POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

Tesi di Laurea Magistrale

Studio di strutture trabecolari realizzate in Additive Manufacturing



Relatore:

Prof. Mariangela Lombardi

Prof. Daniele Ugues

Candidato:

Enrico Virgillito

Sommario

1.	. Intr	oduzione e obbiettivi	4
2.	. La s	sfida tecnologica	5
3.	. Ma	teriali Cellulari e Tecnologia Additiva	7
	3.1.	Dal 2D al 3D	7
	3.2.	Tecnologia additiva	9
	3.3.	Le strutture trabecolari	11
	3.4.	L'Ottimizzazione Topologica e Materiali a Gradiente Funzionale	15
4.	Ma	teriali e metodi di analisi	18
	4.1.	AlSi10Mg e Trattamenti Termici	19
	4.2.	Prove meccaniche	21
	4.3.	Metodi di analisi Termografiche e con Video ad elevata frequenza di acquisizione	22
	4.4.	Metodo di analisi al Microscopio	23
5.	Risu	ultati dei test	25
	5.1.	Termografia e alta frequenza di acquisizione	25
	5.2.	Microscopia e Analisi delle sezioni	29
	5.3.	Prove di Compressione	40
	5.3.	.1. Prove a Temperatura ambiente	40
	5.3.	.2. Prove in Temperatura (200°C)	54
	5.3.	.3. Grafici di confronto	64
6.	Sim	ulazioni Numeriche	73
	6.1.	Piattaforma software	74
	6.2.	Pre-Processing	74
	6.2.	.1. La geometria studiata e la mesh	75
	6.2.	.2. Il modello di materiale	76
	6.3.	Processing e Post-Processing	78
7.	Cor	nclusioni e sviluppi futuri	82
R	ihliogra	afia	2/1

1. Introduzione e obbiettivi

Il seguente lavoro di tesi si prefigge il compito di analizzare e caratterizzare strutture trabecolari realizzate tramite la tecnica di Laser Powder bed fusion (LPBF). Questa specifica tecnica di Additive Manufacturing prevede la fusione selettiva di pattern su un letto di polvere tramite l'utilizzo di un laser. Il materiale scelto per l'analisi è AlSi10Mg, una lega di Alluminio utilizzata per la sua ottima saldabilità e per le caratteristiche di trasmissione del calore. Alla base dei campioni, la struttura reticolare è stata interrotta volontariamente in modo da inserire dei canali; questi sono stati posizionati sia parallelamente al lato del provino che a 45°. Ciò è stato fatto per analizzare in che modo una serpentina per lo scambio di calore possa influenzare il comportamento meccanico. L'inserimento dei canali nella struttura ha infatti lo scopo di realizzare un pannello in grado di espletare la doppia funzione di scambiatore di calore e pannello strutturale.

Nel primo capitolo verrà contestualizzato il significato di questo lavoro all'interno del progetto STAMP e di come la manifattura additiva stia cercando di aprirsi la strada nel mondo della progettazione ingegneristica.

Nel secondo capitolo si analizzerà l'evoluzione delle strutture reticolari studiate nella storia dell'umanità, di come si sia passati da materiali 2D a 3D passando per i cosiddetti materiali 2,5D (strutture 3D costruite a partire da materiali bidimensionali). Verrà spiegata la specifica tecnica di AM¹ utilizzata, tramite la quale si sono potute sviluppare strutture prima impensabili. Infine, verrà dato un accenno sulle strutture a gradiente funzionale (FGM) e sull'ottimizzazione topologica.

Nel terzo capitolo verranno analizzati i materiali e i metodi di prova utilizzati per condurre questa indagine. Verranno mostrati macchinari, le normative di interesse e i motivi che hanno portato alla scelta di queste particolari tecniche.

Per poter valutare il comportamento della struttura è stato necessario uno studio sulle sezioni del provino. La letteratura scientifica tuttora discorda sulla valutazione dell'area effettiva su cui è caricata la forza durante la prova in strutture lattice, come quella studiate; infatti essendo strutture cave con vuoti controllati, la periodicità del reticolo permette di affermare che l'area sottoposta al carico varia in maniera periodica in funzione della posizione rispetto al centro della cella elementare. Per poter ottenere dei valori utili all'analisi si è quindi studiata la variazione di sezione, inizialmente sui CAD originali per poi passare a sezionare i provini in modo da valutare la corrispondenza di quanto analizzato.

Nel quarto capitolo si valuteranno i risultati dei test sperimentali, confrontando le diverse tecniche e le informazioni da essi ottenute. Ci si soffermerà soprattutto sulla variazione del comportamento meccanico a seguito dei diversi trattamenti termici valutati e di come il canale di raffreddamento dei provini abbia influenzato la rigidezza, il punto di snervamento (o il discostamento dalla proporzionalità) e l'assorbimento di energia volumico.

Nel quinto capitolo verrà invece presentato il solutore agli elementi finiti "Code_Aster", sviluppato da EDF per analisi termomeccaniche e usato per poter valutare il comportamento delle strutture. Tramite le simulazioni è stato possibile predire alcuni comportamenti peculiari di queste strutture, modelli inoltre validati da alcune evidenze scientifiche successive.

Infine, verranno esposte le conclusioni tratte da questo studio e si proporranno alcuni possibili sviluppi futuri per poter ampliare ulteriormente l'analisi di queste strutture.

4

¹ AM= Additive Manufacturing

2. La sfida tecnologica

Questo lavoro di tesi viene inquadrato all'interno del progetto regionale "STAMP". STAMP o Sviluppo Tecnologico dell'Additive Manufacturing in Piemonte (Figura 1) è un consorzio che nasce dalla collaborazione tra centri di ricerche, università e aziende con lo scopo di creare una rete di conoscenza nel territorio per l'AM.



Figura 1: consorzio STAMP.

Il progetto si divide in diversi rami che comprendo il miglioramento e la comprensione delle tecnologie attualmente in uso (WP4 - SVILUPPO TECNOLOGIA POWDER BED), lo sviluppo e l'ottimizzazione di nuove tecniche (WP3 - SVILUPPO TECNOLOGIA DIRECT DEPOSITION), lo studio dei materiali, la caratterizzazione dei business case ecc.

In totale i rami di ricerca sono così divisi:

- WP0 MANAGEMENT
- WP1 DEFINIZIONE BUSINESS CASE
- WP2 RIPROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE COMPONENTI
- WP3 SVILUPPO TECNOLOGIA DIRECT DEPOSITION
- WP4 SVILUPPO TECNOLOGIA POWDER BED
- WP5 ICT A SUPPORTO DELLE TECNOLOGIE ADDITIVE
- WP6 CARATTERIZZAZIONE MATERIALI
- WP7 STANDARDIZZAZIONE
- WP8 DISSEMINAZIONE E SFRUTTAMENTO DEI RISULTATI

Attraverso il sito del consorzio è possibile seguire gli sviluppi del progetto e dei singoli campi di ricerca tramite gli aggiornamenti presenti sul portale [1].

Questa particolare attività di ricerca (inquadrata nell'ambito del WP2 - RIPROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE COMPONENTI) si prefigge l'obbiettivo di riuscire a riprogettare e realizzare, tramite la manifattura additiva, un pezzo che altrimenti necessiterebbe di lunghi e dispendiosi passaggi per la sua creazione. Il manufatto di partenza è una struttura di supporto per motori, che quindi necessita sia di caratteristiche meccaniche che termiche adeguate alle temperature d'impiego. Attualmente il manufatto è realizzato con diverse operazioni:

- Ad un pannello di Alluminio viene incollata una struttura honeycomb (sempre in Alluminio);
- A questa base viene aggiunta, sempre tramite tecniche di incollaggio, una serpentina;
- Viene infine incollato sopra un ulteriore pannello in Alluminio in modo da rendere la struttura stagna.

Lo strato di Honeycomb in Alluminio viene utilizzato sia per conferire sia rigidezza che leggerezza alla struttura mentre la serpentina sarà necessaria per poter conferire alla struttura anche il ruolo di scambiatore di calore (Figura 2).

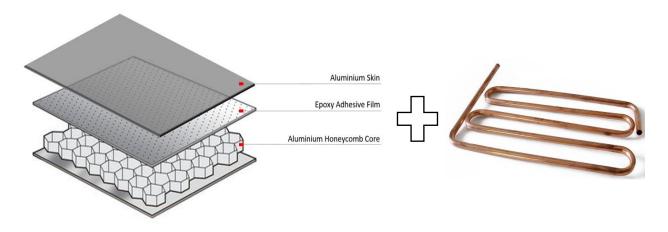


Figura 2: struttura honeycomb e serpentina.

Ovviamente essendo strutture incollate necessitano di un tempo di presa non indifferente (anche decine di ore) e di operatori adeguatamente preparati. Tramite la possibilità di produrre il manufatto in AM e un'opportuna riprogettazione dello stesso, è possibile ottenerlo con un unico processo produttivo. Questo permetterà di avere una struttura finale non incollata, quindi senza giunzioni e perciò con migliori proprietà di resistenza meccanica (struttura non può cedere per rottura del collante), e prodotta con un unico macchinario. Alla fine del processo produttivo sarà comunque necessario un trattamento termico per poter migliorare la microstruttura ed eliminare le tensioni residue dovute alla tecnica di riscaldamento a laser.

Nonostante la struttura honeycomb garantisca buone proprietà meccaniche e di leggerezza, si è optato come rinforzo interno per il manufatto l'inserimento di strutture trabecolari. Questo particolare tipo di struttura permette di ottenere proprietà meccaniche modificabili a piacere. Infatti, grazie alle modifiche e all'ottimizzazione topologica è possibile creare strutture a gradienti di proprietà, cioè in grado di garantire proprietà meccaniche (e non) diverse all'interno dello stesso manufatto per meglio adeguarsi alle esigenze progettuali.

3. Materiali Cellulari e Tecnologia Additiva

L'evoluzione dello studio delle strutture ha portato i progettisti ad ottimizzare le proprie costruzioni in funzione dell'utilizzo finale delle stesse. Questo ha portato negli anni a cercare nuove forme e geometrie che consentissero di ottenere maggiori prestazioni. In questo, la scoperta dei materiali cellulari e delle loro tecnologie di formatura è stato un passo essenziale per lo sviluppo della Scienza delle Costruzioni. I materiali cellulari sono generalmente definiti come materiali bifasici, in cui una fase solida coesiste con una fase gassosa, o porosità [2]. Com'è possibile notare da Figura 3 è possibile ottenere sia strutture periodiche che stocastiche, isotropiche o anisotropiche.

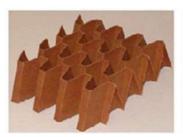








Figura 3: Materiali cellulari di diverso tipo: piegati, a nido d'ape, schiume o reticoli.

3.1. Dal 2D al 3D

Negli anni si è passati dallo studio di strutture bidimensionali (tutte quelle in cui una delle dimensioni risultasse trascurabile rispetto alle altre) all'analisi delle strutture 3D grazie all'evoluzione delle tecnologie di formatura disponibili. I primi studi su strutture quasi-3D (anche dette 2.5D) sono partiti da manufatti ottenuti tramite tecnologie di deformazione plastica. In questo senso l'arte orientale dell'Origami ha, da sempre, permesso di ottenere strutture di questo tipo; un esempio ne è [3] che studia il comportamento a compressione di strutture 2.5D ottenute da fogli di carta. Il tipo di sequenza di piegatura utilizzata crea differenti vincoli alla struttura che quindi risulta più o meno resistente. Questi studi sono stati utilizzati inoltre per l'ottenimento di elementi in cui la superficie specifica in funzione del volume fosse massima (pannelli solari pieghevoli per settore spaziale).

Questo tipo di manifattura non è l'unica che ha permesso di creare strutture periodiche e leggere; utilizzando metodi formatura e di perforazione della lamiera (Figura 4) è possibile realizzare strutture tetraedriche, piramidali o quasi-Kagome [4]. Si ottengono così densità relative anche

molto basse (tra 1.7 e 8%) ma che necessitano di trattamenti termici di ricottura per ottenere comportamenti plastici a causa del work-hardening (incrudimento).

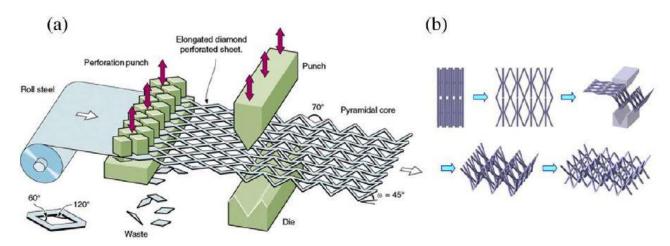


Figura 4: a) deformazione plastica e formatura b) processo per ottenere reticoli quasi-Kagome

Purtroppo, sono tecnologie limitanti in quanto:

- Permettono l'ottenimento di solamente alcuni tipi di reticoli;
- Necessitano di leghe altamente deformabili;
- Si possono ottenere strutture 2.5D ma mai 3D (a meno di utilizzare tecniche di giunzione)
- È impossibile realizzare manufatti con densità variabili e/o con strutture reticolari interne.

Un'altra tecnica convenzionale per l'ottenimento di reticoli è l'investment casting, o colata a cera persa. Questa tecnica permette di creare dei pattern tramite la formazione di uno stampo ceramico per fusione di un'anima sacrificale, in cera o polimero.

L'anima viene eliminata successivamente alla formazione dello stampo, per fusione o vaporizzazione, lasciando lo stampo libero per essere riempito con il metallo liquido [5]. È possibile realizzare strutture sandwich in cui l'interno è un reticolo ma rivestito esternamente con pannelli continui per aumentare la rigidezza del laminato. Nonostante ciò questa tecnologia possiede diversi difetti:

- Duttilità minore rispetto ai manufatti ottenuti per deformazione plastica;
- È difficile realizzare strutture completamente dense e con densità relativa inferiore al 2% (in quanto le dimensioni delle struts nello stampo diventano proibitivamente piccole);
- Processo costoso e lento;
- Limiti nella geometria in quanto è necessaria la formazione di uno stampo e la sua successiva eliminazione.

Per ottenere delle strutture reticolari possono essere utilizzate anche tecniche tessili, tramite l'intreccio di fibre metalliche o la giunzione di tubi (pieni o cavi). Purtroppo, queste tecniche non permettono l'ottenimento di geometrie complesse né di densità relative al di sotto del 10 %, per questo di rado vengono utilizzate.

Infine, è possibile realizzare delle schiume metalliche, strutture con porosità stocastica, che permettono di ottenere basse densità relative e ottime prestazioni meccaniche. In funzione del tipo di struttura interna alla schiuma, esse si dividono in:

- Schiume a celle aperte, cioè le cui porosità sono interconnesse tra di loro
- Schiume a cella chiusa, con porosità separate da pareti ben definite.

Un grande vantaggio delle schiume è la possibilità di creare manufatti anche con geometrie complesse, con una densità relativa variabile da 0.05 a 0.2 [6]; Il problema di utilizzare strutture stocastiche e non reticolari è la necessità di dover sovradimensionare il manufatto durante la progettazione. Questo è necessario poichè le irregolarità presenti potrebbero creare microzone di indebolimento causate da difetti o geometrie non conformi.

3.2. Tecnologia additiva

L'utilizzo di tecnologie di produzione di tipo additivo ha notevolmente semplificato le difficoltà di realizzazione di materiali cellulari periodici. La capacità di inserire materiale solo dove è effettivamente necessario si pone come base fondante di questa tipologia di tecniche produttive. Nonostante i primi studi nel settore siano stati effettuati su materiali polimerici [7] (e quindi provini prodotti tramite tecnologie sviluppate per questi ultimi), il mercato ha spinto per ottenere la possibilità di realizzare tali strutture in materiali metallici. Esistono differenti tecniche di AM che hanno la possibilità di realizzare manufatti di questo tipo. La tecnica utilizzata per effettuare il seguente studio è stata la Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Il processo può essere anche chiamato Selective Laser Melting poichè Direct Metal Laser Sintering è semplicemente il nome registrato dalla compagnia EOS. Esso prevede la produzione di manufatti metallici tramite la fusione di polveri metalliche distese su un letto tramite l'utilizzo di un raggio laser. La DMLS viene inserita nella categoria delle tecnologie "laser sintering" nonostante non si abbia un effettivo processo di sinterizzazione ma una fusione totale delle polveri che vengono trasformate quindi in un solido massivo omogeneo [8]. Il processo viene schematizzato come una deposizione di polveri sul letto di lavoro e la successiva fusione delle stesse in determinati pattern. La ripetizione di questi procedimenti permette di ottenere delle strutture tridimensionali a patto di fondere selettivamente le zone che faranno parte del manufatto finale. Uno schema del processo può essere visto in Figura 5.

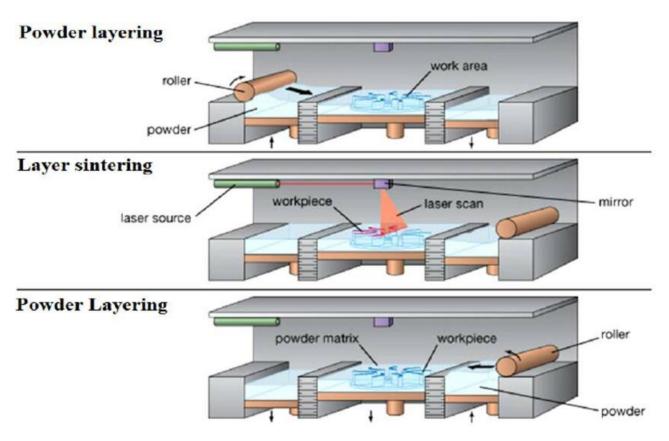


Figura 5: Schema di processo del DMLS[9].

Essendo un processo molto complesso, i fattori che influenzano il DMLS sono molteplici e il le proprietà del manufatto finale possono essere modificate da innumerevoli variabili. In generale le variabili vengono divise in due macrocategorie:

- Proprietà delle Polveri; ad esempio forma, dimensioni e distribuzione delle particelle, punto di fusione, conduttività termica ecc.
- Parametri di Processo; come potenza del laser, velocità di scan, spessore dei layer, temperatura del letto ecc.

Ognuna di queste variabili ha un'influenza ben definita sul processo [10] e il loro studio permette di ottimizzarle un funzione del risultato che si vuole ottenere. L'orientazione di crescita e la strategia di scansione sono state studiate in modo intensivo negli ultimi anni. La scanning strategy rappresenta la scelta delle modalità di passaggio del laser sul letto di polvere che, variando angolo, portano ad ottenere strati più o meno densi. Questo, insieme alla scelta dell'orientazione di crescita (cioè la scelta del piano lungo il quale si svilupperà il nostro pezzo), influisce non solo sulla densità e quindi sulle prestazioni meccaniche del pezzo, ma anche sulla coesione dei vari strati tra loro[11]. In Figura 6 è possibile notare delle tipiche microstrutture da additive sui piani X-Y e Z-Y rispettivamente. Inoltre, nella Figura 6.b si evidenzia che le microzone di fusione si sovrappongono in modo random creando una buona coesione nel materiale.

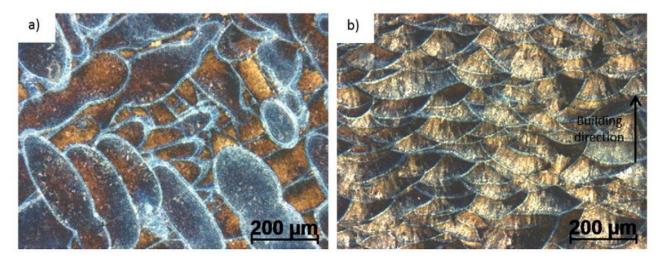


Figura 6: metallografie sui piani a) X-Y; b) Z-Y

La non corretta fusione di strati successivi potrebbe infatti portare il pezzo a rottura catastrofica tramite la decoesione di questi ultimi. Per ottimizzare questi parametri si scegli di operare solitamente con angoli di passata di 67.5° costruendo il pezzo lungo l'asse Z [12]. La possibilità di ottenere strutture reticolari viene anche sfruttata poter costruire elementi di supporto per zone con sbalzi a 45°; si utilizzano delle strutture di supporto cave (con densità relative fino all'8%) che permettono di ottenere pezzi di qualsiasi forma con supporti fragili, facili da rimuovere e con il minor spreco possibile di materiale e tempo[13].

3.3. Le strutture trabecolari

Il problema di utilizzare strutture stocastiche e non reticolari riguarda la necessità di dover sovradimensionare il manufatto durante la progettazione. Questo è necessario poiché le irregolarità presenti potrebbero creare microzone di indebolimento causate da difetti o geometrie non conformi. La scelta di utilizzare materiali altamente orientati quindi è dovuta sia alla loro maggiore resistenza specifica, rispetto ai materiali cellulari stocastici, che a una maggiore affidabilità.

Le strutture trabecolari possono quindi essere considerate come *manufatti a celle periodiche aperte*, in cui il reticolo è formato dalla connessione delle aste delle singole celle. Ogni reticolo è formato dalla ripetizione periodica di un elemento di base, la *Cella*, che rappresenta l'unità fondamentale, mostrata in Figura 7. Quando un reticolo viene deformato o troncato per poter essere inserito all'interno di una determinata geometria allora la struttura viene definita *forma confrome*[7].

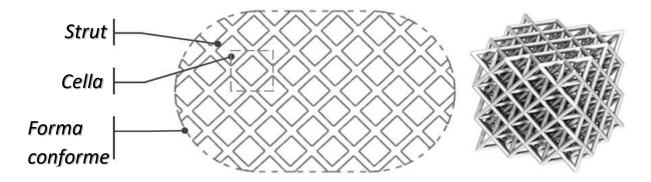


Figura 7: Definizione degli elementi delle strutture reticolari.

La cella può essere a sua volta formata da strutture più semplici chiamate *Strut* (aste) che si collegano tra di loro nei punti nodali del reticolo. La struttura può essere ulteriormente irrigidita inserendo uno strato solido esterno chiamato pelle (skin). La tipologia di rivestimento esterno può essere valutata in funzione dalle esigenze progettuali.

Le equazioni che descrivono le caratteristiche dei materiali cellulari sono definite dal modello di Gibson-Asbhy[2] come mostrato in Equazione 1 e Equazione 2.

$$\frac{E}{E_0} = C_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n$$

Equazione 1: Eq. di Gibson-Ashby per la rigidezza.

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = C_2 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^m$$

Equazione 2: Eq. di Gibson-Ashby per la tensione massima.

In cui E, σ e ρ sono rispettivamente il modulo, la resistenza a rottura e la densità del materiale cellulare mentre E_0 , σ_0 e ρ_0 sono le medesime caratteristiche del materiale bulk. C_1 e C_2 sono delle costanti caratteristiche di ogni materiale che per il AlSi10Mg (studiato in questo lavoro di tesi) sono rispettivamente 0.189 e 1.183 [14]. La n e m all'esponente variano in funzione del reticolo, sia esso di tipo periodico o statistico, e influenzano notevolmente il comportamento a rottura del materiale[15] com'è possibile notare in Figura 8:

- Se n=2 e m=1.5 il reticolo sarà di tipo statistico, con una rottura dominata dal piegamento (bending) delle strut del reticolo e conseguente rottura di tipo elastico (piccolo assorbimento energetico con rilascio istantaneo dell'energia accumulata);
- Se n=m=1 si parlerà di reticolo periodico, con una rottura dominata dalla deformazione (stretching) delle strut del reticolo e conseguente rottura di tipo plastico (grande assorbimento energetico con deformazione graduale del reticolo)[16].

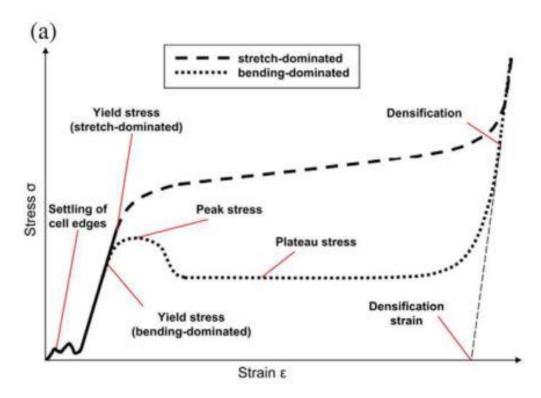


Figura 8: Confronto tra comportamenti a rottura: bending vs stretching[4].

Queste differenze sono i motivi principali dell'interesse scientifico verso questa sottocategoria di materiali cellulari, che permetto quindi di ottenere strutture 3 volte più resistenti[17].

In definitiva, il modulo elastico di un materiale cellulare è funzione della sua densità relativa e non lo si può di fatto considerare una caratteristica intrinseca del materiale (come ad esempio lo è il modulo di Young nei materiali densi)[18]. In tal senso, come si vedrà in seguito nei grafici delle caratteristiche sforzo-deformazione, questo ragionamento si potrà applicare sia al modulo elastico del materiale (comune a tutti i materiali) che al modulo elasto-plastico (plateau presente solo nei materiali cellulari).

In realtà non tutti i tipi di reticoli infatti si basano su aste incernierate. Esistono dei reticoli formati da una categoria particolare di superfici: *superfici minimali di triplice periodicità* o *TPMS*; queste ultime hanno la particolarità di avere una curvatura media pari a zero in ogni punto. I TPMS possono essere ulteriormente divisi in network phase e matrix phase, i primi contengono una zona vuota e una zona solida mentre i secondi comprendono una parete di materiale solida che connette due zone vuote non interconnesse[19]. In Figura 9 vengono mostrati alcuni dei diversi tipi di reticoli strut-base e TPMS sviluppati.

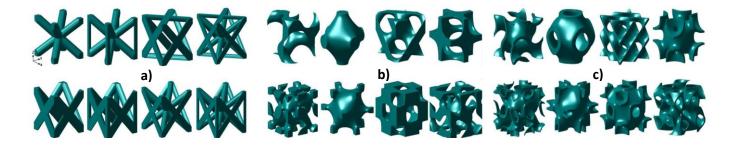


Figura 9: a) reticoli strut; b) reticoli TPMS network phase; c) reticoli TPMS matrix phase;

La caratteristica peculiare delle TPMS permette ai reticoli di questo tipo di essere particolarmente adeguati ai fini dell'additive manufacturing: infatti, non si hanno mai strutture a strapiombo con angoli minori di 40-45° rispetto al piano di crescita. È inoltre stato dimostrato come questi particolari reticoli, grazie alla loro omogenea distribuzione degli sforzi, abbiano una capacità di assorbimento energetico riferita al volume superiore a 3 volte quella dei reticoli di tipo strut-BCC[20].

Un'altra differenza caratteristica tra questi due tipi di reticoli è la correlazione tra la densità relativa ρ^* e la dimensione delle strut t. Nei reticoli TPMS, nell'intervallo $0.1 \le \rho^* \le 0.9$, esiste una relazione polinomiale che lega densità relativa e dimensione delle strut, quindi $\rho^*(t)$ [20] cosa non vera per i reticoli strut-based.

In questo studio verranno analizzate strutture rinforzate con celle di tipo BCC e BCC-Z, cioè con rinforzi lungo l'asse Z. Il secondo tipo di reticolo è stato utilizzato solo nelle celle esterne dei provini in modo da irrigidire la struttura lungo quell'asse. I reticoli studiati sono stati sviluppati con densità relativa uniforme lungo tutto il provino e con delle interruzioni lungo i canali di raffreddamento progettati. In Figura 10 si possono notare le due strutture di riferimento del seguente lavoro.

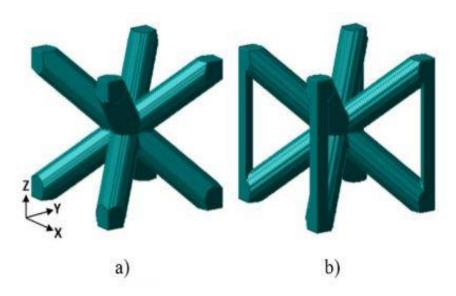


Figura 10: a) Cella BCC; b) Cella BCC-Z.

3.4. L'Ottimizzazione Topologica e Materiali a Gradiente Funzionale

È importante sottolineare come le strutture non debbano essere necessariamente a densità relativa costante; uno dei grandi vantaggi nella realizzazione di strutture in AM è proprio la possibilità di ottimizzare dei manufatti non solo alleggerendoli, ma anche rinforzandoli lì dove lo si ritiene necessario. L'Ottimizzazione Topologica in questo è stata la branca che ha maggiormente dato supporto all'additive.

Per *Ottimizzazione Topologica* si intende una tecnica numerica che permette di sintetizzare la forma di un componente ricercando i punti di massimo e minimo di un sistema matematico a volume definito. È una tecnica di calcolo iterativa che permette di definire delle zone di riempimento e di svuotamento del volume in funzione delle proprietà meccaniche ricercate localmente[21]. Questo avviene tramite tecniche di tassellamento 2D e 3D in grado di riconoscere punti in cui è necessario inserire un rinforzo (Figura 11). Le fasi dello studio vengono divise in:

- a) Componente sottoposto a sforzi ma omogeneo;
- b) Creazione del modello;
- c) Ottimizzazione;
- d) Realizzazione del componente ottimizzato.

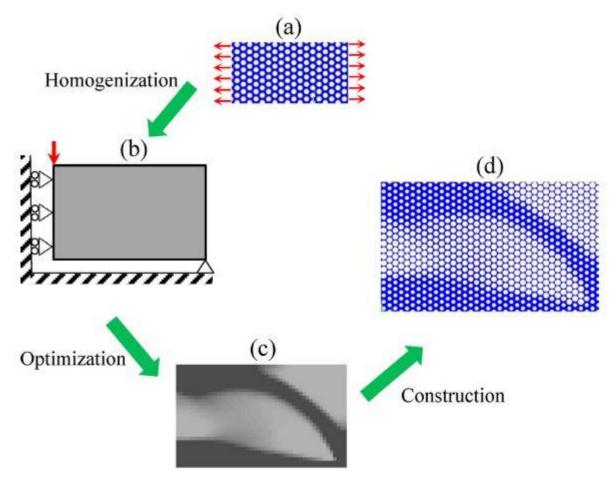


Figura 11: le fasi dello studio a)componente sottoposto a sforzi ma omogeneo; b) creazione del modello; c) ottimizzazione; d) realizzazione del componente ottimizzato[22].

Virtualmente si possono creare geometrie complesse a dismisura, vuote o con reticoli, stagne o meno. Il problema delle strutture stagne però è la necessità di svuotare la polvere intrappolata nelle zone interne al manufatto che non contribuisce alle prestazioni meccaniche dello stesso ma lo appesantisce inutilmente. Vengono quindi necessariamente inserite delle zone senza pelle di rinforzo (ove possibile), in modo da permettere l'eliminazione delle polveri a fine lavorazione.

Esistono differenti tipi algoritmi di ottimizzazione topologica che però generalmente afferiscono alla macroclasse degli AG², definiti come algoritmi autoimplementanti. Alcuni dei più usati sono:

- **PSO** o Particle Swarm Optimazation;
- *LSM* o Least-Square Minimazation.

Entrambi gli algoritmi generano risultati simili se lasciati iterare, ma il secondo permette di ottenere i medesimi risultati del secondo ma con una velocità di 1-2 ordini di grandezza maggiore[17]. L'utilizzo di queste tecniche ha permesso lo sviluppo di materiale con densità relative non omogenee, come mostrato in Figura 12. Questi materiali vengono definiti *Materiali a Gradiente Funzionale* o *FGM*³.

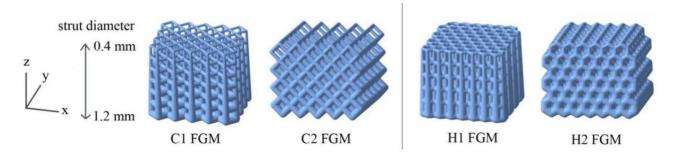


Figura 12: Strutture a gradiente funzionale di densità.

L'ottimizzazione delle strutture può avvenire in funzione di differenti variabili in quanto la funzione da minimizzare ne possiede innumerevoli; in genere si cerca di ottenere un compromesso tra le varie caratteristiche ricercate determinando un limite superiore e inferiore da non sforare[23]. Ottimizzando infatti in funzione di una sola variabile si rischia di ottenere strutture estremamente resistenti e leggere ma inaffidabili dal punto di vista della sicurezza.

_

² Algoritmi Genetici

³ Functionally Graded Materials

Lo studio dei reticoli FGM sta permettendo di migliorare ulteriormente la conoscenza di questo tipo di strutture e di ottenere prestazioni meccaniche migliori a parità di volume.

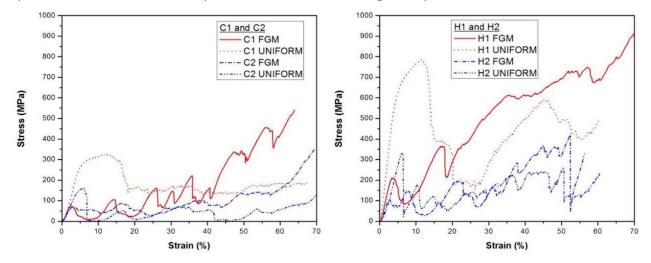


Figura 13: Caratteristiche sforzo-deformazione di strutture FGM e non a confronto.

Si pensi che a fronte di una diminuzione di rigidezza elastica e elasto-plastica, i reticoli FGM permettono di ottenere risposte delle strutture più costanti e con assorbimenti energetici migliori [18] come mostrato in Figura 13.

4. Materiali e metodi di analisi

Il materiale scelto per lo studio è stata una lega di alluminio particolarmente usata nell'additiva grazie alle sue caratteristiche meccano-termiche e di saldabilità, l'**AlSi10Mg.** Per effettuare le analisi sono state utilizzate tecniche di simulazione numerica, microscopia, termografia e infine prove di compressione per confermare il modello di rottura predetto.

I provini sono stati prodotti tramite il macchinario EOSINT M270 e progettati all'interno del progetto regionale STAMP. L'EOSINT M270 [24] permette di produrre componenti in metallo tramite la tecnologia "Direct Metal Laser-Sintering" (DMLS).

I provini sono stati prodotti su una piastra in Alluminio 6061 che, prima di ogni job, viene lavorata a macchina utensile per ottenere la superficie più liscia e pulita possibile. I provini sono stati inoltre muniti di supporti alla base, strutture non completamente densificate, atte a non produrre distorsioni durante la crescita e per permettere la facile estrazione del pezzo dalla piastra. Com'è possibile notare in Figura 14, essendo i supporti molto fragili spesso si rompono durante l'estrazione.

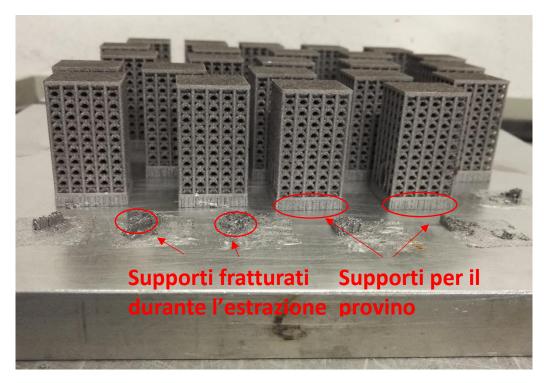


Figura 14: Provini cresciuti su piastra con supporti a vista.

Sono stati progettati 3 tipologie di provini (Figura 15) ai quali ci riferiremo con le sigle A, B e C:

- A = senza canale, tipologia standard che viene studiata come riferimento.
- B = canale dritto, tipologia con un canale passante parallelo a uno dei lati minori dei provini
- C = canale a 45°, tipologia con canale che taglia il provino a 45°, necessario per permettere ad una eventuale serpentina di diramarsi per tutta la struttura.

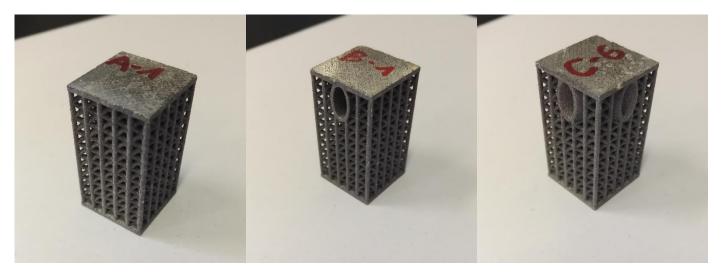


Figura 15: da sinistra a destra: Tipo A, Tipo B, Tipo C.

4.1. AlSi10Mg e Trattamenti Termici

AlSi10Mg è una lega di alluminio ottimizzata per i processi di additive e lavorata sotto forma di polveri fini. È una tipica lega da getto con ottima colabilità il che la rende perfetta per manufatti con spessori di parete sottili e geometrie complesse. Ha buona resistenza meccanica, durezza e resistenza alle sollecitazioni dinamiche, proprio per questo è utilizzata per parti sottoposte a grossi carichi. È inoltre utilizzata per applicazioni in cui è richiesta una combinazione di buone caratteristiche termiche e basso peso. I manufatti prodotti in AlSi10Mg possono essere lavorati con macchina utensile, saldati, rivestiti e sabbiati in modo da migliorarne le caratteristiche superficiali. La composizione è descritta in Tabella 1:

Elemento	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
% in peso	balance	9.0 - 11.0	0.55	0.05	0.45	0.2 - 0.45	0.05	0.10	0.05	0.05	0.15

Tabella 1: Composizione lega AlSi10Ma

La quantità di magnesio è abbastanza variabile e ne è accettata anche una variazione abbastanza importante. Zinco e titanio sono elementi che sono presenti in tracce perché già presenti nel sistema in cui si produce. Il Silicio è usato per rendere particolarmente fluido il bagno fuso.

Dal diagramma di stato Al-Si in Figura 16.a è possibile osservare che la percentuale in peso di Silicio si colloca abbondantemente oltre il limite di solubilità nell'alluminio. Le leghe Al-Si sono definite come leghe eutettiche quando il Si è nell'intervallo 11-13% in peso, ipoeutettiche se il Si è inferiore all'11% in peso e ipereutettiche quando il Si è superiore al 13% in peso. Il rafforzamento di queste leghe è generalmente possibile, attraverso l'aggiunta di altri elementi leganti, come Mg e Cu, che rendono le leghe Al-Si induribili mediante un trattamento termico o usando tecniche di solidificazione rapida, in cui in raffreddamento la velocità è superiore a $10^2 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$, che porta a un perfezionamento della microstruttura[12]. È possibile notare in Figura 16.b e Figura 16.c una sezione al microscopio ottico e particolare ingrandito al SEM.

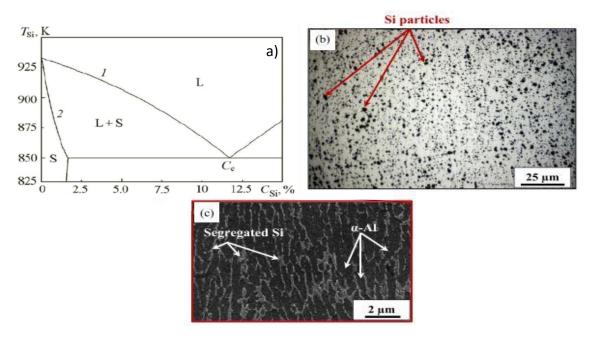


Figura 16: a) Diagramma di Stato Al-Si; b) sezione al microscopio ottico; c) particolare al SEM [25].

I componenti di fusione convenzionalmente prodotti in questo tipo di lega di alluminio sono spesso sottoposti a trattamento termico per migliorare le proprietà meccaniche, ad esempio utilizzando il ciclo T6 di ricottura, tempra e invecchiamento. Il processo di sinterizzazione laser è caratterizzato da una fusione e ri-solidificazione estremamente rapide. Ciò produce una condizione metallurgica e corrispondenti proprietà meccaniche simili a quella delle parti colate e trattate termicamente T6. Pertanto, tali trattamenti termici di tempra non sono raccomandati per le parti sinterizzate al laser, ma piuttosto per un ciclo di distensione delle sollecitazioni di 2 ore a 300 ° C[26].

Per poter confrontare l'effetto di entrambi i trattamenti termici, si sono studiati i provini sia asbuilt che sottoposti a T6 o a stress relieving. Il T6 è stato effettuato facendo un trattamento in soluzione a 530 ° C per 5 ore, seguito da raffreddamento con acqua, e quindi invecchiamento artificiale a 160 ° C per 12 ore mentre lo stress relieving è stato eseguito con riscaldamento a 300 ° C per 2 ore, come previsto da datasheet EOS.

Il problema del trattamento T6 è la distruzione dello stato metallurgico indotto dalla lavorazione additive. Infatti, al contrario dello stress relieving in cui quest'ultima è conservata, Il T6 permette di ottenere il ripristino della microstruttura as-cast, annullando i benefici della microstruttura da additive. Le parti SLM presentano generalmente una maggiore resistenza a trazione, con anisotropia che dipende dalla direzione di costruzione, rispetto alle controparti da getto. I valori di resistenza superiori che i componenti possiedono sono di solito spiegati adottando l'equazione di Hall-Petch come modello di riferimento, riportata in Equazione 3:

$$\sigma_0 = \sigma_i + k / d^{\frac{1}{2}}$$

Equazione 3: Equazione di Hall-Petch

L'equazione evidenzia che la resistenza del materiale (σ_0) è data dalla somma dello stress di frizione (σ_i) più un fattore k diviso l'inverso della radice quadrata della dimensione del grano (d). Le velocità di riscaldamento e raffreddamento locali, durante la fusione delle polveri, sono molto

elevate (10^3 - 10^8 K · s⁻¹) ,e ciò porta a un processo di solidificazione non di equilibrio, con lo sviluppo di microstrutture ultrafini[12].

4.2. Prove meccaniche

Sono state effettuate delle prove meccaniche per definire il comportamento dei provini in differenti condizioni d'utilizzo. I provini sono stati sottoposti a prove di compressione uniassiale normate secondo la ISO 13314:2011[27] e considerati come schiume metalliche. Le prove sono state eseguite tramite una macchina di prova Zwick Roell con cella di carico da 100 kN; le deformazioni sono state acquisite tramite lo spostamento della traversa e la prova eseguita in controllo di posizione. La macchina è equipaggiata con una camera termica che permette di effettuare prove in un range di temperature che va dai -40° C ai 250° C. Come da normativa sono state ottenute le seguenti misure:

- Gradente quasi-elastico, cioè la pendenza della curva nel tratto elastico;
- Resistenza di snervamento, o discostamento dalla proporzionalità;
- Energia all'unità di volume, cioè energia assorbita durante il processo di deformazione del provino.

Per evitare effetti di scivolamento del provino durante l'acquisizione dei dati, è stato applicato un precarico di 1 kN. Le prove sono state inizialmente effettuate a 0.4 mm/min e successivamente si è passati a 1 mm/min per poter meglio confrontare i risultati con studi specifici precedenti [28]. Il comportamento del materiale, all'aumentare della velocità di applicazione del carico, è di irrigidirsi e tendere alla fragilità. In Figura 17 sono mostrati i risultati di questa prova preliminare.

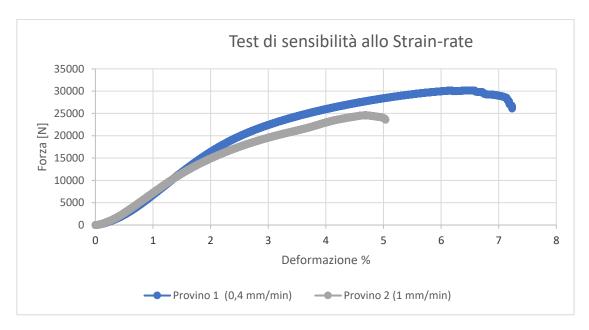


Figura 17: Sensibilità allo Strain-rate.

È possibile notare in Tabella 2 una diminuzione della deformazione massima percentuale e del picco di forza massima.

Test di sensibilità allo Strain-rate					
	provino 1	provino 2	Δ%		
velocità di prova (mm/min)	0,4	1	-		
Def max (%)	7,23	6,31	-12,7		
For max (N)	30172	24618	-18,4		

Tabella 2: Sensibilità allo strain-rate.

A seguito di questa prova preliminare si è deciso di optare per 1 mm/min in modo da ottenere risultati coerenti con la bibliografia di riferimento.

I provini studiati sono stati prima trattati come riassunto in Tabella 3:

Temperatur	a di prova (°C)	25	200
	As-Built (AS)	Α -	
Trattamento Termico	Stress- Relieving (SR)	A, B, C	А, В, С
	T6	В, С	В, С

Tabella 3: Variabili di prova.

I provini As-Built sono stati testati esclusivamente per la tipologia A poiché, a seguito del tipo di rottura (esplosione appena usciti dalla zona elastica), si sono ritenuti non tecnologicamente utili. Per poter valutare la risposta meccanica del componente, in tutte le sue condizioni di utilizzo, sono state effettuate sia prove a temperatura ambiente che prove a 200°C. La temperatura scelta non è casuale ma rispecchia le possibili condizioni di lavoro del manufatto finale. È stato inoltre valutato l'effetto dei trattamenti termici di stress-relieving e T6 in entrambi i casi di funzionamento. Il trattamento T6 è stato studiato solo con le tipologie B e C in quanto le si è ritenute le più critiche.

4.3. Metodi di analisi Termografiche e con Video ad elevata frequenza di acquisizione

Per poter comprende al meglio le modalità di frattura dei campioni, si sono utilizzate due tecnologie di analisi visiva delle prove:

• Termografia, in cui l'utilizzo del calore come mezzo d'indagine e la sua dissipazione durante la prova possono fornire informazioni sulla frattura.

• Video ad elevata frequenza di acquisizione, necessario per poter seguire una rottura in fase elastica e quindi estremamente rapida.

Le due tecniche però non sono facilmente accoppiabili in quanto la strumentazione di una rischia di compromettere le analisi dell'altra. Infatti, per la videocamera ad alta frequenza di acquisizione è necessario una fonte di illuminazione prossima ai campioni testati per migliorarne la definizione. Questo però rischia di surriscaldare i provini che quindi non mostrerebbero più correttamente lo sviluppo e dissipazione del calore durante la prova. Sono quindi state effettuate separatamente e per migliorare l'emissività del provino, i campioni testati con la termocamera sono stati dipinti di nero. In Figura 18 è possibile notare il setup di prova in entrambi i casi.



Figura 18: Setup di prova; a dx) con termocamera, a sx) con video a alta frequenza di acquisizione.

4.4. Metodo di analisi al Microscopio

Essendo le strutture trabecolari dei materiali porosi, si rende necessaria una valutazione delle sezioni dei provini per 2 principali motivi:

- Valutare la sezione utile del materiale, in modo da poter definire modulo di Young e le proprietà meccaniche del materiale;
- Valutare la precisione di stampa e la corretta produzione da .CAD ad oggetto reale.

In questo studio verranno valutati soltanto provini con la medesima densità relativa e con strut delle stesse dimensioni; lo studio delle sezioni è stato utilizzato in letteratura anche per comprendere in che modo la variazione dimensionale delle celle e delle strut influisca sulle densificazione del materiale e quindi del suo modulo e resistenza meccanica[5].

Per poter ottenere un valore teorico delle sezioni dei provini si è inizialmente studiato il modello CAD; ciò ha permesso di poter riscontrare le sezioni minime e massime efficaci delle varie tipologie di provini. La valutazione di queste aree è stata effettuata tramite la funzione "Valuta" [29] del software di progettazione "SolidWorks" tramite il quale erano state precedentemente ideate.

Sono stati utilizzati due differenti tipi di microscopi; un videomicroscopio, utile per analizzare provini con piani focali di interesse distanti tra loro e per ricostruire la geometria 3D di un pezzo, e uno strereomicroscopio, utile per analizzare le superfici di frattura dei provini. In realtà la maggior parte dei provini studiati è collassata per densificazione quindi con il compattamento dei piani

reticolari gli uni sugli altri. Questo ha permesso di analizzare le superfici di frattura esclusivamente dei provini fratturati in modo fragile o le superfici esterne dei provini compattati.

Nel videomicroscopio le immagini sono state acquisite sia in versione scatto singolo che con una sequenza di scatti definita "Multifocus"; senza tale tecnica sarebbe stato impossibile mettere a fuoco la cella elementare nella sua interezza, in quanto i piani focali della struttura si trovano a distanze differenti. Il Multifocus consiste nello scattare una sequenza di foto, in piani focali diversi, grazie al movimento automatico dell'ottica principale del microscopio. Impostando il numero di foto e la distanza lungo l'asse Z da percorrere, il programma "NES Leica" costruisce una foto completamente a fuoco tramite la sovrapposizione delle parti a fuoco di ognuna delle immagini scattate. Ovviamente minore sarà il tragitto da far effettuare al microscopio e minori saranno le foto da unificare, con una migliore qualità dell'immagine. Questo ha permesso anche di creare delle immagini tridimensionali delle superfici analizzate.

Per la ricostruzione 3D si sono utilizzati due tipi di ricostruzioni:

- Ricostruzione multifocus
- Ricostruzione a scala di colori, permette di enfatizzare la differente profondità dei piani osservati dal microscopio come in Figura 19.

Per esempio:

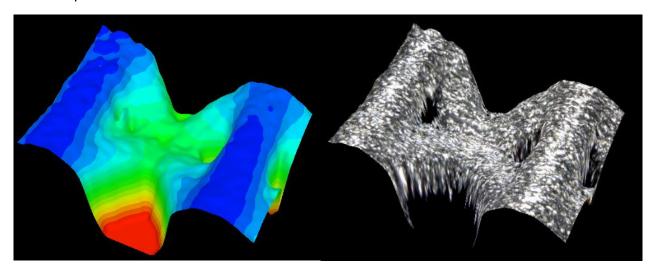


Figura 19: Ricostruzione 3D al videomicroscopio.

Le zone in rosso sono quelle che non sono state messe a fuoco e quindi risultano infinitamente profonde. Tramite le immagini ottenute con lo scatto singolo è stato possibile ottenere le misure delle aste. È quindi possibile (avendo il file .CAD originale) valutare di quanto si sia discostato il manufatto dalla geometria di progetto.

5. Risultati dei test

A seguire verranno mostrati i risultati delle diverse tecniche di analisi utilizzate. Dalle prove meccaniche sarà possibile valutare il comportamento meccanico di tali strutture mentre le analisi ottiche hanno permesso di ottenere una valutazione delle modalità di frattura dei campioni. Entrambe le tecniche sono state indispensabili per confermare i risultati delle simulazioni numeriche precedentemente effettuate.

La struttura studiata consiste in 10 celle elementari rinforzate da 2 strati esterni continui. Ogni cella è alta 4 mm mentre le pelli esterne sono di altezza 0.7 mm ciascuna, per un totale in altezza di 41.4 mm. Le celle esterne vengono denominate BCC-Z per le loro strutture di supporto lungo l'asse Z, mentre quelle interne BCC. In Tabella 4 sono riportati i valori medi delle misure dei campioni rilevati per ogni tipologia di provino. Da qui in avanti si identificherà con A, B e C la tipologia di provino a cui si farà riferimento.

Provini		lunghezza (mm)	Larghezza (mm)	altezza (mm)	Peso (g)	densità relativa
	Media	21,22	21,23	41,34	19,87	0,40
Α	Dev. Std	0,05	0,04	0,04	0,51	0,01
В	Media	21,19	21,21	41,30	20,09	0,40
В	Dev. Std	0,05	0,05	0,05	0,47	0,01
С	Media	21,15	21,17	41,29	19,92	0,40
C	Dev. Std	0,01	0,04	0,04	0,39	0,01

Tabella 4: Valori medi geometrie dei provini.

Come si evince dalla Tabella 4, il processo ha permesso di ottenere dei manufatti abbastanza precisi e simili tra loro, come dimostra la bassissima deviazione standard. La densità relativa è stata mantenuta costante nei provini senza lo sfruttamento delle tecniche di FGM.

5.1. Termografia e alta frequenza di acquisizione

Entrambe le tecniche sono state utilizzate esclusivamente per i provini As-Built in quanto gli unici a mostrare una rottura improvvisa e istantanea. In tutti gli altri casi si è ottenuta la densificazione totale dei campioni con lunghi tempi di prova, che rendono inutile una rapida acquisizione video e nei quali la dissipazione del calore tende ad essere uniforme. Per i provini testati in camera termica è stato impossibile l'utilizzo di queste tecniche.

Il principale problema della videocamera ad alta frequenza di acquisizione è stata la memoria disponibile per il salvataggio dei video. Non essendo espandibile, la camera dispone di una quantità di memoria costante che quindi, all'aumentare della frequenza di acquisizione, permette la registrazione di un tempo sempre minore di prova. Con la prova effettuata a 0.4 mm/min è stato tentato di analizzare il momento della rottura acquisendo a 300 pps (fotogrammi per

secondo). Si è riusciti a ottenere *solo 2 frame* che inquadrano la rottura del provino e nessun frame sulla nucleazione della cricca (possibile notarla sul lato destro del provino in Figura 20).

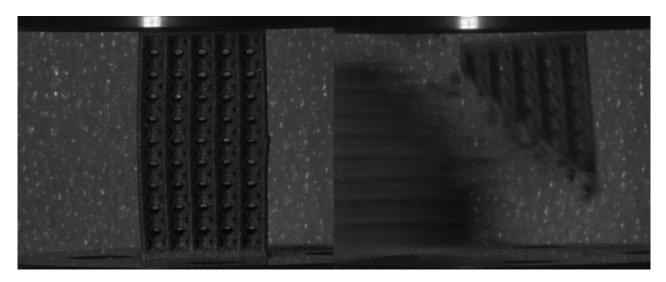


Figura 20: Acquisizione a 300 pps.

Si è provato a aumentare il numero di frame per secondo registrati dalla videocamera, ma per ottenere il doppio dei frame (600) si passa da un tempo massimo di registrazione di 14 secondi a 6 secondi. Si è tuttavia riusciti ad analizzare un campione a 1 mm/min utilizzando 700 pps; si è acquisita la completa rottura del campione (mostrata in Figura 21) ma, sfortunatamente, la diagonale di rottura non è stata a favore di camera e quindi non si è ripresa l'evoluzione della cricca.

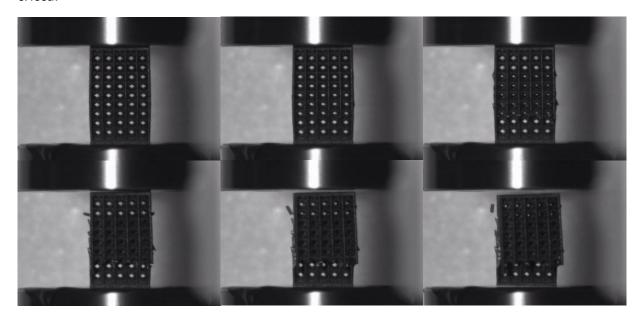


Figura 21: Acquisizione a 700 pps.

L'utilizzo di questa tecnica ci ha permesso di iniziare a comprendere la rottura del provino. Come si può notare nella Figura 21, il provino si rompe inizialmente a seguito della frattura a flessione delle

aste di rinforzo lungo Z (all'esterno) e si propaga in modo instabile in tutto il resto del campione (all'interno). Quindi si ha una rottura di tipo plastico nelle aste esterne e di tipo fragile in quelle interne. Questo è vero per tutti i provini as-built (ed in un caso T6), in quanto unica tipologia di provini a cedere subito dopo l'uscita dalla zona elastica e senza densificazione. Lo stato fortemente tensionato dei campioni a seguito della produzione additiva, risulta infatti eccessivamente rigido e incapace di permettere alle dislocazioni di scorrere.

A questo punto, si può procede per 2 vie al fine di ottenere la densificazione:

- Aumentiamo l'energia del sistema, facilitando lo scorrimento (aumento di temperatura);
- Modifichiamo lo stato metallurgico dei campioni in modo da ottenere strutture più duttili già a temperatura ambiente (trattamenti termici).

Si potrebbe ottenere un risultato simile modificando la velocità di applicazione del carico ma questo caso non è stato approfondito sia per motivi di tempo che per quantità di provini a disposizione.

La termografia ci ha permesso di individuare le zone sottoposte a lavoro plastico. Infatti, a causa della elevata velocità del processo di frattura, è stato impossibile seguire la propagazione della cricca e la rottura del materiale attraverso la termocamera che possiede il limite di 10 Hz di frequenza di acquisizione (10 pps). Nonostante questo la dissipazione del calore non è un fenomeno istantaneo e quindi può essere valutato anche con bassi frame-rate.

A causa della velocità di rottura del provino, con conseguente esplosione dello stesso, non si sono riuscite a ottenere risultati utili da questo tipo di indagine per tutti i provini. In alcuni casi però, quando una parte dello stesso rimaneva nel campo visivo della termocamera anche dopo la fine della prova, si è riusciti a ottenere dei dati sulle aste laterali. Alla fine della prova la temperatura media del provino è di 26.2 °C (come si può notare in Figura 22).

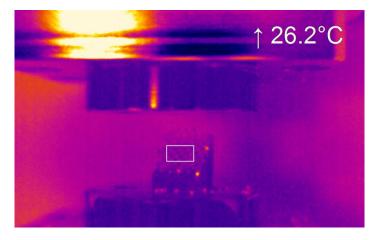


Figura 22: Frame successivo alla rottura.

Nonostante ciò si notano delle zone periferiche, in corrispondenza delle aste, in cui la temperatura locale è nettamente maggiore. Andando ad analizzarle nel dettaglio ci si è resi conto che in quelle zone si raggiungono picchi di temperatura fino a 33.7 °C (Figura 23). Questo è dovuto al lavoro plastico effettuato dall'asta durante la fase di rottura, cosa non presente invece al centro del provino.

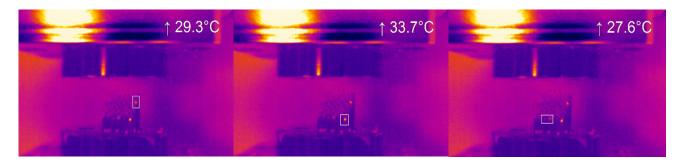


Figura 23: Valutazione zone calde del provino dopo la prova.

Questa valutazione è stata avvalorata dalle successive analisi al microscopio che hanno permesso di analizzare le superfici di rottura. Come predetto, le aste laterali sono le uniche zone di frattura in cui si notano gli evidenti segni dello scorrimento plastico; nelle zone di frattura interne (zone fredde per la termografia) si sono riscontrare solo superfici opache, segno di una rottura fragile.

5.2. Microscopia e Analisi delle sezioni

Tramite l'uso del Videomicroscopio è stato possibile valutare le dimensioni dei parametri fondamentali di cella. Le misure mostrate in Figura 24 rispecchiano abbastanza fedelmente quelle del progetto in formato CAD. Com'è possibile notare, la superficie del provino tende ad essere estremamente rugosa a causa del tipo di processo produttivo. La rugosità superficiale è infatti uno dei difetti principali dell'additive, che non ne permette ancora l'utilizzo per applicazioni nelle quali questa proprietà influisce grandemente sulla resistenza del manufatto (si pensi a componenti che debbano lavorare a fatica o ad usura).

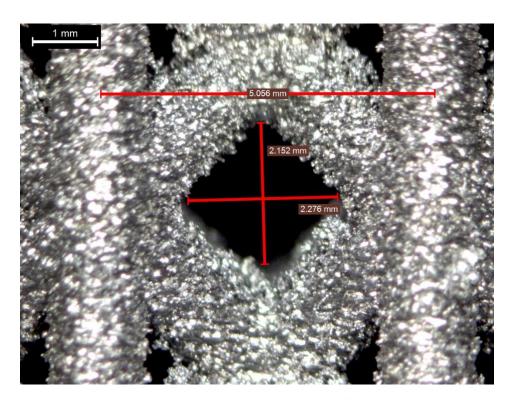


Figura 24: Valutazione parametri di cella.

Ovviamente si può in parte eliminare questo problema utilizzando delle tecniche di lavorazione superficiali quali la sabbiatura, la pallinatura ecc. che permettono di ottenere risultati nettamente migliori. Non tutte queste tecniche possono essere utilizzate su reticoli o strutture interne a causa del *problema della linea di vista libera*.

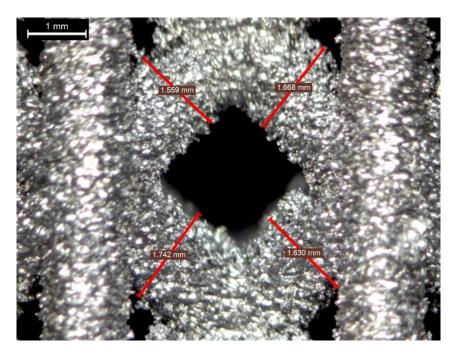


Figura 25: Valutazione dimensione strut.

In Figura 25 è possibile notare la valutazione delle misure delle strut. A fronte di una dimensione nominale di 1.6 mm è stata trovata buona corrispondenza con la situazione reale. In media le strut risultano essere 1.650 mm, con quindi solo una sovraddimensione di mezzo decimillimetro, e una deviazione standard di 0.07 (molto affidabile).

Nei provini con il canale è stato inoltre analizzato le dimensioni del cordone di saldatura del canale. Ne è risultato un cordone alto quasi un millimetro (Figura 26). Il cordone non è una parte progettata del manufatto ma si rende necessario in produzione poiché un ispessimento della zona di giunzione tra le due parti del canale risulta impossibile da eliminare. Inoltre, funge da innesco durante la rottura dei provini che lo possiedono, il che aiuta a migliorare la deformabilità di questi ultimi. Un problema che potrebbe insorgere però consiste nell'eventuale problematica di flusso di liquidi all'interno del canale; sia il cordone che la rugosità superficiale del canale infatti potrebbero essere negativi da un punto di vista fluidodinamico o per la resistenza all'usura e corrosione.

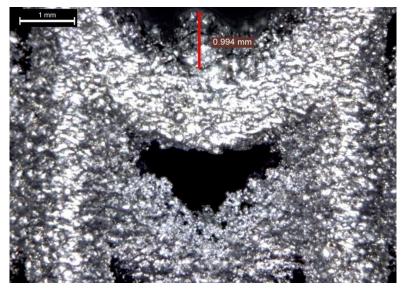


Figura 26: analisi del cordone di saldatura.

Si è studiata la distribuzione delle aree lungo la periodicità del reticolo esclusivamente nella tipologia di provini A in quanto si è notato che *la rottura principale avviene sempre ed unicamente nella zona reticolare del provino e non parte invece mai dal canale*. Questo è un importante punto di svolta perché inizia a mostrare come l'assenza di alcune celle elementari, dovuta a causa dell'inserimento dei canali, non influenza il comportamento del provino.

Nella Tabella 5 sono mostrati i risultati ottenuti sulle sezioni perpendicolari all'applicazione del carico.

Studio delle Aree 90°					
	Posizione	Area A (mm²)	Area B (mm²)	Area C (mm²)	
Step 1	0,71	197,87	242,42	221,72	
Step 2	0,81	207,26	233,18	220,34	
Step 3	0,91	217,25	231,82	221,05	
Step 4	1,01	237,57	230,95	221,26	
Step 5	1,11	235,61	231,13	221,19	
Step 6	1,21	222,35	226,40	215,36	
Step 7	1,31	204,94	214,03	201,31	
Step 8	1,41	187,18	199,40	186,01	
Step 9	1,51	169,24	184,99	169,91	
Step 10	1,61	151,51	170,46	154,07	
Step 11	1,71	136,31	155,45	138,89	
Step 12	1,81	125,42	142,95	123,30	
Step 13	1,91	119,33	128,54	109,19	
Step 14	2,01	113,81	118,80	98,06	
Step 15	2,11	120,09	131,00	110,73	
Step 16	2,21	127,37	143,76	124,01	
Step 17	2,31	139,04	156,20	137,51	
Step 18	2,41	154,96	167,36	151,64	
Step 19	2,51	172,96	176,84	165,88	
Step 20	2,61	190,77	185,84	179,49	

Tabella 5: Analisi delle sezioni efficaci perpendicolari al carico.

In giallo sono evidenziate le sezioni massime mentre in verde quelle minime. L'analisi è stata eseguita a partire da 0.7 mm di altezza poiché questo è lo spessore nominale della pelle. Si è proceduto per passi di 0.1 mm alla volta in modo da analizzare, con 20 step, metà della cella elementare (sfruttando la simmetria del reticolo). Lo step 14 è risultato quello con la sezione minore per tutte le tipologie di provino. Ovviamente per l'analisi dei provini B e C si è analizzata la sezione a partire dalla base del canale in modo da includerlo nelle stime per la valutazione della sezione resistente del provino.

A seguito dell'analisi delle sezioni è stata utilizzata l'area minima e massima per ogni provino per calcolare le tensioni ottenute durante la prova. In Figura 27, Figura 28 e Figura 29 sono mostrate le sezioni minime e massime per ogni classe di provini.

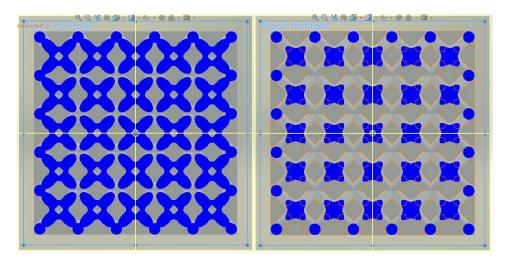


Figura 27: Provini A: sez. massima (a sx) e sez. minima (a dx).

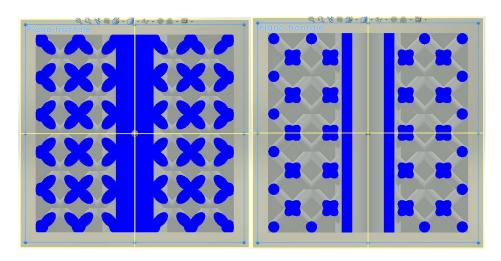


Figura 28: Provini B: sez. massima (a sx) e sez. minima (a dx).

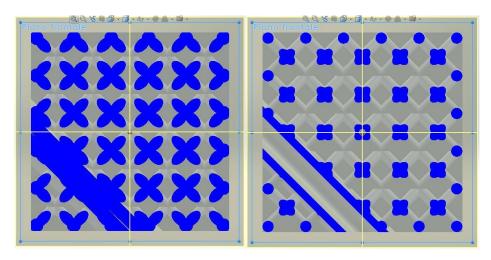


Figura 29: Provini C: sez. massima (a sx) e sez. minima (a dx).

A seguito delle simulazioni numeriche e dalle evidenze scientifiche ottenute dalle diverse tecniche utilizzate, si è resa necessaria la valutazione della sezione utile a 45° (Figura 30) rispetto all'asse di applicazione del carico. Questa è stata valutata similmente alle precedenti con la funzione "Valuta" [29] del software di progettazione "SolidWorks" e ha permesso di ottenere i risultati riportati in Tabella 6:

Studio delle Aree 45°						
	Posizione	Area A (mm²)				
Step 1	14	338,09				
Step 2	14,1	335,59				
Step 3	14,2	332,74				
Step 4	14,3	327,23				
Step 5	14,4	317,74				
Step 6	14,5	304,03				
Step 7	14,6	288,44				
Step 8	14,7	261,00				
Step 9	14,8	222,71				
Step 10	14,9	162,00				
Step 11	15	161,62				
Step 12	15,1	162,59				
Step 13	15,2	165,39				
Step 14	15,3	167,10				
Step 15	15,4	170,63				
Step 16	15,5	168,51				
Step 17	15,6	171,70				
Step 18	15,7	174,49				
Step 19	15,8	171,41				
Step 20	15,9	175,39				

Tabella 6: Analisi delle sezioni efficaci a 45° rispetto l'asse del carico.

Come visto in precedenza in giallo sono evidenziate le sezioni massime mentre in verde quelle minime.

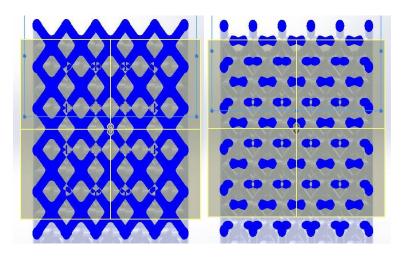


Figura 30: Provini A a 45°: sez. massima (a sx) e sez. minima (a dx).

A seguito delle analisi virtuali è stato prelevato un provino e sezionato; si è valutata quindi la corrispondenza tra il reticolo teorizzato e progettato in CAD e il manufatto realizzato dalla macchina. Per i motivi esposti prima sono state valutate solo le sezioni dei provini della tipologia A e soltanto lungo l'asse perpendicolare all'applicazione del carico.

Studio delle Aree 90°						
su provino inglobato						
	Posizione	Area A				
	FUSIZIONE	(mm²)				
Step 1	17,8	218,44				
Step 2	17,68	203,80				
Step 3	17,56	184,66				
Step 4	17,31	146,15				
Step 5	17,22	160,91				
Step 6	17,12	150,99				
Step 7	17,05	142,54				
Step 8	17,02	116,97				
Step 9	16,89	94,08				
Step 10	16,65	96,90				
Step 11	16,58	119,22				
Step 12	16,31	173,29				
Step 13	16,11	193,20				
Step 14	16,05	212,02				
Step 15	15,78	230,80				
Step 16	15,71	214,24				
Step 17	15,6	202,16				
Step 18	15,49	208,81				
Step 19	15,38	198,93				
Step 20	15,27	189,07				

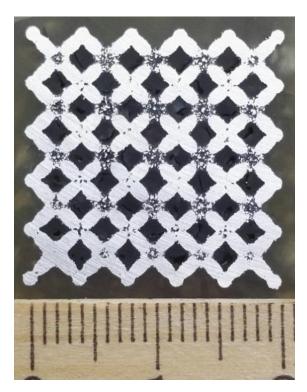
Tabella 7: Analisi delle sezioni efficaci di un provino inglobato a 90° rispetto l'asse del carico.

In Tabella 7 è possibile valutare le sezioni effettive valutate tramite lucidatura progressiva di un provino inglobato in resina e successivamente sezionato. La resina è stata scelta in funzione della

sua viscosità, in quanto per poter inglobare efficacemente un provino poroso necessitava di una maggiore fluidità e una velocità di reticolazione bassa. La resina scelta è risultata ottima sia per le sue caratteristiche reologiche che di reticolazione; la resina ha impiegato più di 24 ore a reticolare e ciò ha permesso ad eventuali bolle d'aria di essere eliminate.

A causa delle dimensioni dei provini e, di conseguenza, del manufatto inglobato non è stato possibile utilizzare la lucidatrice automatica. Questo ha fatto sì che, dovendo utilizzare la lucidatrice manuale, si ottenesse inizialmente una curva di taratura tempo-spessore del campione; sapendo quanto materiale venisse asportato nell'unità di tempo si è proceduto a valutare differenti step cercando di mantenere la distanza dei vari strati costante più possibile. Per ottenere una lucidatura omogenea si è tenuto il campione premuto sulla lucidatrice con un peso.

Le immagini così ottenute sono state elaborate tramite un software open-source di analisi delle immagini, "ImageJ", basato su Sun-Java e sviluppato dal National Institutes of Health degli Stati Uniti[30]. Il programma è in grado di effettuare delle valutazioni di aree tramite la trasformazione delle stesse in formato 8-bit e la successiva creazione di un'unità di misura pixel-mm. La calibrazione è stata effettuata grazie ad un righello apposto accanto alla sezione da valutare. In Figura 31 è possibile vedere la sezione massima e minima.



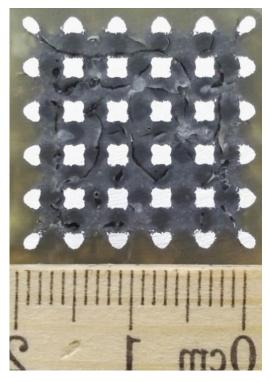


Figura 31: Provini A inglobati: sez. massima (a sx) e sez. minima (a dx).

Nonostante gli sforzi attuati per mantenere le condizioni di valutazione dei provini reali più omogenee possibili rispetto alle valutazioni software, la differenza tra i diversi layer analizzati difficilmente risulta uguale a 0.1 mm. Questo ha però permesso di notare che spostandosi anche meno del passo prestabilito, si ottengono delle differenze di sezione abbastanza marcate.

Com'è possibile valutare dalle tabelle precedenti, la sezione massima del provino viene valutata correttamente sia tramite software che tramite lucidatura. La sezione minima invece risulta essere leggermente sovrastimata dal software, che ne aumenta il valore rispetto all'area effettiva del provino inglobato del 19%.

Infine, si è passati all'analisi delle superfici di frattura tramite lo Stereomicroscopio. L'analisi è stata condotta effettuando un controllo su tutte le superfici di rottura dei provini As-Built in modo da ottenere dei dati statisticamente rilevanti. La superficie di frattura di ogni provino è quindi stata scomposta in una matrice di punti in modo da poter identificare in che zona fosse avvenuta una rottura fragile rispetto a una duttile, come mostrato in Figura 32.

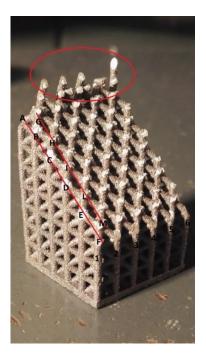


Figura 32: Schema della divisione in zone del provino

La zona evidenziata in alto mostra la parte delle aste ancora collegate a questo lato del provino e con evidenti segni di lavoro plastico in superficie, come mostrato in Figura 33. Queste superfici sono caratterizzate da evidenti bande di scorrimento e lucidezza. Inoltre, l'orientazione delle aste permette di intuire il tipo di sforzo a cui sono state sottoposte le aste esterne (flessione e torsione) poiché rivolte verso l'interno del provino.

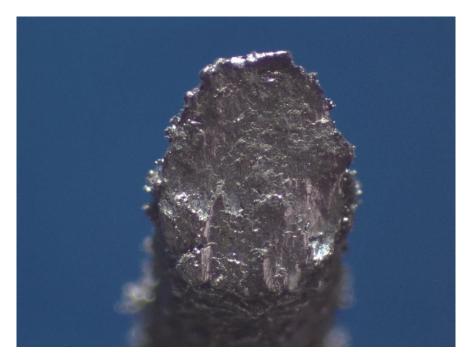


Figura 33: Superfice aste esterna con bande di scorrimento.

Figura 34: Superficie di frattura interna opaca.

Nella Figura 34 è mostrata la superficie di frattura di uno dei nodi del reticolo; tutte le superfici interne al campione mostrano un'identica morfologia, segno di una rottura uniforme di tipo fragile.

I provini A trattati termicamente con stress relieving e T6 invece mostrano un comportamento duttile molto accentuato. Il trattamento di stress relieving permette di annullare le tensioni

interne del provino rendendo possibile lo scorrimento delle dislocazioni e quindi una maggiore duttilità del provino finale mentre il T6 annulla le tensioni residue ma contemporaneamente anche la positiva microstruttura da additive. Per semplicità espositiva da qui in avanti si farà riferimento ai campioni trattati con lo stress relieving con la sigla SR mentre i provini trattati in T6 manterranno questa sigla. Sia nei provini SR che T6 sono state riscontrate ancora entrambe le rotture (duttile, fragile) ma con una prevalenza massiccia della prima.

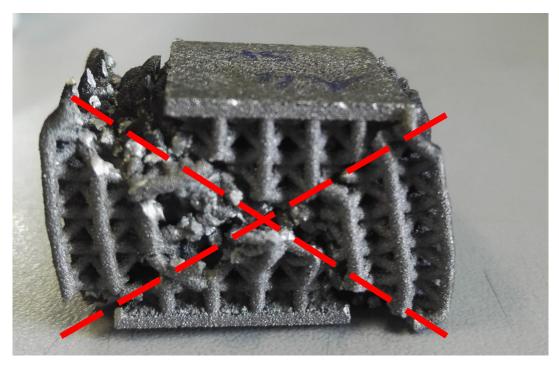


Figura 35: Provino A trattato termicamente.

Come è possibile notare in Figura 35, i provini trattati termicamente (sia SR che T6) tendono a collassare lungo le due diagonali principali della struttura. Lo scivolamento lungo una delle diagonali è ben visibile anche sui grafici tensione-deformazione, nei quali sono rappresentati dall'abbattimento improvviso delle tensioni. Questo avviene in quanto la deformazione inizia lungo i piani di slittamento più favorevoli e meno energetici (presenza di difetti o microporosità) per poi passare alla diagonale opposta e permettere il collasso della struttura. Nonostante ciò non si arriva a densificazione completa in quanto i provini tendono a mantenere alcune zone di frattura fragile al loro interno che portano allo sgretolamento e distacco di interi pezzi del provino (Figura 36).



Figura 36: Sgretolamento e distacco di interi pezzi della struttura.

Per quanto riguarda i provini B e C (SR e T6) ci si è concentrati maggiormente sulle zone di rottura nei pressi dei canali, in modo da evidenziare quelle che potrebbero essere le modifiche al comportamento della struttura originale introdotte da quest'ultimi. Il cordone di saldatura finale del canale sembra rompersi per rottura fragile (Figura 37). Il minore assorbimento energetico dei provini B è presumibilmente dovuto al numero minore di celle elementari deformabili presenti in questi tipi di provini (sostituite completamente dal canale) al contrario dei provini C che le intersecano senza sostituirle del tutto.

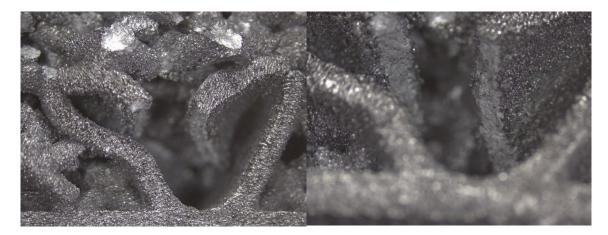


Figura 37: Canale provini B collassato.

5.3. Prove di Compressione

Per elaborare i dati si è scelto di utilizzare la sezione minima teorica dei provini in modo da tenersi nel caso più conservativo possibile. In Figura 38 è mostrato il momento dello slittamento della struttura lungo la prima diagonale.

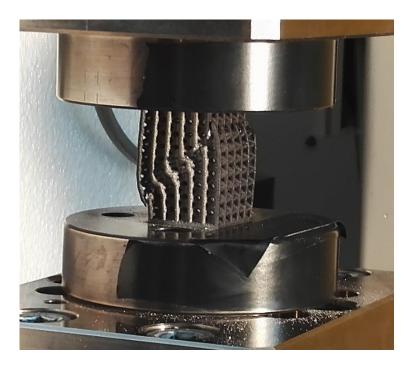


Figura 38: Slittamento della struttura lungo la prima diagonale.

5.3.1. Prove a Temperatura ambiente

Verranno esposti risultati delle prove di compressione eseguite a temperatura ambiente e successivamente le medesime prove eseguite a 200°C.

AS

I provini A non trattati (AS) si sono rotti subito dopo la fine della zona elastica, con deformazione percentuale a rottura minore del 7%. Nella Tabella 8 è possibile notare i risultati della prova a compressione In Figura 39, Figura 40 e Figura 41 sono mostrate le curve forza-deformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

A AS 25°C	E _{mod}	F _{max}	F _{max}	dL a F _{max}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	dL a rottura
	GPa	N	MPa	Def%	N	MPa	Def%	N	Def%
A-2	79,87	24618,06	216,31	5,705	15632,86	137,36	2,09	23569,67	6,31
A-7	93,54	25603,17	224,96	5,556	16608,14	145,93	1,94	23646,13	6,24
A-8	86,63	25470,97	223,80	5,730	16712,72	146,85	2,06	22989,2	6,36
A-10	86,83	28984,27	254,67	5,901	18768,33	164,91	2,18	27503,92	6,28
Media	86,72	26169,12	229,93	5,723	16930,51	148,76	2,07	24427,23	6,30
Dev. Std.	5,58	1926,878	16,93	0,141	1318,18	11,58	0,10	2071,995	0,05
Dev. Std. %	6,4	7,4	7,4	2,5	7,8	7,8	4,9	8,5	0,8

Tabella 8: Valori ottenuti per provini A AS 25°C

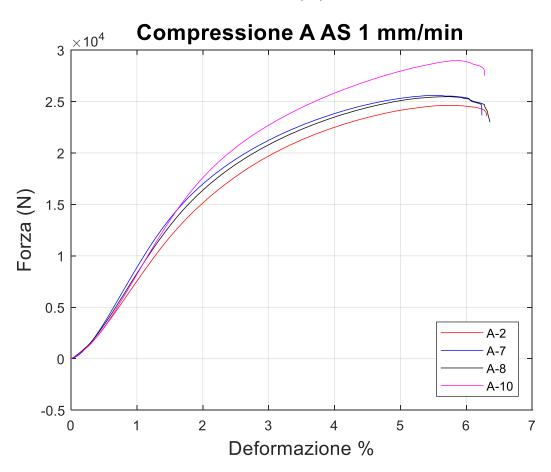


Figura 39: Grafico forza-deformazione A AS

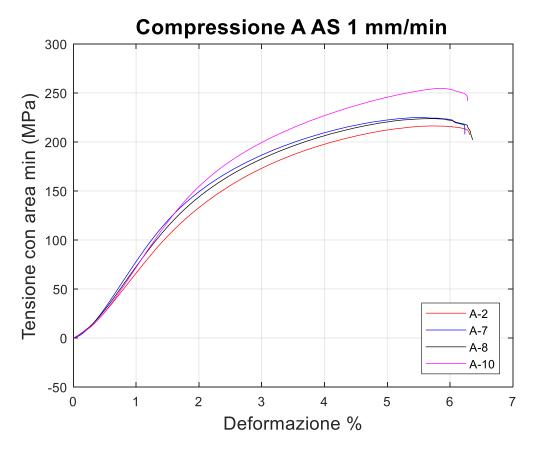


Figura 40: Grafico tensione-deformazione A AS

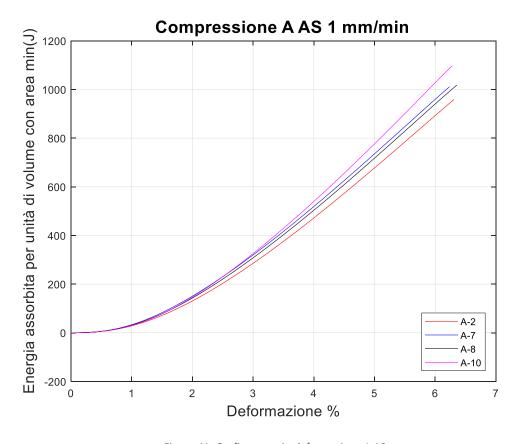


Figura 41: Grafico energia-deformazione A AS

A 25°C

I provini trattati termicamente con stress relieving si sono dimostrati estremamente duttili, arrivando in certi casi a mantenere una solidità strutturale fino al 60 % della deformazione (limite superiore della prova). In Figura 42 è possibile notare l'evoluzione del provino durante lo svolgimento della prova. Si nota che a partire dal 10% di deformazione percentuale in poi (4 mm) i provini tendono a slittare lungo piani orientati a 45°. Lo scorrimento avviene inizialmente lungo una diagonale e successivamente anche su un secondo piano, perpendicolare rispetto al primo piano di scorrimento. Questi slittamenti possono essere associati alla caduta di tensione sul grafico Sforzo deformazione (Figura 45). Nella Tabella 9 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 43, Figura 44 e Figura 45 sono mostrate le curve forza-deformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

A SR 25°C	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	$F_{Rottura}$
A 311 23 C	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
A-3	85,6	14855,2	130,5	1,95	38074,9	334,5
A-4	80,9	13873,7	162,0	2,02	17017,0	149,5
A-5	83,5	14310,7	176,8	1,94	27286,2	239,7
Media	83,4	14346,5	156,5	1,97	27459,3	241,3
Dev. Std.	2,35	491,69	23,66	0,04	10530,02	92,52
Dev. Std. %	2,82	3,43	15,12	2,28	38,35	38,35

Tabella 9: Valori ottenuti per provini A SR 25°C

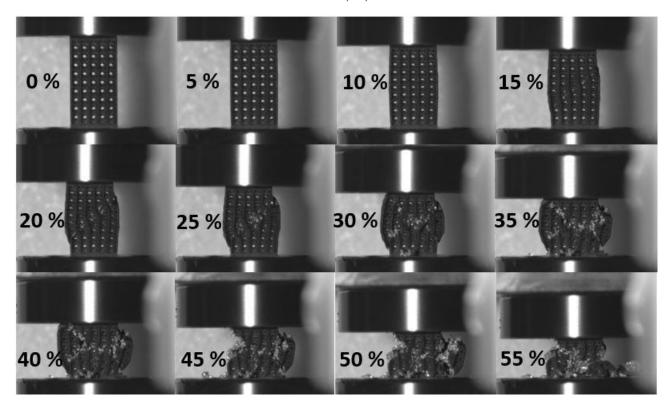


Figura 42: Evoluzione del provino durante lo svolgimento della prova.

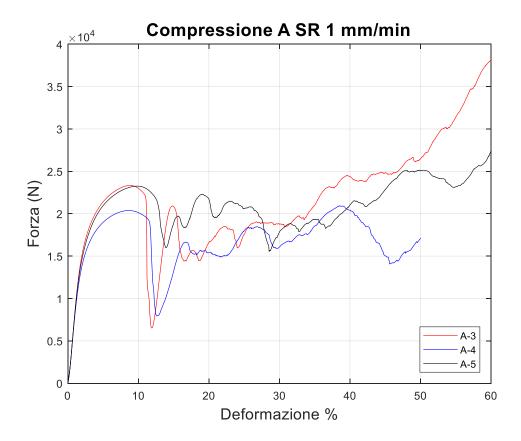


Figura 43: Grafico forza-deformazione A SR.

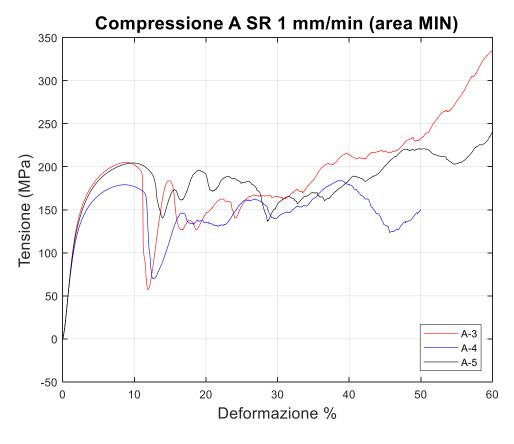


Figura 44: Grafico tensione-deformazione A SR.

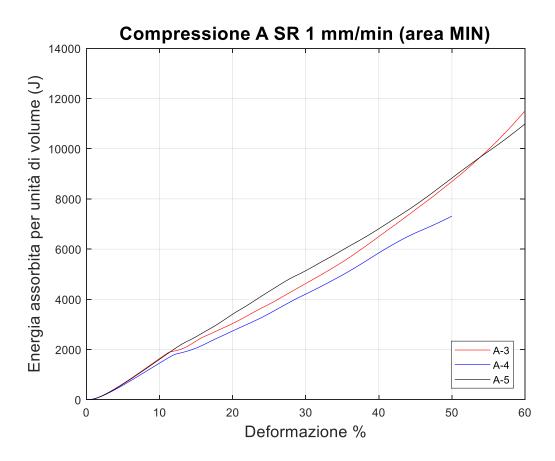


Figura 45: Grafici energia-deformazione A SR.

B 25°C

In Figura 46 è possibile notare l'evoluzione del provino durante lo svolgimento della prova. Nel caso in cui i piani a 45° siano tangenti al canale (es. provino B-2) il collasso avviene come per i provini A SR ma con un minimo evidente nella parte finale del grafico dovuto al secondo slittamento (evidenziato in Figura 48). Nella Tabella 10 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 47, Figura 48 e Figura 49 sono mostrate le curve forza-deformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

B SR 25°C	E _{mod}	Fpicco	Fpicco	dL a Fpicco	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	F _{Rottura}
	GPa	N	MPa	Def%	N	MPa	Def%	N	Мра
B-1	82,5	19955,1	168,0	7,25	12445,6	104,8	1,46	26427,4	222,4
B-2	69,5	20244,7	170,4	7,87	12833,3	108,0	1,85	25247,2	212,5
B-3	75,8	19972,0	168,1	7,55	13590,0	114,4	1,87	26331,2	221,6
Media	76,0	20057,3	168,8	7,56	12956,3	109,1	1,73	26001,9	218,9
Dev. Std.	6,48	162,59	1,37	0,31	582,03	4,90	0,23	655,40	5,52
Dev. Std. %	8,54	0,81	0,81	4,09	4,49	4,49	13,33	2,52	2,52

Tabella 10: Valori ottenuti per provini B SR 25°C

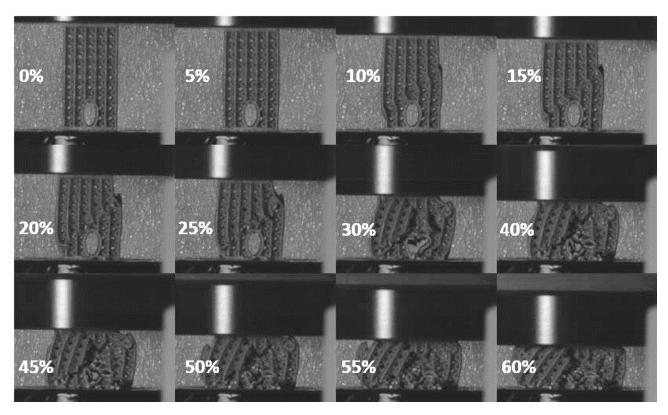


Figura 46: Evoluzione del provino durante lo svolgimento della prova.

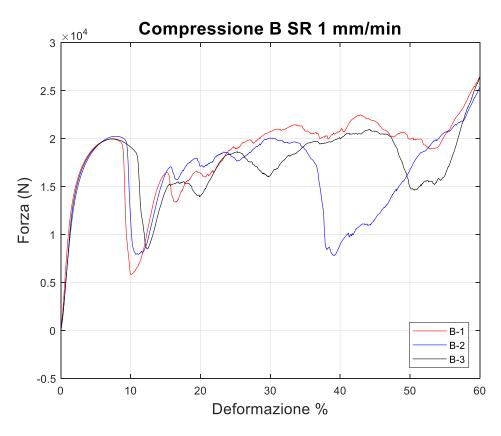


Figura 47: Grafici forza-deformazione B SR.

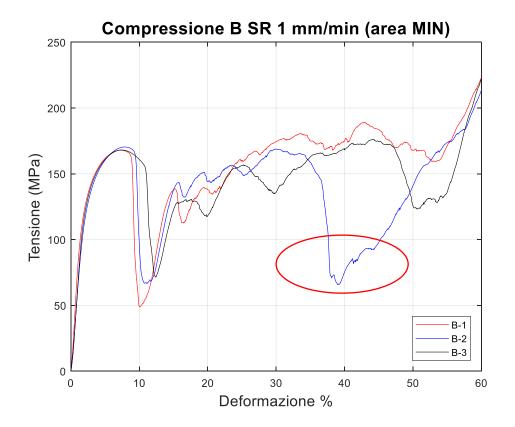


Figura 48: Grafici tensione-deformazione B SR.

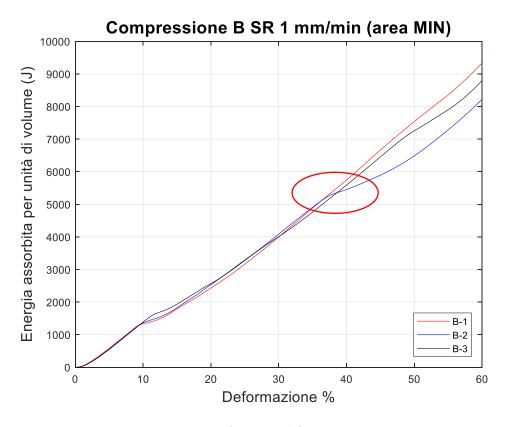


Figura 49: Grafici energia-deformazione B SR.

C 25°C

In Figura 50 è possibile notare l'evoluzione del provino durante lo svolgimento della prova. Nella Tabella 11 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 51, Figura 52 e Figura 53 sono mostrate le curve forza-deformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

C SR 25°C	E _{mod}	Fpicco	Fpicco	dL a Fpicco	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	$F_{Rottura}$
	GPa	Ν	MPa	Def%	N	MPa	Def%	Ν	Мра
C-1	74,0	19597,1	199,8	9,01	13582,8	138,5	2,30	28044,9	286,0
C-2	93,3	19636,5	200,2	8,70	12319,8	125,6	1,62	30450,9	310,5
C-3	86,6	22030,2	224,6	9,04	14310,2	145,9	2,06	35314,3	360,1
Media	84,6	20421,3	208,2	8,92	13404,3	136,7	1,99	31270,0	318,9
Dev. Std.	9,81	1393,52	14,21	0,19	1007,10	10,27	0,34	3703,29	37,76
Dev. Std. %	11,59	6,82	6,82	2,09	7,51	7,51	17,28	11,84	11,84

Tabella 11: Valori ottenuti per provini C SR 25°C

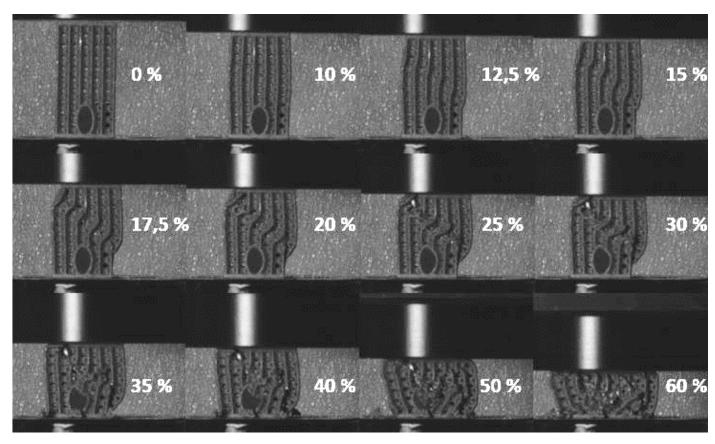


Figura 50: Evoluzione del provino durante lo svolgimento della prova.

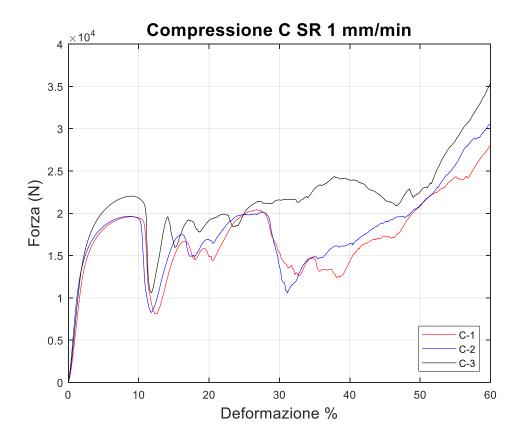


Figura 51: Grafici forza-deformazione CSR.

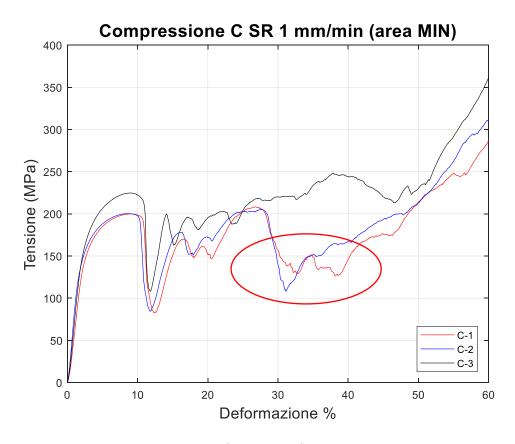


Figura 52: Grafici tensione-deformazione CSR.

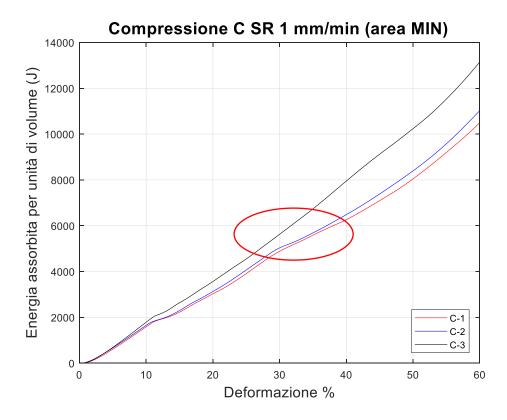


Figura 53: Grafici energia-deformazione C SR.

T6 B 25°C

Nella Tabella 12 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 54, Figura 55 e Figura 56 sono mostrate le curve forza-deformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

В Т6	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	$F_{Rottura}$	F _{Rottura}
D 10	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
B-7	78,6	11723,5	103,0	1,68	3605,0	31,7
B-8	69,9	9782,8	86,0	1,43	16872,2	148,2
Media	74,3	10753,2	94,5	1,56	10238,6	90,0
Dev. Std.	6,2	1372,29	12,06	0,18	9381,37	82,43
Dev. Std. %	8,3	12,76	12,76	11,25	91,63	91,63

Tabella 12: Valori ottenuti per provini B T6 25°C

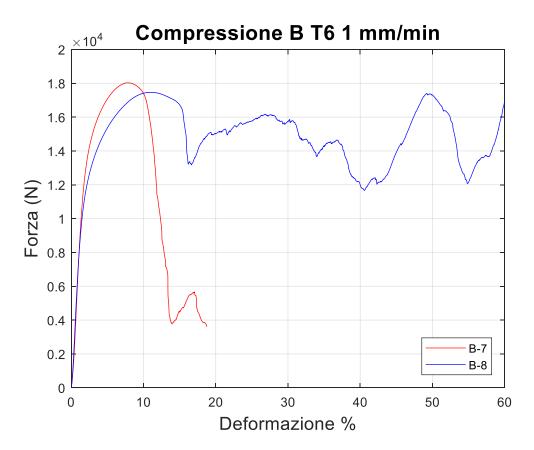


Figura 54: Grafico forza-deformazione B T6



Figura 55: Grafico tensione-deformazione B T6



Figura 56: Grafico energia-deformazione B T6

C 25°C

Nella Tabella 13 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 57, Figura 58 e Figura 59 sono mostrate le curve forza-deformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

С Т6	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	F _{Rottura}
C 10	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
C-7	73,3	12428,3	109,2	1,81	23713,6	208,4
C-8	80,0	12559,7	110,3	1,71	23675,1	208,0
Media	76,6	12494,0	109,8	1,76	23694,4	208,2
Dev. Std.	4,7	92,89	0,82	0,07	27,19	0,24
Dev. Std. %	6,2	0,74	0,74	4,06	0,11	0,11

Tabella 13: Valori ottenuti per provini C T6 25°C

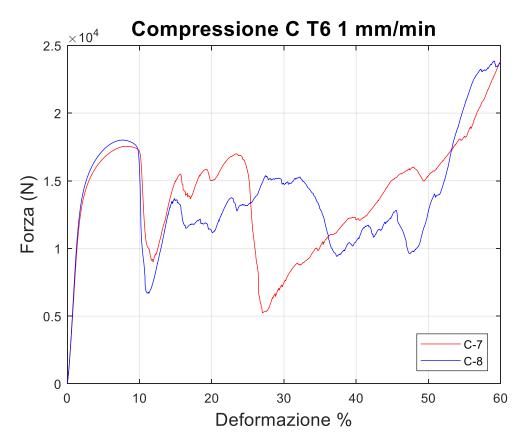


Figura 57: Grafico forza-deformazione C T6

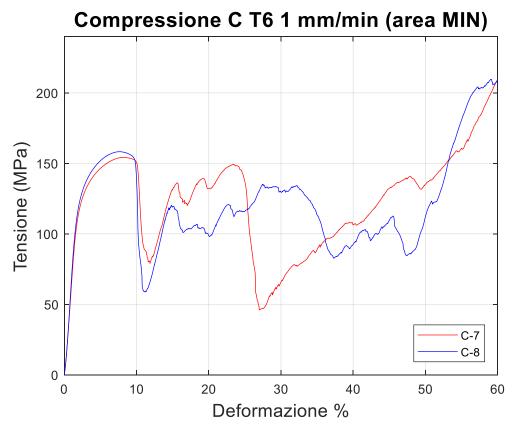


Figura 58: Grafico tensione-deformazione C T6

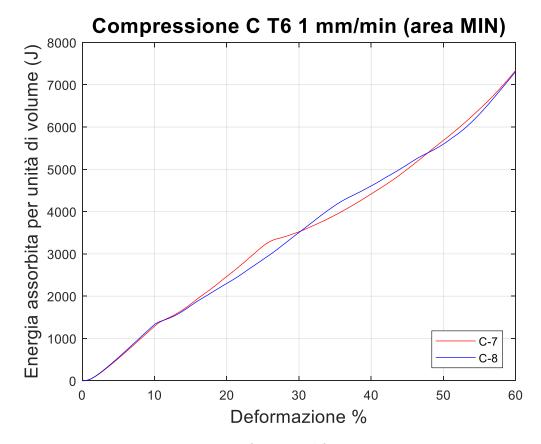


Figura 59: Grafico energia-deformazione C T6

5.3.2. Prove in Temperatura (200°C)

SR

A 200°C

Il campione analizzato è collassato su sé stesso e arrivato a densificazione completa. Questo è stato possibile grazie all'aumento di temperatura che ha facilitato lo slittamento delle dislocazioni. *I grafici risultano essere paragonabili a quelli di una schiuma* nel quale si individuano chiaramente un plateau di densificazione senza massimi o minimi. Nella Tabella 14 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 60, Figura 61 e Figura 62 sono mostrate le curve forza-deformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

A SR	E_{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	F _{Rottura}
200°C	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
A-6	63,3	8431,8	74,1	1,48	51764,5	454,8

Tabella 14: Valori ottenuti per provini A SR 200°C

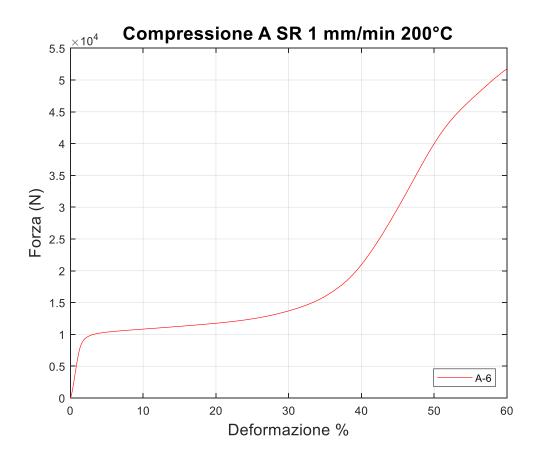


Figura 60: Grafico forza-deformazione A SR 200°C

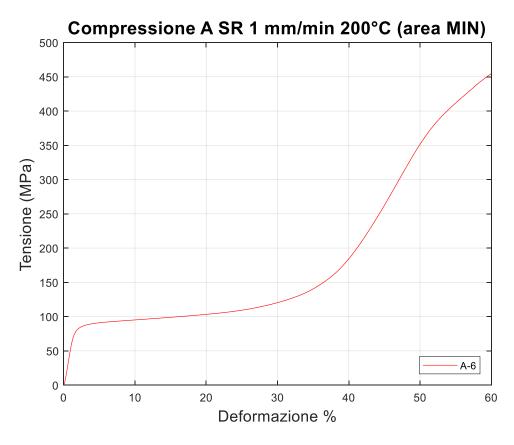


Figura 61: Grafico tensione-deformazione A SR 200°C

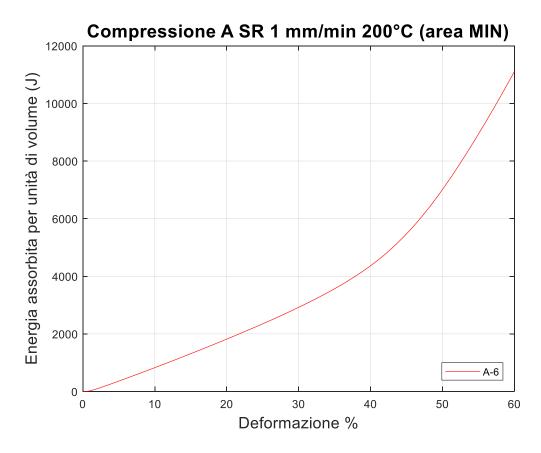


Figura 62: Grafico energia-deformazione A SR 200°C

B 200°C

I campioni analizzati sono collassati su sé stessi e arrivati a densificazione completa. Questo è stato possibile grazie all'aumento di temperatura che ha facilitato lo slittamento delle dislocazioni. *I grafici risultano essere paragonabili a quelli di una schiuma* nel quale si individuano chiaramente un plateau di densificazione senza massimi o minimi. Nella Tabella 15 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 63, Figura 64 e Figura 65 sono mostrate le curve forzadeformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

B SR	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	$F_{Rottura}$	F _{Rottura}
200° C	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
B-4	72,6	10272,2	90,3	1,62	50012,4	439,4
B-5	58,2	9797,3	86,1	1,92	42619,8	374,5
B-6	64,0	9270,1	81,5	1,79	44327,8	389,5
Media	64,9	9779,9	85,9	1,78	45653,3	401,1
Dev. Std.	7,2	501,3	4,4	0,15	3870,4	34,0
Dev. Std. %	11,1	5,1	5,1	8,43	8,5	8,5

Tabella 15: Valori ottenuti per provini B SR 200°C

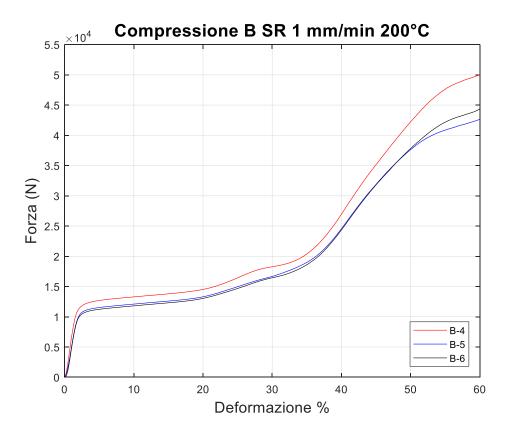


Figura 63: Grafico forza-deformazione B SR 200°

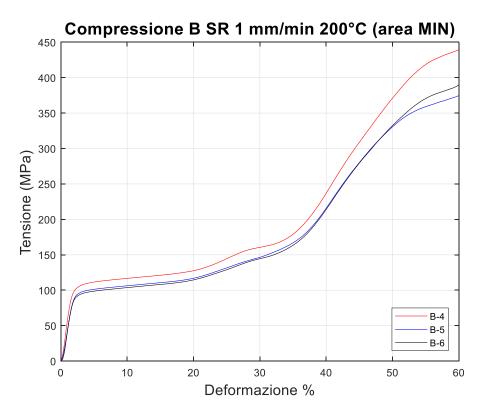


Figura 64: Grafico tensione-deformazione B SR 200°C

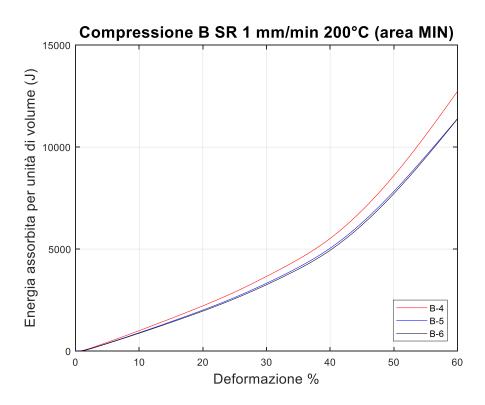


Figura 65: Grafico energia-deformazione B SR 200°C

C 200°C

I campioni analizzati sono collassati su sé stessi e arrivati a densificazione completa. Questo è stato possibile grazie all'aumento di temperatura che ha facilitato lo slittamento delle dislocazioni. I *grafici risultano essere paragonabili a quelli di una schiuma* nel quale si individuano chiaramente un plateau di densificazione senza massimi o minimi. Nella Tabella 16 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 66, Figura 67 e Figura 68 sono mostrate le curve forzadeformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

C SR	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	F _{Rottura}
200°C	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
C-4	68,3	9936,8	87,3	1,61	47934,5	421,2
C-5	68,6	9695,6	85,2	1,55	48586,6	426,9
C-6	82,3	8922,1	78,4	1,27	49129,8	431,7
Media	73,1	9518,2	83,6	1,48	48550,3	426,6
Dev. Std.	8,0	530,1	4,7	0,19	598,4	5,3
Dev. Std. %	11,0	5,6	5,6	12,52	1,2	1,2

Tabella 16: Valori ottenuti per provini C SR 200°C

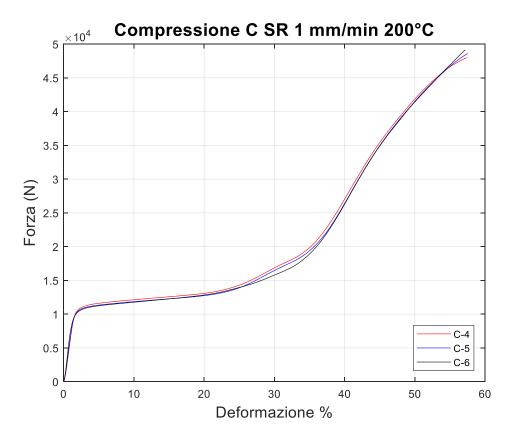


Figura 66: Grafico forza-deformazione C SR 200°

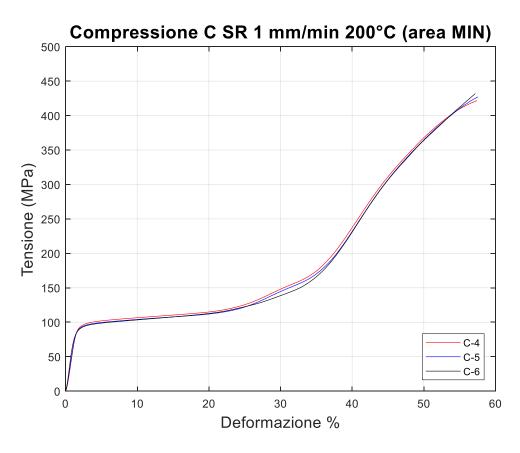


Figura 67: Grafico tensione-deformazione C SR 200°

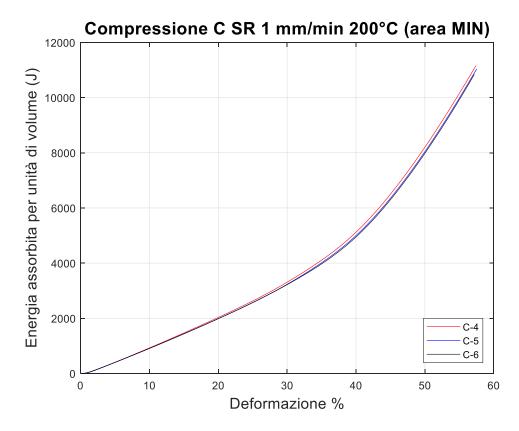


Figura 68: Grafico energia-deformazione C SR 200°C

*T6*B 200°C

I campioni analizzati sono collassati su sé stessi e arrivati a densificazione completa. Questo è stato possibile grazie all'aumento di temperatura che ha facilitato lo slittamento delle dislocazioni. I grafici risultano essere paragonabili a quelli di una schiuma ma il *T6 ha introdotto una certa instabilità nel comportamento del materiale*. Nella Tabella 17 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 69, Figura 70 e Figura 71 sono mostrate le curve forzadeformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

в т6	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	$F_{Rottura}$
200°C	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
B-9	72,1	10660,5	93,7	1,62	24562,45	215,82
B-10	74,7	11198,7	98,4	1,53	20285,47	178,24
Media	73,4	10929,6	96,0	1,57	22424,0	197,0
Dev. Std.	1,8	380,6	3,3	0,06	3024,3	26,6
Dev. Std. %	2,5	3,5	3,5	3,96	13,5	13,5

Tabella 17: Valori ottenuti per provini B T6 200°C

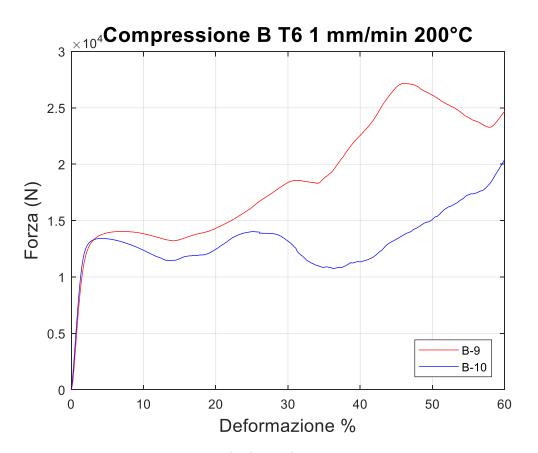


Figura 69: Grafico forza-deformazione B T6 200°C

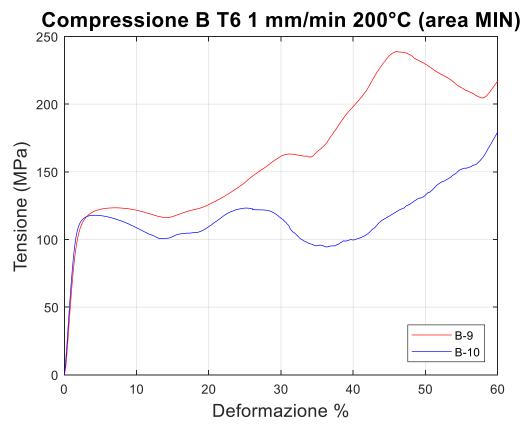


Figura 70: Grafico tensione-deformazione B T6 200°C

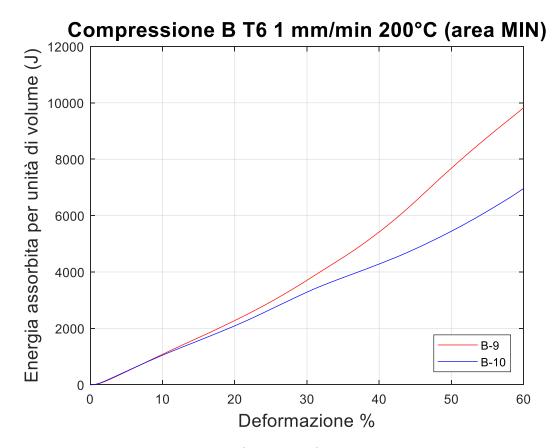


Figura 71: Grafico energia-deformazione B T6 200°C

C 200°C

I campioni analizzati sono collassati su sé stessi e arrivati a densificazione completa. Questo è stato possibile grazie all'aumento di temperatura che ha facilitato lo slittamento delle dislocazioni. I grafici risultano essere paragonabili a quelli di una schiuma ma il *T6 ha introdotto una certa instabilità nel comportamento del materiale*. Nella Tabella 18 è possibile notare i risultati della prova a compressione. In Figura 72, Figura 73 e Figura 74 sono mostrate le curve forzadeformazione, tensione-deformazione e energia-deformazione.

С Т6	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	F _{Rottura}
200°C	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
C-9	63,0	9148,58	80,4	1,47	17050,06	149,81
C-10	64,1	9119,55	80,1	1,46	29643,93	260,46
Media	63,6	9134,1	80,3	1,46	23347,0	205,1
Dev. Std.	0,8	20,5	0,2	0,01	8905,2	78,2
Dev. Std. %	1,2	0,2	0,2	0,54	38,1	38,1

Tabella 18: Valori ottenuti per provini C T6 200°C

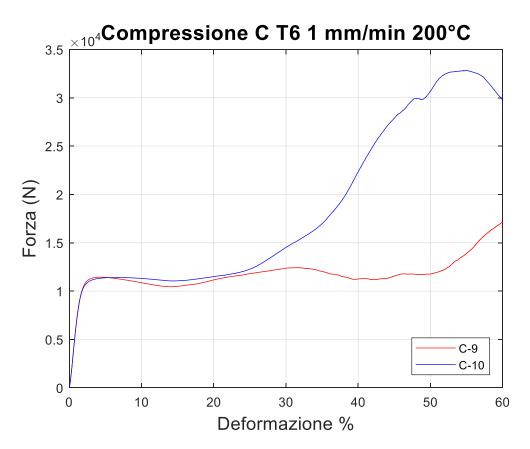


Figura 72: Grafico forza-deformazione C T6 200°C

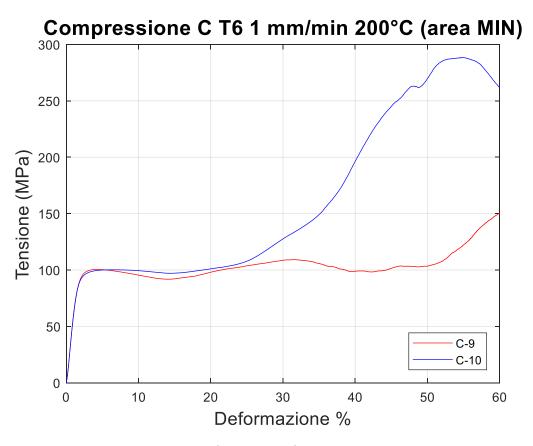


Figura 73: Grafico tensione-deformazione C T6 200°C

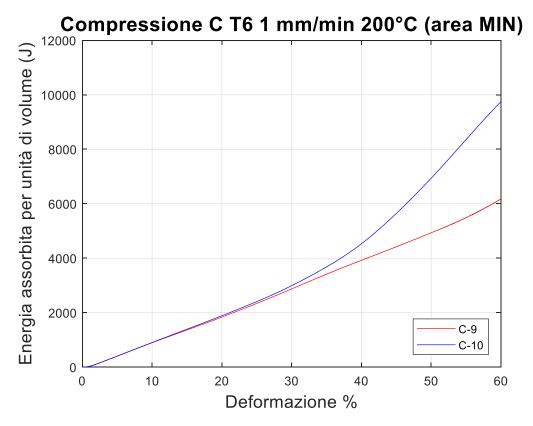


Figura 74: Grafico energia-deformazione C T6 200°C

5.3.3. Grafici di confronto

Confronto tra canali

Le valutazioni delle variazioni introdotte dai canali vengono effettuate sui provini trattati termicamente con lo stress relieving, di cui si hanno le curve complete per tutte le tipologie di provini. Si è deciso di optare per i provini SR poiché il materiale in condizione AS risultava eccessivamente fragile e permetteva comparazioni solo in campo elastico. I provini A vengono presi come riferimento per valutare l'effetto del canale.

Come si può notare in Figura 75, il modulo elastico delle tre tipologie non si discosta molto. Tutte le tipologie tendono a collassare con scivolamento lungo una delle diagonali e la perdita di materiale durante la prova, e questo è il motivo delle svariate cadute di tensione presenti sul grafico. Questo avviene in quanto la deformazione inizia lungo i piani di slittamento più favorevoli e meno energetici (presenza di difetti o microporosità) lungo una delle diagonali, per poi passare alla diagonale opposta e permettere il collasso della struttura. La tipologia B risulta leggermente meno rigida, con minore forza di primo picco (forza massima riscontrata precedentemente alla prima caduta di tensione) e minore energia assorbita rispetto alle controparti A e C. Tutti i dati sono mostrati in Tabella 19,Tabella 20 e Tabella 21.

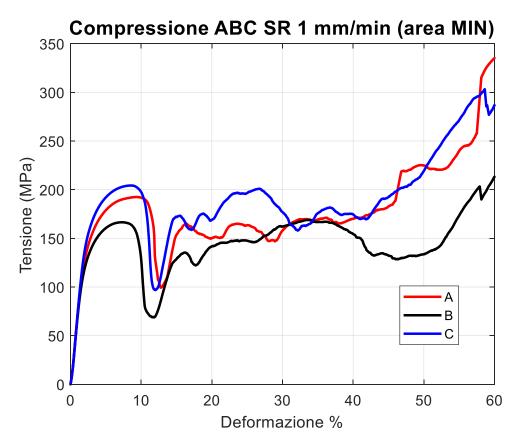


Figura 75: Confronto per la valutazione degli effetti del canale.

Nei provini C quindi l'introduzione del canale non abbassa le prestazioni meccaniche dei provini, ma addirittura resistono meglio della loro controparte senza canale. Sono la categoria di provini con la maggior energia assorbita e la più alta forza di picco. Tutto ciò nonostante la presenza di due punti di minimo dovuti allo scorrimento su piani a 45° diversi tra loro.

Contrariamente ai provini C SR, I provini B SR si sono dimostrati i meno resistenti della tipologia SR. La presenza del canale indebolisce la struttura e non essendo orientato a 45°, né lungo X né lungo Y, non crea un piano di scorrimento preferenziale. Si deve cercare quindi di non progettare i canali paralleli alle singole celle del reticolo ma, al contrario, che le taglino in diagonale.

In Figura 76 si può notare come a 200° il canale inserito non ha modificato sostanzialmente il tipo di rottura.

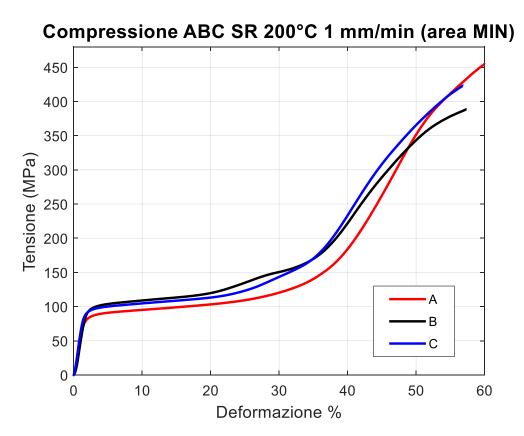


Figura 76: Confronto per la valutazione degli effetti del canale a 200°C.

Confronto tra Trattamenti Termici

La tipologia A è stata studiata in condizione As-Built in modo da poter valutare la differenza tra le caratteristiche meccaniche di questa struttura con quelle ottenute a seguito di un trattamento termico. Il trattamento termico scelto per effettuare il paragone è stato lo stress-relieving, poiché permette di mantenere la microstruttura additive ma eliminando le tensioni residue dovute al processo produttivo. Successivamente è stata effettuata una comparazione tra i due trattamenti termici in esame. In Figura 77 è possibile notare come il trattamento termico SR permetta mantenere un modulo elastico quasi costante a fronte di un aumento elevatissimo di duttilità. Questo incremento viene accompagnato da un mantenimento della tensione di snervamento, che rimane quasi invariata, e con un aumento esponenziale dell'assorbimento energetico. Quest'ultima caratteristica viene ulteriormente accentuata dalle prove in temperatura.

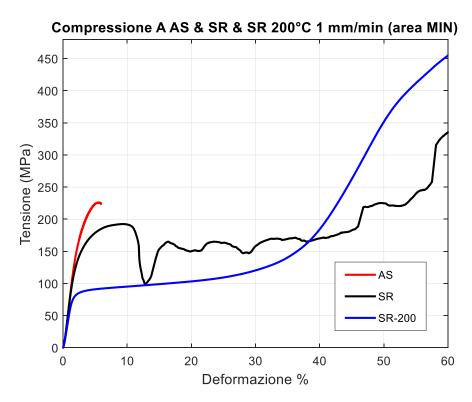


Figura 77: Confronto per la valutazione della struttura AS rispetto a SR.

Il trattamento termico T6 invece permette di ottenere delle strutture as-cast, annullando i benefici della microstruttura additive, e abbassando la deformabilità dei campioni. Oltre ad un abbassamento dell'energia assorbita per unità di volume rispetto ai provini SR (evidenziato in Tabella 21) si ha un abbassamento, seppur lieve, del modulo elastico.

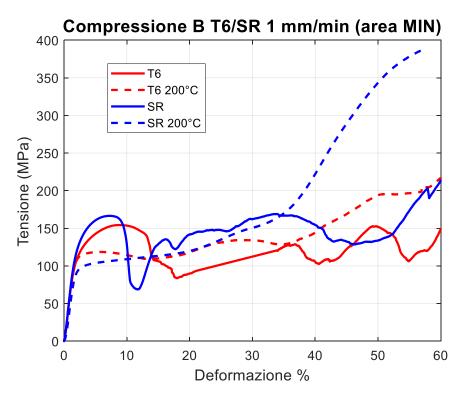


Figura 78: Confronto per la valutazione degli effetti dei diversi trattamenti termici nei provini B.

I provini B T6 a temperatura ambiente si sono dimostrati i meno resistenti di tutti in assoluto. Presentano modulo elastico, resistenza allo snervamento e tensione di rottura più bassa rispetto a qualsiasi altra tipologia di provino a temperatura ambiente. Il trattamento T6 irrigidisce il materiale a causa dell'ingrossamento del grano e ne modifica la capacità di deformazione; uno dei provini si è per questo rotto per instabilità. Al contrario dei provini SR però mantengono le loro proprietà anche a 200°C (Figura 78).

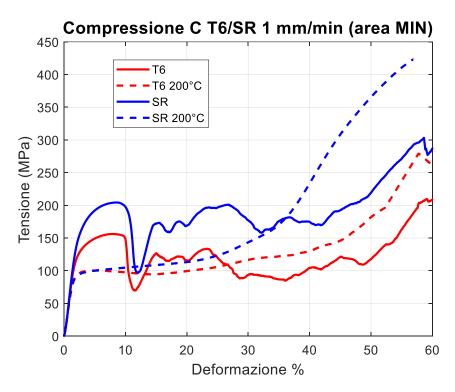


Figura 79: Confronto per la valutazione degli effetti dei diversi trattamenti termici nei provini C.

Nei C T6 a temperatura ambiente, l'introduzione del canale non abbassa le prestazioni meccaniche dei provini, i quale resistono lievemente meglio della loro controparte con canale dritto. Il trattamento T6 irrigidisce il materiale a causa dell'ingrossamento del grano e ne modifica la capacità di deformazione; nonostante ciò i provini non sono andati incontro a rottura fragile grazie al differente posizionamento del canale. Presentano modulo elastico simile ai provini B T6 ma una superiore resistenza allo snervamento, tensione di rottura e assorbimento energetico com'è possibile notare in Tabella 19, Tabella 20 e Tabella 21. Rispetto ai C SR a temperatura ambiente possiedono caratteristiche meccaniche inferiori e non mantengono le loro proprietà a temperatura superiore (200°C) come mostrato in Figura 79.

In definitiva il **T6 non è un trattamento termico consigliato per prodotti di additive**, in quanto oltre a essere più lungo e dispendioso non apporta alcun miglioramento alle prestazioni meccaniche del materiale, anzi le riduce e ne diminuisce l'affidabilità.

Confronto tra Temperatura d'impiego

È importante valutare quale sia stata la differenza di comportamento meccanico attribuibile alla Temperatura poiché, come si evince da Tabella 19, Tabella 20 e Tabella 21, le proprietà dei campioni ne sono fortemente influenzate.

Tutti i provini a 200°C tenderanno a collassare uniformemente mentre quelli a temperatura ambiente (trattati termicamente) tendono a collassare lungo le due diagonali principali della struttura.

A 200°C tutte le caratteristiche meccaniche del materiale peggiorano ad eccezione dell'assorbimento energetico. Tende ad aumentare poiché il collasso dell'intera struttura implica un maggior volume interessato da scorrimento plastico. Questo opponendo resistenza fa sì che sia necessaria maggiore energia per poter deformare il provino; la maggior parte dell'energia è infatti spesa nella parte finale del processo di deformazione cioè a fronte della densificazione totale della struttura come mostrato in Figura 80.

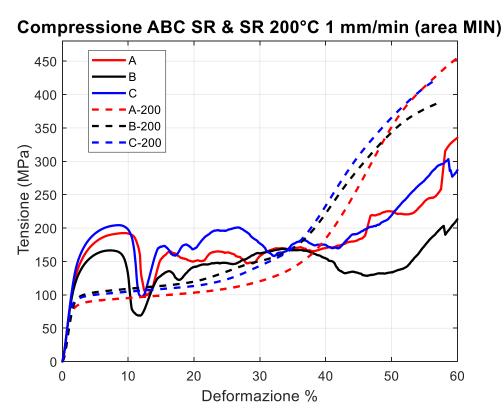


Figura 80: Confronto per la valutazione degli effetti della temperatura nei provini SR.

Il modulo elastico decresce per tutte le tipologie di provini ad eccezione dei B T6 che lo mantengono invariato. Per questa tipologia di provini anche la resistenza allo snervamento resta invariata al crescere della temperatura mentre in tutte le altre tipologie di provini questo parametro decresce (Figura 81). Tutti i dati possono essere valutati in Tabella 19, Tabella 20 e Tabella 21.

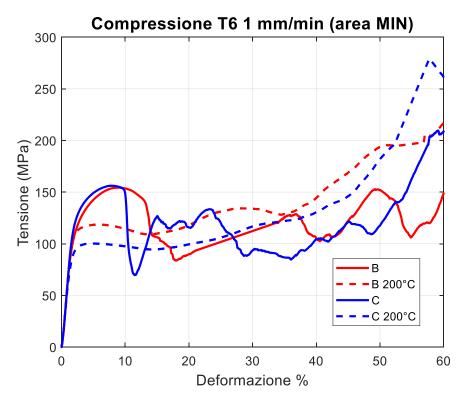


Figura 81: Confronto per la valutazione degli effetti della temperatura nei provini T6.

Il comportamento in temperatura quindi in generale penalizza le prestazioni meccaniche del materiale abbassandone rigidezza e tensione di snervamento. Questo deve essere tenuto presente in fase di progettazione in quanto è necessario che i manufatti finali non si trovino mai a dover lavorare in condizioni plasticità.

In Figura 82, Figura 83 e Figura 84 vengono mostrati i confronti fra tutti i provini in tutte le condizioni operative per ogni caratteristica studiata. La tipologia di provino C mantiene assorbimento energetico e modulo elastico costante al variare della temperatura mentre subisce lievi variazioni per quanto riguarda Tensione di Rottura e di Snervamento.

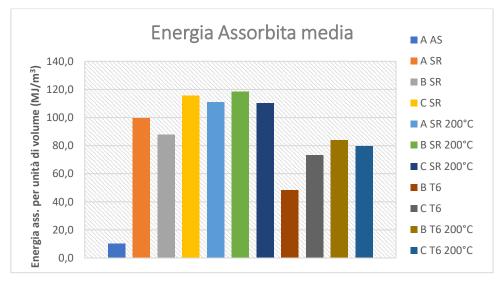


Figura 82: Confronto assorbimento energetico per tutti i provini in tutte le condizioni operative.

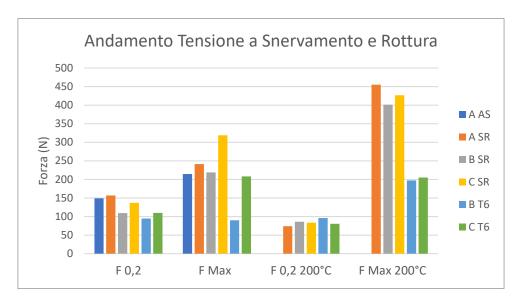


Figura 83: Confronto Tensione di Snervamento e Rottura per tutti i provini in tutte le condizioni operative.

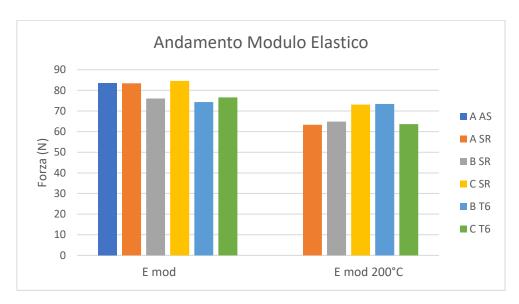


Figura 84: Confronto Modulo Elastico per tutti i provini in tutte le condizioni operative.

Provini	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	F _{Rottura}
11001111	GPa	N	MPa	Def%	N	Мра
A AS	86,7	16930,5	148,8	2,07	24427,2	214,6
A TT 25°C	83,4	14346,53	156,5	1,97	27459,3	241,3
B TT 25°C	76,0	12956,3	109,1	1,73	26001,9	218,9
C TT 25°C	84,6	13404,3	136,7	1,99	31270,0	318,9
B T6 25°C	74,3	10753,2	94,5	1,56	10238,6	90,0
C T6 25°C	76,6	12494,0	109,8	1,76	23694,4	208,2

Tabella 19: Proprietà medie campioni a 25° C.

Provini	E _{mod}	F0,2	F0,2	dL a F0,2	F _{Rottura}	F _{Rottura}	
	GPa	N	MPa	mm	N	Мра	
A TT 200°C	63,3	8431,8	74,09	1,5	51764,2	454,8	
B TT 200°C	64,9	9779,9	85,9	1,8	45653,3	401,1	
C TT 200°C	73,1	9518,2	83,6	1,5	48550,3	426,6	
B T6 200°C	73,4	10929,6	96,0	1,6	22424,0	197,0	
C T6 200°C	63,6	9134,1	80,3	1,5	23347,0	205,1	

Tabella 20: Proprietà medie campioni a 200°C.

Energia Ass. per unità di volume (MJ/m³)	A AS	A TT	ВТТ	СТТ	A TT 200°C	B TT 200°C	C TT 200°C	В Т6	С Т6	В Т6 200°С	C T6 200°C
media	10,3	99,4	87,9	115,5	111,0	118,3	110,1	48,3	73,3	84,0	79,6
dev. Std	0,7	22,8	5,6	14,0	0,0	7,8	1,6	41,5	0,2	20,3	25,3
dev. Std %	6,8	23,0	6,3	12,1	0,0	6,6	1,4	85,9	0,3	24,1	31,7

 ${\it Tabella~21: Assorbimento~energetico~medio.}$

6. Simulazioni Numeriche

Dallo sviluppo dei moderni calcolatori, l'uso delle simulazioni numeriche è diventato sempre più un passo fondamentale nella valutazione dei modelli. Il metodo degli elementi finiti infatti permette di ottenere delle stime del comportamento di un oggetto sottoposto ad un fenomeno fisico di qualsivoglia natura. Più in generale si può considerare il metodo FEM⁴ come una tecnica numerica in cui il problema viene approssimato e risolto trasformando delle equazioni alle derivate parziali in sistemi algebrici più semplici.

Il processo consiste nell'iterazione di calcoli su elementi infinitesimi del pezzo (mostrati in Figura 85), in modo da valutare microscopicamente la risposta del manufatto.

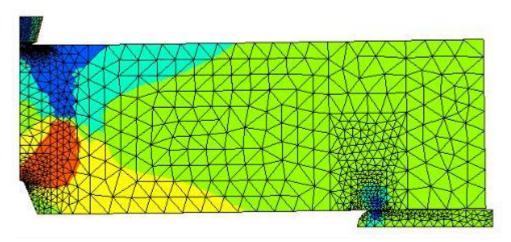


Figura 85: Esempio di mesh per simulare prova a impatto charpy [31].

Questi elementi possono essere 1D, 2D o 3D in modo da approssimare il problema a condizioni di più facile calcolo. Questa approssimazione viene ottenuta a scapito della precisione della soluzione.

Vale la regola, come nella maggior parte dei sistemi informatici, che se vengono inseriti dei parametri non corretti all'interno del modello otterremmo comunque un risultato, ma aleatori e senza valore scientifico.

Per questo motivo ha di fondamentale importanza la corretta modellizzazione di ogni fenomeno in modo da poter assicurare validità al risultato finale.

Nonostante esistano altri metodi numerici (FDM o metodo delle differenze finite, FVM o metodo dei volumi finiti ecc.) il FEM rappresenta attualmente il metodo di analisi numerica maggiormente utilizzato nella comunità scientifica. Tutti i metodi di analisi numerica però suddividono il processo in tre tempi:

- *Pre-Processing,* in cui si studia il fenomeno fisico e se ne crea un modello;
- Processing, in cui si elabora il modello precedentemente sviluppato;
- Post-Processing, in cui si analizza il risultato dell'elaborazione.

Ognuna di queste parti dell'analisi può essere elaborata con un software specifico oppure esistono delle piattaforme che permettono di seguire l'intero flusso di lavoro.

-

⁴ FEM = Finite Element Method

6.1. Piattaforma software

Il solutore utilizzato per lo studio è stato Code_Aster, sviluppato sin dall'inizio degli anni 90' dall'azienda francese Energie De France (EDF)[32], per poter valutare e simulare fenomeni meccanici, termici e acustici.

Il software è stato distribuito con una licenza Open-Source, il che permette a chiunque ne abbia la voglia e le competenze per poterlo modificare. Questo ha permesso la formazione di una folta comunità internazionale attorno all'utilizzo dello stesso. Ogni due anni inoltre il codice viene ufficialmente aggiornato e vengono inserite sul sito tutorial e guide inerenti al suo utilizzo. Code_Aster è stato ultimamente inglobato in una piattaforma (sempre open) che ne migliora l'interfaccia grafica e ne permette un'espansione tramite i moduli di progettazione, di mesh e infine di valutazione dei risultati.

Salomè-meca è il nome della piattaforma software che permette il controllo dell'intero flusso di lavoro; è stato inizialmente sviluppato per girare su sistemi Linux ma di recente ne è stata sviluppata una versione per Windows. Questo è stato possibile poiché tutte le librerie e i codici sorgente del programma sono basati su un linguaggio di programmazione avanzato ed evoluto: Python. Tramite i suoi moduli è in grado di:

- Progettare manufatti tramite un modulo CAD abbastanza user-friendly (GEOM);
- Creare la mesh del manufatto che servirà successivamente per il calcolo agli elementi finiti (SMESH);
- Produrre un file .txt adeguato per il solutore (Eficas o ASTK);
- Visualizzare set di dati bidimensionali o tridimensionali (Paravis);

I primi tre moduli vengono utilizzati durante la fase di pre-processing mentre l'ultimo durante il post-processing. Da qui è chiara l'importanza della prima fase del lavoro, la più onerosa in termini di tempo, che necessita non solo di una corretta formulazione del modello, ma anche della sua parametrizzazione in termini numerici.

6.2. Pre-Processing

In questa fase, una volta ottenuto il modello CAD da analizzare, bisogna prima di tutto impostare il problema dal punto di vista geometrico. Questo avviene cercando delle simmetrie per semplificare il calcolo e creando le superfici che verranno sfruttate per imporre i vincoli; successivamente si passerà a suddividere il pezzo in elementi finiti e definire la mesh. Quest'ultima è funzione non solo della tipologia di fenomeno da studiare, ma anche dal tipo di elemento scelto per rappresentare il sistema (1D, 2D o 3D) e dal tipo di calcolo che si vorrà effettuare (statico, dinamico, lineare, non lineare ecc.). Infine, bisognerà creare il file .txt che varrà elaborato dal solutore. Il solutore è un codice specifico a cui viene affidato il compito di risolvere il sistema modellizzato. Prima di avviare il calcolo di solito però vengono effettuati alcuni controlli che

permettono di valutare la bontà delle informazioni immesse nel calcolatore. Non tutti i problemi però possono essere previsti e eliminati con i controlli iniziali.

6.2.1. La geometria studiata e la mesh

Si è partiti dal modello CAD della singola cella in modo da poter iniziare la semplificazione del calcolo. Il modello utilizzato è mostrato in Figura 86.a) mentre in Figura 86.b) è possibile notare la parametrizzazione usata per la mesh. Si sono utilizzati esclusivamente tetraedri del 1° ordine in modo da non pesare eccessivamente sulla CPU per il calcolo. L'aggiunta di elementi del 2° ordine infatti permette di ottenere una precisione della soluzione maggiore ma a discapito della potenza di calcolo necessaria.

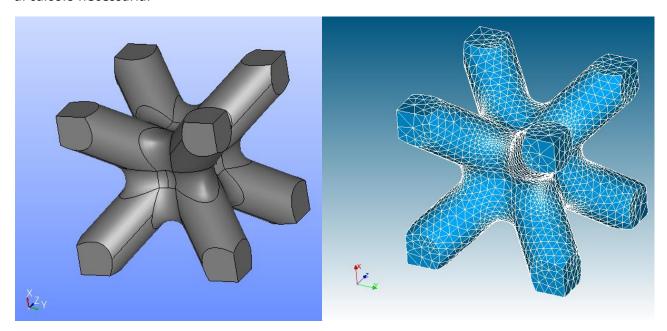


Figura 86: a) Geometria studiata, b) mesh.

La mesh è stata generata tramite degli algoritmi di creazione automatizzati presenti all'interno del software; l'algoritmo usato è stato il "NETGEN 1D-2D-3D" applicando l'ipotesi di massima dimensione degli elementi tetra.

Una volta creata la mesh sono state estrapolate le superfici sulle quali applicare i vincoli. Le superfici vengono considerate dal solutore come un insieme di punti di integrazione: i nodi della mesh. Ad ogni nodo corrisponde un punto in cui verranno calcolati i campi o i gradienti della struttura. Nel caso di un'analisi meccanica nei nodi verranno calcolati gli spostamenti, che tramite una matrice di rigidezza, permetterà di definire deformazioni e tensioni. Ovviamente per permettere al solutore di valutare questi campi sarà necessario associare a ogni nodo una proprietà di materiale.

In funzione della tipologia di simulazione che si intende lanciare sarà possibile utilizzare proprietà di materiale differente:

- Nel caso di una simulazione meccanica in campo elastico, si potrà utilizzare la legge di materiale sviluppata per i materiali isotropi omogenei (basterà inserire modulo elastico e coefficiente di Poisson);
- Per una simulazione termica lineare servirà inserire nel sistema le caratteristiche termiche del materiale (conduttività termica e calore specifico volumetrico) e utilizzare la legge di materiale per i materiali con conduzione del calore isotropica;
- Se si vuole ottenere una simulazione meccanica in campo plastico sarà necessario inserire all'interno del sistema la curva non solo la caratteristica tensione-deformazione reale del materiale ma anche in che modo questa curva viene percorsa (ad esempio se con incrudimento cinematico o isotropo).

6.2.2. Il modello di materiale

Per poter valutare il comportamento meccanico del manufatto in fase plastica è stato necessario fornire al solutore anche i parametri per modellizzare la plasticità del materiale. Si è utilizzata una legge di materiale definita "elastoplasticità di Von Mises con incrudimento isotropico non lineare" che si rifà alla Teoria incrementale della plasticità; se consideriamo la funzione di snervamento come una superficie, allora la legge di incrudimento ci permette di definire in che modo essa trasli o si espanda. In questo caso utilizzeremo il modello di incrudimento isotropo, il quale asserisce che la superficie di snervamento si espanda in modo uguale in tutte le direzioni.

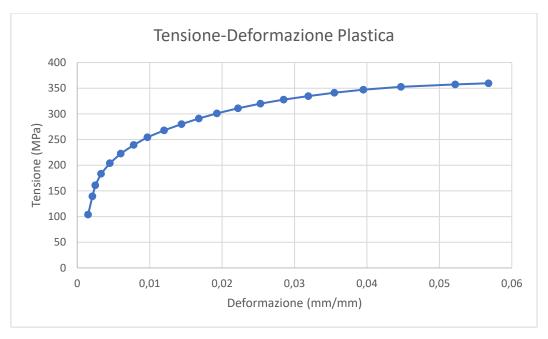


Figura 87: Grafico Tensione-Deformazione Plastica.

Il solutore ha quindi la necessità di valutare in che modo l'incremento plastico si sviluppi tenendo conto della strizione; la curva Tensione-Deformazione Ingegneristica (ENG) però non permette di ottenere queste informazioni. Per poter inserire nel sistema le informazioni corrette si è quindi

dovuto fare uso delle formule di Hollomon (Equazione 4 e Equazione 5) per ricavare la curva Tensione-Deformazione Reale (TRUE).

$$\varepsilon_{TRUE} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_{ENG})$$

Equazione 4: Formula di Hollomon per la Deformazione Reale.

$$\sigma_{TRUE} = \frac{F}{A} = \sigma_{ENG}(1 + \varepsilon_{ENG})$$

Equazione 5: Formula di Hollomon per la Tensione Reale.

Alla fine, è stato eliminato il contributo elastico in modo da inserire nel modello la curva Tensione – Deformazione Plastica (Equazione 6) come richiesto dal solutore [33].

$$\varepsilon_{PLAS} = \varepsilon_{TRUE} - \frac{\sigma_{TRUE}}{E}$$

Equazione 6: Formula per ottenere la Deformazione plastica.

La curva ottenuta è mostrata in Figura 87,le curve ingegneristiche sono state ottenute tramite test di trazione uniassiali su provini ad osso di cane precedentemente studiati e fabbricati tramite il medesimo processo utilizzato per i provini di questo studio. In Figura 88 è possibile notare tutte le impostazioni usate per il calcolo delle Tensioni applicando un modello "statico non lineare".

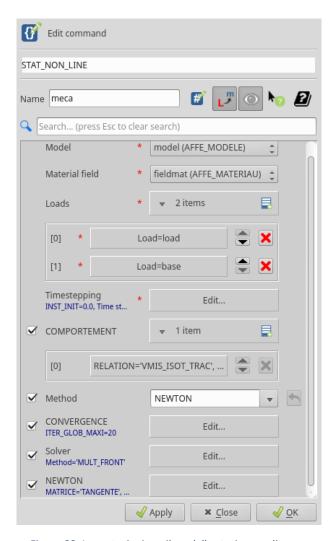


Figura 88: Impostazioni per il modello statico non lineare.

6.3. Processing e Post-Processing

Una volta ottenuto il file con le istruzioni per il solutore durante il pre-processing, il processing consiste nell'eseguirlo tramite il modulo Aster_Study e aspettare che venga elaborata una mesh di punti con le informazioni elaborate. Durante questa fase avvengono i controlli da parte del solutore delle varie impostazioni settate ed eventualmente, nel caso in cui delle informazioni siano incoerenti, l'uscita dal processo. Nell'eventualità in cui questo succedesse, il programma produce un file .txt in cui vengono stampati tutti i calcoli effettuati dal solutore prima di terminare il processo e il motivo dell'interruzione. Questo permette spesso di risalire alle cause della chiusura del programma, ma non sempre.

Infine, l'insieme di nodi valutati dal solutore viene elaborato graficamente tramite un postprocessor. Ne esistono una moltitudine, commerciali e non, ma per questo studio si è scelto di utilizzare il modulo inserito all'interno di Salomè: Paravis, versione customizzata per la piattaforma del ben più famoso Paraview.

Tramite questo software è stato possibile estrapolare Figura 89 in cui si nota la tensione calcolata nei nodi del reticolo. È evidente che la parte più sollecitata sia il centro della cella, attorno al quale

le strut flettono. Come si può notare al livello di tensioni si arriva fino a 247 MPa, superando abbondantemente il limite di snervamento del materiale.

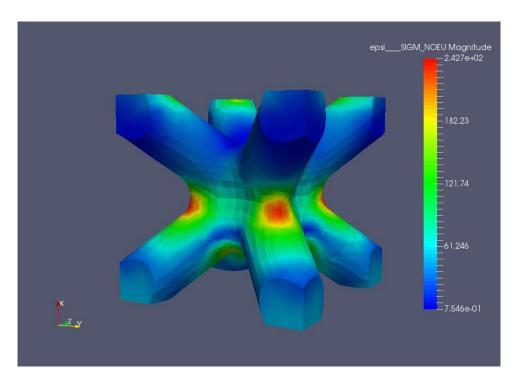


Figura 89: Risultato elaborazione nel centro della cella.

In Figura 90 e Figura 91 sono mostrate le facce su cui sono stati posti i vincoli dell'elaborazione. Sulla faccia superiore in Figura 90 è stata applicata una forza di 50 N che ha svolto una sollecitazione sia tra le strut più alte/basse che tra le strut poste sullo stesso livello. Nel piano di base non sono state riscontrate tensioni degne di nota, come mostrato in Figura 91.

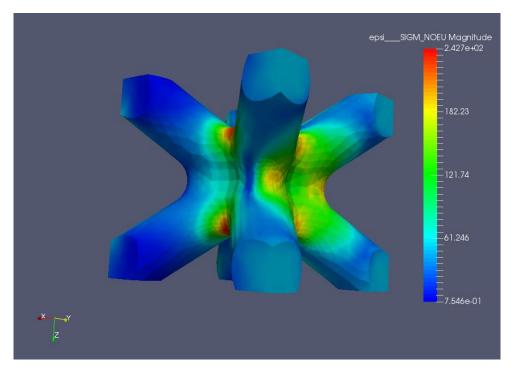


Figura 90: Risultato elaborazione sulla faccia della cella sottoposta a una pressione.

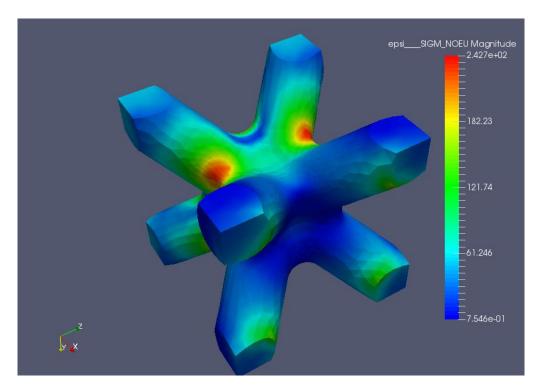


Figura 91 Risultato elaborazione sulla faccia della cella scarica.

Il tipo di sollecitazione applicata nei due differenti piani non è però dello stesso tipo; in Figura 92 sono stati messi in evidenza i due differenti tipi di sollecitazione. Essendo la strut posta in flessione crea un campo di tensioni di trazione nella zona superiore (178 MPa in rosso) mentre al centro della cella si crea un campo di tensioni di compressioni molto elevato (240 MPa in blu).

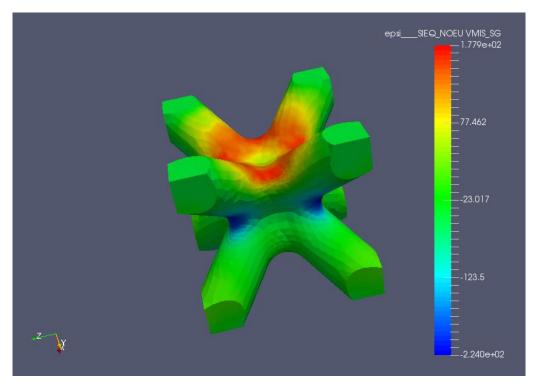


Figura 92: Tensioni di Von Mises.

La struttura si trova quindi in uno stato complesso di tensioni che porta il materiale ad incrudirsi. Se lo stato tensionale è già critico, per la formazione di tensioni residue dovute al raffreddamento, si rischia di ottenere una rottura fragile per triassialità del carico. Lo slittamento a 45° è causato dalle tensioni τ_{xy} e τ_{xz} , evidenziate in Figura 93, e dalle aste di rinforzo su Z poste nelle celle esterne del provino, fenomeno non studiato in questo elaborato.

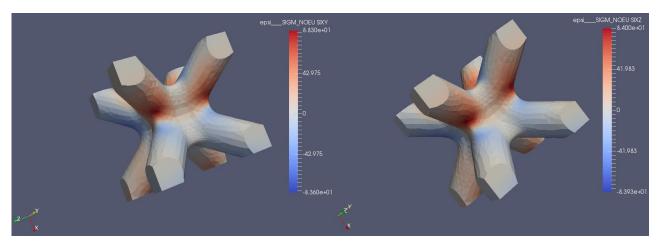


Figura 93: Valutazione delle tensioni τ_{xy} e τ_{xz} .

7. Conclusioni e sviluppi futuri

In questo studio è stata analizzata la risposta meccanica di provini trabecolari prodotti tramite additive manufacturing. L'analisi della particolare struttura dei provini è servita per comprendere in che modo si potessero coniugare delle esigenze meccaniche (rigidezza e resistenza necessarie per il manufatto finale) alla possibilità di ottimizzare lo scambio di calore (necessaria per mantenere temperature di utilizzo in un range accettabile). I provini sono stati sottoposti a prove di compressione sia a temperatura ambiente che a 200°C. Sono state valutate 3 tipologie di provino, denominate A, B o C in base alla presenza e orientazione di un canale. I provini sono stati valutati sia As-Built che a seguito di due diversi trattamenti termici: Stress-Relieving o T6. Con le simulazioni numeriche è stato possibile analizzare i punti più critici (dal punto di vista meccanico) delle strutture e ipotizzare le modalità di frattura. Tramite termografia, l'analisi di video ad alta frequenza di acquisizione e microscopia è stato possibile confermare e validare le ipotesi elaborate per mezzo di simulazione numerica.

In conclusione, è possibile notare come la tipologia di *provini C, cioè con il canale a 45°, sia la migliore rispetto a tutte le caratteristiche meccaniche valutate, in ogni condizione operativa*.

Dalle prove si è inoltre notato che:

- Tutte le tipologie tendono a collassare con scivolamento lungo una delle diagonali e la
 perdita di materiale durante la prova. Questo avviene in quanto la deformazione inizia
 lungo i piani di slittamento più favorevoli e meno energetici (presenza di difetti o
 microporosità) lungo una delle diagonali, per poi passare alla diagonale opposta e
 permettere il collasso della struttura. Quindi il canale inserito non ha modificato
 sostanzialmente il tipo di rottura;
- Il trattamento termico T6 permette di ottenere delle strutture as-cast, annullando i benefici della microstruttura additive, e abbassando la deformabilità dei campioni. Oltre ad un abbassamento dell'energia assorbita per unità di volume si ha un abbassamento, seppur lieve, del modulo elastico;
- In definitiva il **T6 non è un trattamento termico consigliato per prodotti di additive**, in quanto oltre a essere più lungo e dispendioso non apporta alcun miglioramento alle prestazioni meccaniche del materiale, anzi le riduce e ne diminuisce l'affidabilità;
- Al contrario il trattamento di stress relieving permette di mantenere le strutture ultrafini
 ottenute tramite tecnologia additive e di distendere le tensioni residue create dai rapidi
 processi di fusione e raffreddamento. Oltre essere vantaggioso dal punto di vista
 economico e di time-consuming, aumenta la duttilità del materiale a fronte di una lieve
 diminuzione del modulo elastico e del carico di snervamento;
- A 200°C tutte le caratteristiche meccaniche del materiale peggiorano ad eccezione dell'assorbimento energetico; questo tende ad aumentare poiché il collasso dell'intera struttura implica un maggior volume interessato da scorrimento plastico. Perciò

opponendo resistenza fa sì che sia necessaria maggiore energia per poter deformare il provino; la maggior parte dell'energia è infatti spesa nella parte finale del processo di deformazione cioè a fronte della densificazione totale della struttura;

- Le simulazioni numeriche ci hanno permesso di comprendere il meccanismo di rottura del materiale (scorrimento dei piani a 45° rispetto l'applicazione del carico) e si sono confermati un potente metodo per predire il comportamento dei campioni; implementando lo scambio termico si potrebbe ulteriormente riuscire a simulare anche la capacità di disperdere il calore del manufatto;
- La termografia e l'acquisizione di immagini ad alta frequenza ci ha permesso di avvalorare l'ipotesi ottenuta tramite simulazione e di comprendere meglio il meccanismo di rottura dei campioni. Tramite la microscopia si sono inoltre ottenute preziose informazioni sulle superfici di rottura.

Si possono già tracciare quelli che potrebbero essere degli interessanti sviluppi futuri:

- Valutare l'influenza dello strain-rate sull'assorbimento energetico e studiare la variazione della risposta in situazioni di stress dinamici;
- Implementare un modello termico sul simulatore FEM in modo da predire il comportamento della struttura come scambiatore di calore;
- Analizzare il comportamento della struttura sottoposta a stress termomeccanici in modo da valutare la risposta della struttura in temperatura.

Bibliografia

- [1] "http://www.stampproject.it/.".
- [2] L. J. GIBSON, M. F. ASHBY, Cellular Solids: Structure & Properties. Pergamon Press, 1988.
- [3] P. M. Yves Klett, Marc Grzeschik, "Comparison of Compressive Properties of Periodic Non-flat Tessellations," *Origami 6*, vol. 2, no. 5, pp. 371–384, 2015.
- [4] M. G. Rashed, M. Ashraf, R. A. W. Mines, and P. J. Hazell, "Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications," *Materials and Design*, vol. 95. pp. 518–533, 2016.
- [5] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young, J. Huang, and W. Zhu, "Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 628, pp. 238–246, 2015.
- [6] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, and K. S. V. Sekar, Manufacturing engineering and technology. 2014.
- [7] J. Brennan-Craddock, D. Brackett, R. Wildman, and R. Hague, "The design of impact absorbing structures for additive manufacture," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 382, no. 1, 2012.
- [8] ASTM F3187, "Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals 1," pp. 1–22, 2018.
- [9] Ż. A. Mierzejewska, "Process Optimization Variables for Direct Metal Laser Sintering," *Adv. Mater. Sci.*, vol. 15, no. January.
- [10] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E. P. Ambrosio, and E. Atzeni, "From powders to dense metal parts: Characterization of a commercial alsimg alloy processed through direct metal laser sintering," *Materials (Basel).*, vol. 6, no. 3, pp. 856–869, 2013.
- [11] U. Tradowsky, J. White, R. M. Ward, N. Read, W. Reimers, and M. M. Attallah, "Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development," *Mater. Des.*, vol. 105, pp. 212–222, 2016.
- [12] F. Trevisan *et al.*, "On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: Process, microstructure, and mechanical properties," *Materials (Basel).*, vol. 10, no. 1, 2017.
- [13] A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson, and P. Young, "Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 7. pp. 1019–1026, 2013.
- [14] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, S. L. Bubb, P. Young, and D. Raymont, "Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 4. pp. 856–864, 2014.
- [15] D. V. S. . F. N. A. . A. M.F., "Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 49(8), pp. 1747–1769, 2001.
- [16] M. Smith, Z. Guan, and W. J. Cantwell, "Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 67. pp. 28–41, 2013.
- [17] J. Chu, S. Engelbrecht, G. Graf, and D. W. Rosen, "A comparison of synthesis methods for cellular structures with application to additive manufacturing," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 16, no. 4, pp. 275–283, 2010.

- [18] S. Y. Choy, C.-N. Sun, K. F. Leong, and J. Wei, "Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting," *Materials & Design*, vol. 131. pp. 112–120, 2017.
- [19] A. Panesar, M. Abdi, D. Hickman, and I. Ashcroft, "Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 19, no. November, pp. 81–94, 2017.
- [20] I. Maskery, N. T. Aboulkhair, A. O. Aremu, C. J. Tuck, and I. A. Ashcroft, "Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices," *Addit. Manuf.*, vol. 16, pp. 24–29, 2017.
- [21] A. O. Aremu *et al.*, "A voxel-based method of constructing and skinning conformal and functionally graded lattice structures suitable for additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 13, pp. 1–13, 2017.
- [22] P. Zhang *et al.*, "Efficient Design-Optimization of Variable-Density Hexagonal Cellular Structure by Additive Manufacturing: Theory and Validation," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 137, no. 2, p. 021004, 2015.
- [23] S. Daynes, S. Feih, W. F. Lu, and J. Wei, "SANDWICH STRUCTURES WITH 3D PRINTED FUNCTIONALLY GRADED LATTICE CORES," no. August, pp. 20–25, 2017.
- [24] Eosint, "EOSINT M 270," 2017.
- [25] N. T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, and N. M. Everitt, "The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 667, pp. 139–146, 2016.
- [26] O. Eos, P. A. Speed, O. Eos, and P. A. Speed, "Material data sheet EOS Aluminium AlSi10Mg Material data sheet Technical data," vol. 49, no. 0, pp. 1–5, 2014.
- [27] I. Standard, "ISO 13314 Mechanical testing of metals, ductility testing, compression test for porous and cellular metals," *Ref. number ISO*, vol. 13314, no. 13314, pp. 1–7, 2011.
- [28] V. S., "Design and cheracterization of trabecular structures of aluminum alloy produced by DMLM for aeronautical sandwich panels," Politecnico di Torino, 2016.
- [29] "http://help.solidworks.com/2016/italian/solidworks/sldworks/t_measure_internal_volume.htm," 2018.
- [30] "https://it.wikipedia.org/wiki/ImageJ," 2018.
- [31] C. Durand, "Free Software for Computational Mechanics: Edf' S Choice."
- [32] T. D. E. Soza, "Introduction to Code _ Aster," 2012.
- [33] R. L. Jean-pierre and R. L. Jean-pierre, "Operator DEFI MATERIAU Code Aster," 2018.