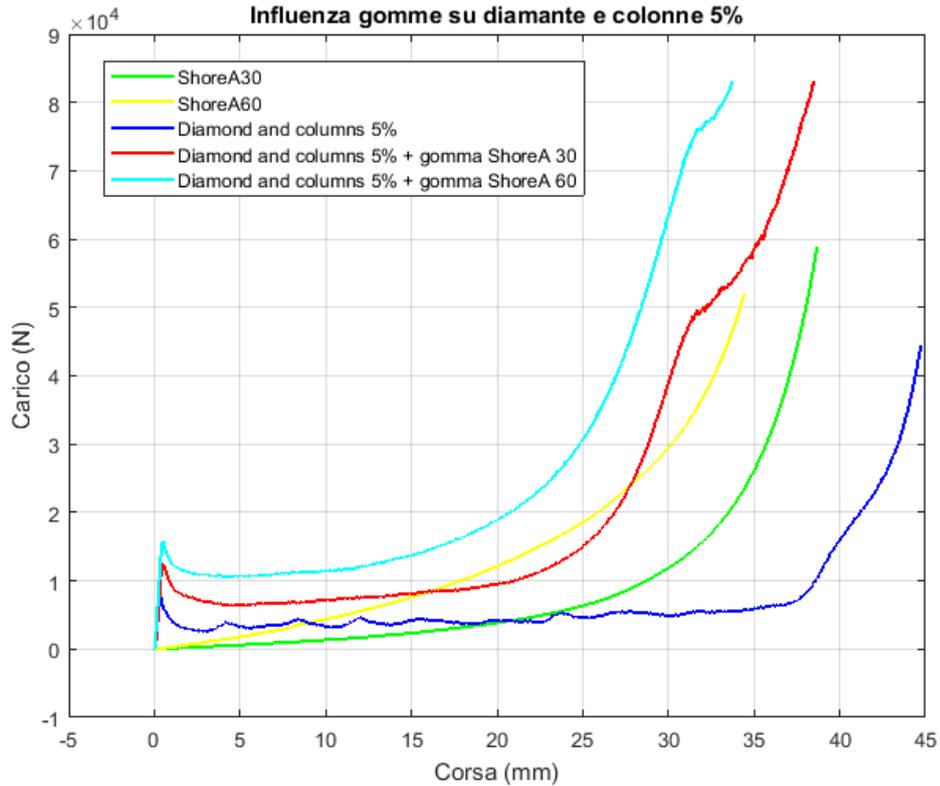


Figura 5.30 Influenza gomme su reticolo a diamante e colonne 5%

Si osserva come la gomma trasli verso l'alto la curva del reticolo metallico migliorandone le proprietà di assorbimento energetico, cosa particolarmente evidente nel tratto finale della curva dove prevale l'andamento della gomma. Emerge inoltre come l'aumento di energia assorbita della struttura infiltrata sia molto superiore alla somma delle aree sottese delle strutture base che la compongono, cosa particolarmente evidente nel tratto iniziale della curva.

6 Analisi dati sperimentali

Analizzando le curve sperimentali ottenute durante le prove di compressione sono stati ricavati dei dati caratteristici in modo da poter fare dei confronti e capire quali sono i parametri maggiormente influenti sulle proprietà meccaniche dei provini. In Tabella 6.1 sono riportati i dati sperimentali ricavati dalle curve.

Tabella 6.1 Dati sperimentali

Provino	Energia [J] per mm di compressione					Compres sione % a 80 kN	Modulo elastico equivalente [MPa]	Peso [g]
	5	10	15	20	25			
ShA 30	1.54	6.31	15.09	30.65	55.44	40.16	3.70	132
ShA 60	4.11	19.24	48.80	97.38	173.13	36.13	10.89	135
ShA 90	11.43	45.98	105.90	191.02	301.71	35.16	18.23	137
D1	15.81	32	48.01	65.23	84.7	-	73.36	44
D2	35.76	70.32	104.08	140.28	181.44	39.8	183.12	67
D3	63.34	124.65	186.01	252.50	334.10	38.39	295	91
DC1	17.93	35.84	54.71	74.87	96.99	-	726.79	40
DC2	37.87	76.85	116.82	163.06	207.83	-	972.59	60
DC3	72.19	140.71	207.74	283.54	363.46	-	1091.30	81
D1S3	35.36	66.40	102.93	146.29	199.69	37.16	319.70	170
D2S3	53.38	105.70	163.62	230.00	302.53	34.01	427.32	190
D3S3	84.17	162.83	251.40	356.78	472.36	29.52	523.68	210
DC1S3	37.18	70.96	109.04	152.62	210.73	38.15	730.90	166
DC2S3	64.46	120.55	182.97	252.72	335.11	37.34	1012.19	182
DC3S3	96.89	197.04	293.55	395.86	510.21	34.34	1407.14	202
D1S6	49.25	101.29	159.90	233.15	340.71	30.68	422.63	173

D2S6	77.04	143.02	222.02	315.55	435.36	29.43	579.70	192
D3S6	116.78	215.06	332.27	474.31	656.35	27.50	824.67	211
DC1S6	55.39	110.65	172.41	252.49	371.51	33.19	798.98	169
DC2S6	85.97	168.25	259.12	363.79	515.79	29.35	1216.76	186
DC3S6	127.77	236.70	359.27	502.48	709.26	27.08	1175.47	204

6.1 Energia assorbita

Nella Figura 6.1 è visibile l'energia assorbita dalle varie tipologie di provino durante la compressione. Si osserva che i provini capaci di assorbire la maggiore quantità di energia sono quelli con la densità relativa del reticolo maggiore e la gomma con la durezza più elevata. Seguono poi i provini caratterizzati dal reticolo con la densità relativa maggiore e dalla gomma più morbida e subito dopo i provini caratterizzati dal reticolo con densità relativa intermedia e la gomma più rigida. Sono poi presenti i reticoli con densità relativa maggiore e nessuna gomma infiltrata a cui seguono a breve distanza tutte le altre prove effettuate. Si distinguono da questo blocco le tipologie di provino con densità relativa più bassa e nessuna gomma infiltrata in quanto presentano un assorbimento energetico molto basso. Si nota che a parità di gomma e densità relativa del reticolo metallico la differenza di struttura (diamante o diamante e colonne) ha poca influenza sulla capacità di assorbire energia del provino.

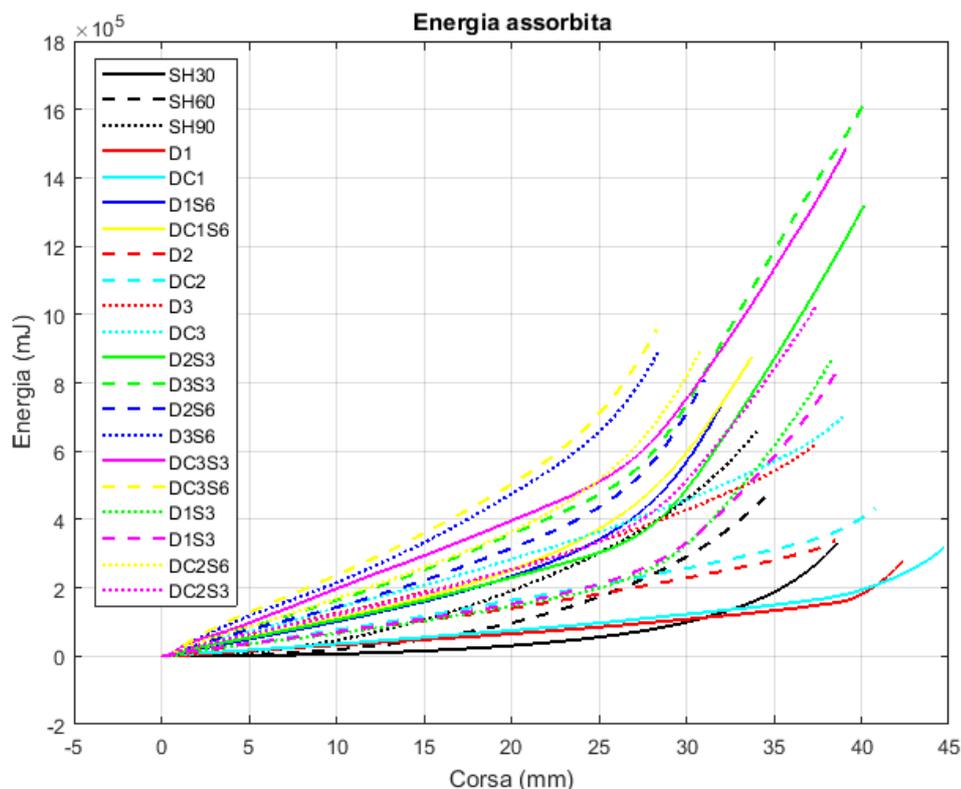


Figura 6.1 Energia assorbita in funzione della compressione

6.2 Influenza densità relativa del reticolo

Una delle prime analisi effettuate è stata verificare l'influenza della densità relativa del reticolo in funzione della gomma infiltrata e della tipologia di reticolo. Sono quindi stati fissati tipologia di reticolo e di infiltrazione (nessuna, Shore A 30 e Shore A 60) ed è stata fatta variare la densità relativa del reticolo. Come parametri di confronto si è deciso di analizzare la variazione di energia assorbita in corrispondenza di una compressione di 25 mm e il modulo elastico equivalente di quel provino. Sono quindi stati posti pari al 100% i valori di energia assorbita e modulo elastico equivalente relativi al provino con densità relativa del 5% per ogni categoria di infiltrazione e si è poi osservato il miglioramento ottenuto con l'aumento di densità relativa. In Figura 6.2 sono visibili i risultati di questa analisi.

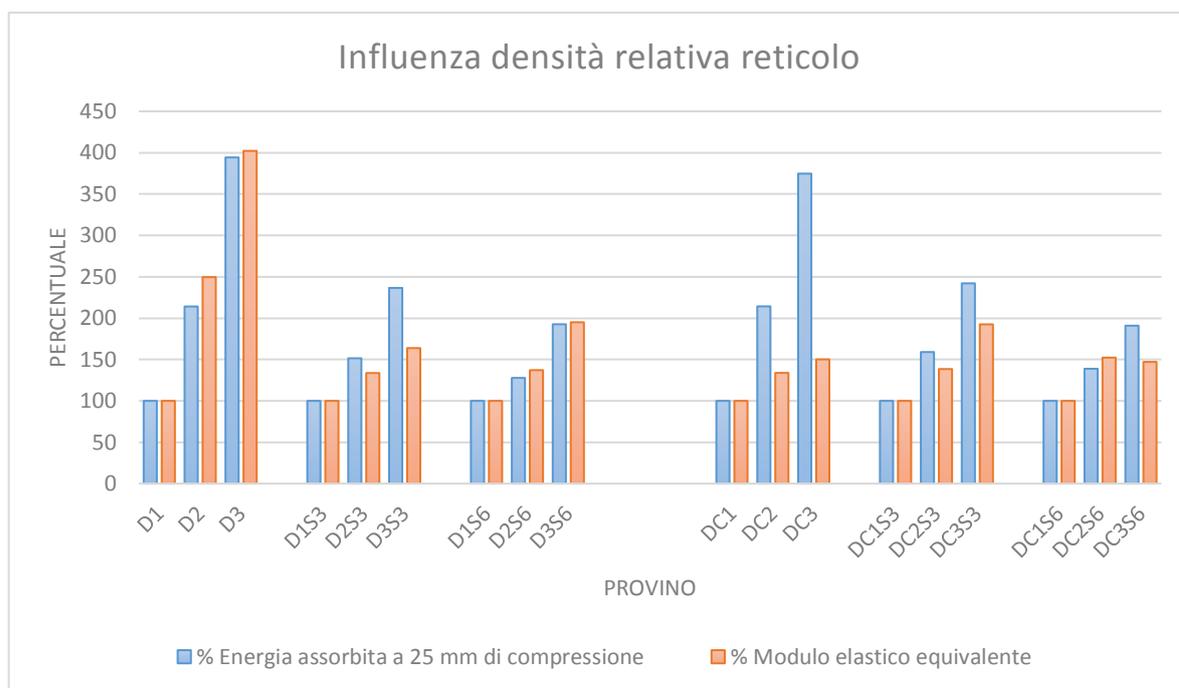


Figura 6.2 Influenza densità relativa del reticolo

Si nota che per entrambe le tipologie di reticolo l'aumento di densità relativa è molto più influente nei provini senza infiltrazione, mentre tende ad essere sempre meno significativo man mano che la durezza della gomma infiltrata aumenta. Dal punto di vista dell'aumento percentuale di energia assorbita in conseguenza all'aumento della densità relativa i reticoli con struttura a diamante e diamante e colonne sono molto simili indipendentemente dalla durezza della gomma infiltrata. Cambia invece drasticamente l'influenza che ha la variazione di densità relativa sul modulo elastico equivalente in funzione della struttura analizzata. Nella struttura a diamante senza infiltrazione si ha un aumento significativo del modulo elastico all'aumentare della densità relativa, cosa che invece non accade per la struttura a diamante e colonne. Anche analizzando i provini infiltrati con le varie durezza di gomma si nota come si abbia un aumento maggiore del modulo elastico equivalente aumentando la densità relativa del reticolo nei provini con struttura a diamante rispetto a quelli con struttura a diamante e colonne.

6.3 Influenza durezza gomma infiltrata

Si è analizzata l'influenza della durezza della gomma in funzione della densità relativa e della tipologia di reticolo. Come parametri di confronto si è deciso di analizzare la variazione di energia assorbita in corrispondenza di una compressione di 25 mm e il modulo elastico equivalente di quel provino. Sono quindi stati posti pari al 100% i valori di energia assorbita e modulo elastico relativi ai provini senza infiltrazione per tutte le percentuali di densità relativa in modo da analizzare quanto influente fosse l'infiltrazione di diverse durezza di gomma. In Figura 6.3 sono visibili i risultati di questa analisi.

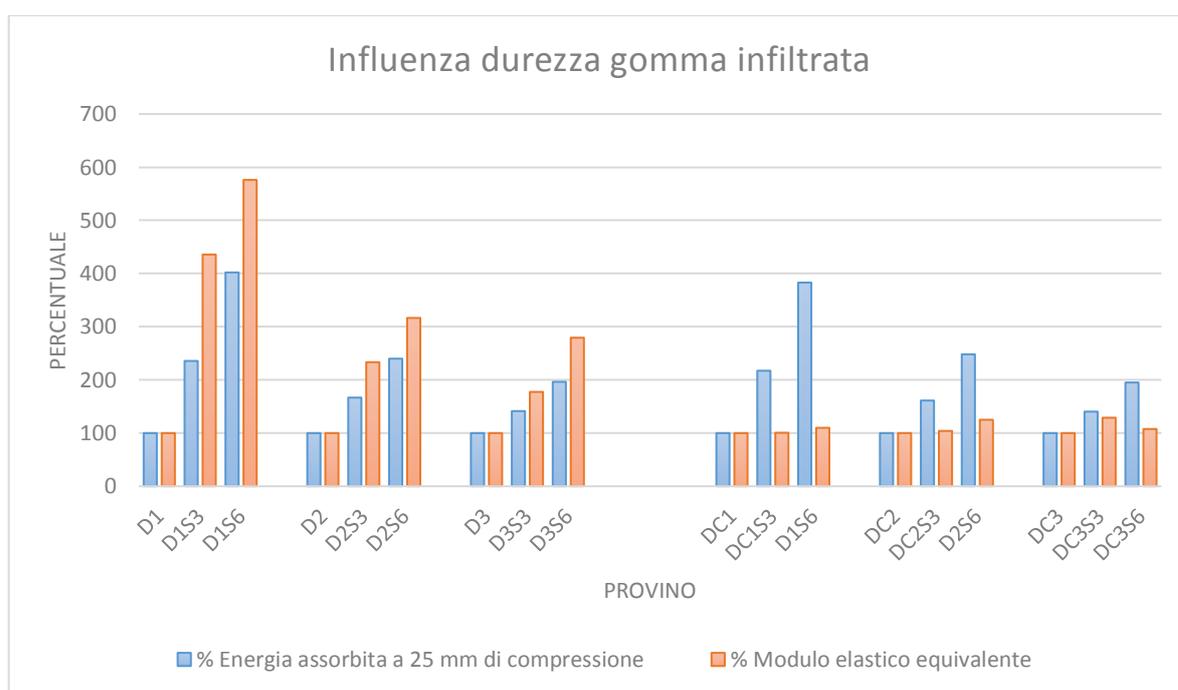


Figura 6.3 Influenza della durezza della gomma infiltrata

Si nota che per entrambe le tipologie di reticolo l'infiltrazione della gomma accresce maggiormente l'energia assorbita dai reticoli con densità relativa inferiore. Nei reticoli con struttura a diamante l'infiltrazione della gomma ha l'effetto di aumentare notevolmente sia l'energia assorbita che il modulo elastico equivalente, effetto tanto più evidente quanto più la densità relativa del reticolo è bassa. Per quanto riguarda i reticoli a diamante e colonne si osserva come l'infiltrazione della gomma faccia aumentare l'energia assorbita dal reticolo di una quantità molto simile a quella osservata nei reticoli a diamante. Emerge però una

sostanziale differenza nell'effetto che l'infiltrazione della gomma ha sul modulo elastico equivalente delle due tipologie di struttura analizzate: mentre nella struttura a diamante esso produce un aumento sostanziale del modulo elastico equivalente nella struttura a diamante e colonne il suo effetto è quasi ininfluente.

6.4 Proprietà in funzione del peso

Nella Figura 6.4 è visibile il rapporto tra energia assorbita in corrispondenza di una compressione di 25 mm e il peso del provino. Si nota che i provini senza infiltrazione e in particolare quelli con struttura a diamante e colonne presentano il miglior rapporto Energia assorbita/peso. Tra i reticoli infiltrati si osserva che il rapporto Energia assorbita/peso migliora sia all'aumentare della densità relativa del reticolo che all'aumentare della durezza della gomma infiltrata. In particolare si ottiene un miglioramento maggiore aumentando la densità relativa del reticolo piuttosto che aumentando la durezza della gomma. Questi miglioramenti possono essere spiegati dal fatto che aumentando la densità relativa del reticolo l'energia assorbita aumenta in modo maggiore rispetto all'aumento di peso. Si osserva inoltre come il rapporto energia assorbita/peso sia molto simile tra le due tipologie di reticolo a parità di densità relativa e gomma infiltrata. Analizzando invece il caso delle sole gomme l'aumento di durezza comporta un miglioramento di tutte le proprietà delle stesse ma con un incremento di peso trascurabile.

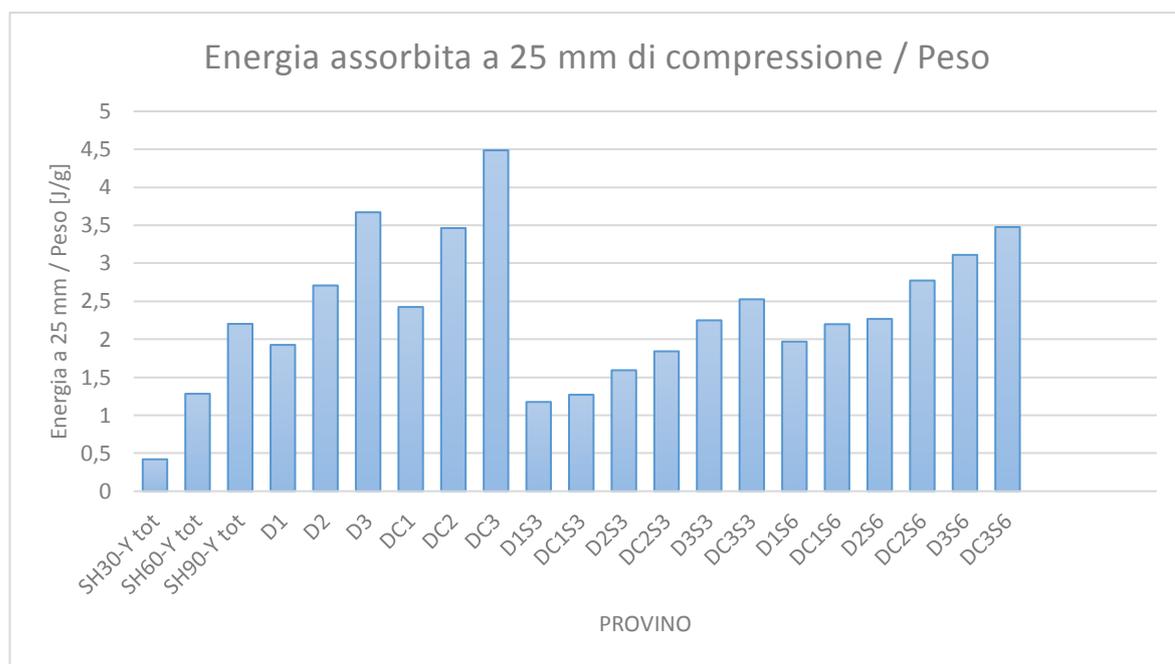


Figura 6.4 Energia assorbita a 25 mm di compressione / Peso

Nella Figura 6.5 è visibile il rapporto tra modulo elastico equivalente e peso del provino. Analizzando i provini senza infiltrazione si nota subito come i provini a diamante e colonne presentino un rapporto modulo elastico equivalente/peso molto maggiore rispetto ai provini a diamante. Si nota che aumentando la densità relativa dei provini nella struttura a diamante si ottiene un leggero aumento del rapporto analizzato. Per quanto riguarda invece la struttura a diamante e colonne aumentando la densità relativa si ha una diminuzione del rapporto analizzato, conseguenza del fatto che il modulo elastico equivalente non aumenta molto all'aumentare della densità relativa.

Analizzando i dati relativi ai provini infiltrati si osserva per la struttura a diamante un aumento del rapporto modulo elastico equivalente/peso sia all'aumentare della densità relativa del provino che all'aumentare della durezza della gomma infiltrata. Per quanto riguarda invece la struttura a diamante e colonne si osserva inaspettatamente un aumento del rapporto analizzato all'aumentare della densità relativa del reticolo, aumento che è quasi impercettibile aumentando invece la durezza della gomma. Si osserva inoltre che il rapporto modulo elastico equivalente/peso è molto differente tra le due tipologie di reticolo, il tutto a parità di densità relativa e gomma infiltrata.

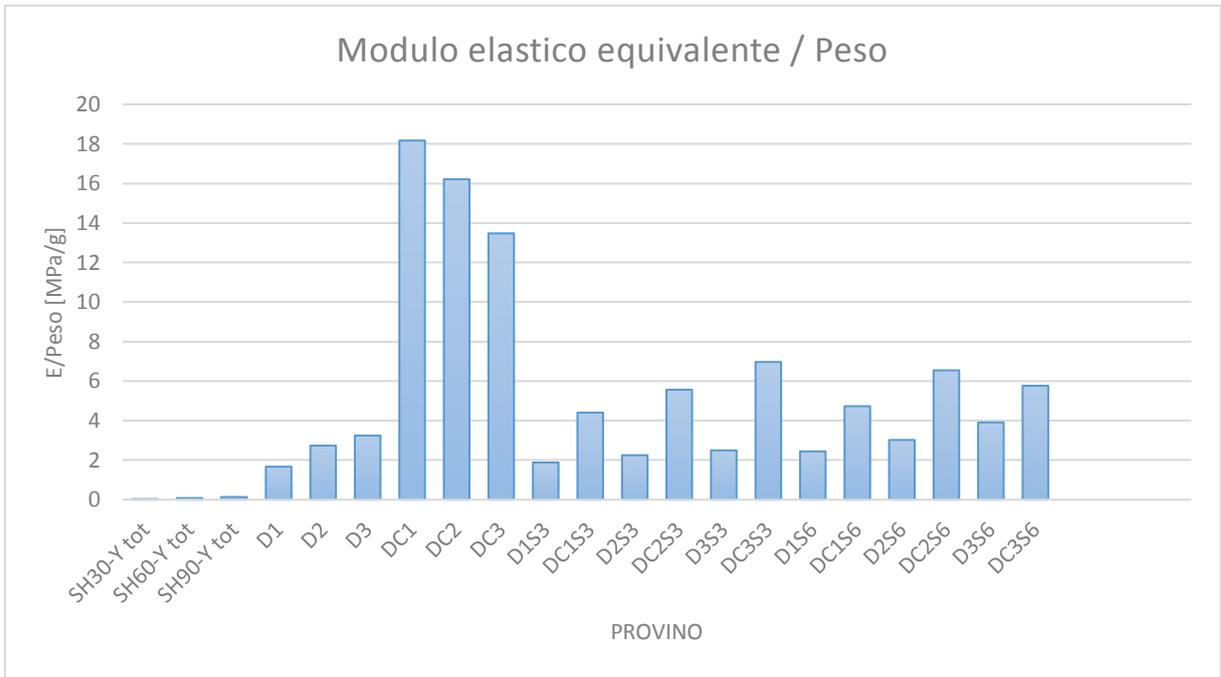


Figura 6.5 Modulo elastico equivalente/Peso

7 Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era la definizione di un processo tramite il quale fosse possibile realizzare delle strutture lattice infiltrate con del materiale polimerico. Al fine di raggiungere tale obiettivo si è partiti con un'analisi delle tipologie di strutture già esistenti e con una loro successiva ottimizzazione in funzione dei nostri obiettivi principali: possibilità di infiltrare tale struttura e capacità di assorbimento energetico della stessa. Si è poi passati alla stampa di queste strutture utilizzando la tecnologia Selective laser melting e quindi alla loro infiltrazione. Per questa fase si è scelto di utilizzare la tecnologia del vacuum casting grazie alla quale è possibile colare sotto vuoto una resina polimerica all'interno di uno stampo in silicone precedentemente realizzato tramite Stereolitografia. I reticoli sono stati infiltrati inserendoli come inserti all'interno dello stampo prima della colata.

Realizzati i provini, i quali sono progettati in modo da far variare dei parametri sia nel reticolo metallico che nella gomma, si è passati alle prove sperimentali di compressione tramite le quali è stato possibile ricavare le curve caratteristiche dei campioni prodotti. Sono poi state effettuate delle analisi sui dati ottenuti al fine di valutare le caratteristiche di cedimento, la resistenza e l'energia assorbita da ogni struttura. Si è poi passati ad analisi riguardo all'influenza dei vari parametri sulla capacità di assorbire energia e sul modulo elastico equivalente delle strutture realizzate. Infine sono state fatte delle considerazioni sul rapporto tra le principali proprietà delle strutture realizzate e il loro peso.

In futuro è possibile andare ad effettuare dei test di impatto su queste strutture al fine di confermare che in caso di impatto la loro resistenza aumenti. Si può procedere alla realizzazione di un modello matematico che permetta di simulare il comportamento di questo tipo di strutture in modo da rendere più agevole la progettazione in funzione dell'obiettivo imposto. Potrebbero inoltre effettuarsi ulteriori analisi in modo da trovare il rapporto ottimo tra resistenza della struttura metallica e durezza della gomma infiltrata, oltre che sviluppare

una tipologia di struttura più adatta per questo tipo di applicazioni che renda quindi l'infiltrazione molto efficace.

8 Bibliografia

- [1] C. Ferro, S. Varetti, G. De Pasquale e P. Maggiore, «Lattice structured impact absorber with embedded anti-icing system for aircraft wings fabricated with additive SLM process,» *Materials today communications*, pp. 185-189, 2018.
- [2] G. De Pasquale e A. Tagliaferri, «Modeling and validation of structural and energetic properties of AM lattices for aircraft anti-icing systems,» *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers - Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019.
- [3] F. Tamburrino, S. Graziosi e M. Bordegoni, «The design process of additively manufactured mesoscale lattice structures: A review,» *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2018.
- [4] M. F. Ashby, T. Evans, N. A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley e L. Gibson, «Metal Foams: A Design Guide,» *Butterworth-Heinemann*, 2000.
- [5] G. De Pasquale, M. Montemurro, A. Catapano, G. Bertolino e L. Revelli, «Cellular structures from additive process: design, homogenization and experimental validation,» *Structural integrity procedia*, 2018.
- [6] G. De Pasquale, F. Luceri e M. Riccio, «Experimental characterization of SLM and EBM cubic lattice structures for lightweight applications,» *Experimental mechanics*, pp. 469-482, 2019.
- [7] D. J. Sypeck, «Cellular truss core Sandwich Structures».

- [8] L. Iuliano, «Appunti del corso "Tecniche di fabbricazione additiva",» 2019.
- [9] G. De Pasquale, F. Luceri e M. Riccio, «Experimental evaluation of selective laser melting process for optimized lattice structures,» *Proc. of the institution of mechanical engineers - Part E: Journal of process Mechanical Engineering*, 2019.
- [10] G. De Pasquale e F. Luceri, «Experimental validation of Ti6Al4V bio-inspired cellular structures from additive manufacturing process,» *Materials Today Proceedings*, pp. 566-571, 2019.
- [11] [Online]. Available: <http://www.researchgate.net>.
- [12] «Custom part net,» [Online]. Available: <https://www.custompartnet.com/>.
- [13] Al-Hariri, Leonhardt, Nowotarski, Magi e Chambliss, «Carbon Nanotubes and Graphene as Additives in 3D Printing».
- [14] Negi e S. Dhiman, «Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review,» 2013.
- [15] O. Rehme e C. Emmelmann, «Rapid manufacturing of lattice structures with selective laser melting,» *Proceeding of spie*, 2006.
- [16] M. Mazur, M. Leary, S. Sun, M. Vcelka, D. Shidid e M. Brandt, «Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting,» *Internationa Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016.
- [17] M. Zhao, F. Liu, G. Fu, D. Z. Zhang, T. Zhang e H. Zhou, «Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures With Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM,» *Materials*, 2018.

- [18] O. Al-Ketan, R. Rowshan, A. N. Palazotto e R. K. A. Al-Rub, «On mechanical properties of cellular steel solids with shell-like periodic architectures fabricated by selective laser sintering,» *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2019.
- [19] A. J. Turner, M. A. Rifaie, A. Mian e R. Srinivasan, «Low-Velocity Impact Behaviour of Sandwich Structures with Additively Manufactured Polymer Lattice Cores,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018.
- [20] M. Smith, W. Cantwell, Z. Guan, S. Tsopanos, M. Theobald, G. Nurick e G. Langdon, «The quasi-static and blast response of steel lattice structures,» *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2010.
- [21] S. McKown, Y. Shen, W. Bookes, C. Sutcliffe, W. Cantwell, G. Langdon, G. Nurick e M. Theobald, «The quasi-static and blast response of lattice structures,» *International Journal of Impact Engineering*, 2007.
- [22] K. Ushijima, W. Cantwell, R. Mines, S. Tsopanos e M. Smith, «An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures,» *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2010.
- [23] M. Smith, Z. Guan e W. Cantwell, «Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique,» *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013.