POLITECNICO DI TORINO

COLLEGIO DI INGEGNERIA MECCANICA, AEROSPAZIALE, DELL'AUTOVEICOLO E DELLA PRODUZIONE

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Progettazione, comportamento meccanico e ottimizzazione topologica di

strutture cellulari metalliche realizzate mediante processi additivi



Relatore

Prof. Giovanni Maizza

Tesi di laurea di:

Leonardo Politi

Sommario

In questo lavoro di tesi sono state prodotte ed analizzate varie architetture di strutture cellulari reticolari con lo scopo di correlare i parametri geometrici delle singole celle con le proprietà meccaniche in campo elastico.

Lo studio si basa su un workflow innovativo di progettazione per componenti meccanici integrati in modo parziale o totale con strutture cellulari reticolari.

I provini sono stati progettati e realizzati utilizzando una polvere di Alluminio AlSi10Mg con l'ausilio della tecnologia "Direct Metal Printing" e poi sottoposti a prove di compressione. I nodi di connessione del reticolo sono stati concepiti come regioni sferiche e, per la prima volta, si intendono come diretti responsabili delle proprietà meccaniche.

I risultati sperimentali evidenziano interessanti prestazioni meccaniche dei reticoli. In particolare, queste ultime sono state correlate con i principali parametri geometrici di reticolo introdotti nei moderni software di progettazione dedicati alle tecnologie additive.

Infine è stata analizzata la difettosità indotta dal processo mediante una tecnica non distruttiva di *microtomografia* computerizzata sull'intera struttura cellulare al fine di stabilire una correlazione diretta tra porosità e parametri geometrici della cella. Inoltre è stato possibile determinare come i parametri geometrici della cella influenzino la porosità in corrispondenza dell'interfaccia tra il reticolo e la parete solida supportata.

I risultati di questa ricerca hanno permesso di stabilire una innovativa pratica di progettazione dei componenti integrati con strutture cellulari reticolari.

Parole Chiave: Additive Manufacturing; Strutture cellulari; Progettazione di strutture cellulari reticolari; Microtomografia Computerizzata; Porosità; Componenti alleggeriti lattice-integrati

Abstract

In this work, different lattice structures are analyzed in order to identify the existing correlations between mechanical properties in elastic field and the cell parameters.

The investigation is based on an innovative workflow design for partial or total integrated lattice structures into mechanical components.

The specimens are design and fabricated using AlSi10Mg aluminum powder by "Direct Metal Printing" technology and consequently, investigated with compression tests. The nodes are designed like spheroidal regions, and, following a new approach, they are considered directly responsible for the mechanical properties of the lattice.

The experimental results show interesting mechanical properties of lattice structures.

It was possible to relate these properties to the principal lattice geometric parameters used in modern AM design software.

Lastly, the defects introduced in the manufacturing phase are investigated through *nondescruting* tests such as microcomputed tomography. The entire lattice structure is analyzed in order to correlate porosity and geometrical parameters of the base cell.

Furthermore, it was possible to determine how the cell parameters influence the porosity in the lattice-bulk interface regions.

The results obtained in this thesis work have allowed to define an innovative design process for integrated lightweight lattice components.

Keywords: Additive Manufacturing; Lattice Structures; Design of lattice structures; Microcomputed tomography; Porosity analysis; Integrated lightweight lattice-bulk components.

Indice	1
Indice delle Figure	3
Indice delle Tabelle	6
Capitolo 1	7
Introduzione	7
1.1 I materiali cellulari	9
1.2 Realizzazione di strutture cellulari	11
1.3 L' Additive Manufacturing	12
1.3.1 Tecnologia AM a letto di polveri metalliche	12
1.3.2 La tecnologia DMP	13
1.3.3 Schema di funzionamento generale macchinari AM laser.	14
1.3.4 Fasi operative del processo.	16
1.3.5 Fasi del ciclo di lavorazione	18
1.3.6 Fisica del processo	19
1.4 Teoria di base dei materiali cellulari	21
1.4.1 Comportamento sforzo-deformazione di strutture cellulari	21
1.4.2 Descrizione geometrica delle celle: il criterio di stabilità di Maxwell	22
1.5 Difficoltà nella modellazione di componenti contenenti strutture reticolari	
1.6 La Progettazione di strutture cellulari reticolari	31
1.6.1 Stato dell'arte della Progettazione	31
1.6.2 Analisi agli Elementi Finiti	36
1.6.3 Correzione dei modelli di simulazione	38
1.7 Integrazione delle strutture cellulari reticolari a componente	39
Capitolo 2	40
Progettazione di componenti alleggeriti mediante l'introduzione di strutture cellulari reticolari	40
2.1 Proposta di un modello di workflow di progettazione e ottimizzazione topologica	40
2.1.1 Pre-processo	42
2.1.2 Simulazione agli Elementi Finiti Solidi	44
2.1.3 Ottimizzazione topologica	44
2.2 Considerazioni sul metodo progettuale proposto	45
Capitolo 3	47
Le strutture cellulari reticolari periodiche: provini, prove meccaniche e risultati	47
3.1 Realizzazione dei provini	48
3.1.1 Scelta delle caratteristiche geometriche dei provini	48
3.1.2 Scelta dei <i>parametri</i> geometrici della struttura cellulare reticolare	50
1.3 Disegno e realizzazione dei provini	53
3.2 Test di compressione	56

2 Indice

2.2 D': 1/4' 1.11	50
3.3 Risultati delle prove sperimentali	
3.3.1 Le prestazioni meccaniche dei provini	
Capitolo 4	61
Analisi dei risultati delle prove sperimentali	61
4.1 Misurazione delle proprietà fisiche con bilancia idrostatica	61
4.1.1 Base teorica della misurazione	61
4.1.2 Criticità nella misurazione	62
4.1.3 Misurazioni, risultati e prime considerazioni	63
4.2 Osservazione dei provini con microscopio ottico	67
4.2.1 Analisi delle dimensioni reali dei provini	68
4.2.2 Micrografia dei nodi e delle aste dei reticoli	70
4.3 Effetto frazione di volume totale e del rapporto Dn/Dc sulla resistenza a compressione cellulari reticolari	
4.3.1 Studio delle proprietà elastiche di reticolo in funzione del rapporto Dn/Dc	79
4.3.2 Studio del carico di snervamento in funzione del rapporto Dn/Dc	83
4.5 Studio della zona di separazione tra struttura cellulare reticolare e parete solida	86
Capitolo 5	90
La porosità all'interno di un componente integrato con strutture cellulari reticolari	90
5.1 Analisi della Porosità	90
5.1 La tomografia microCT	91
5.2.1 Il provino per l'analisi tomografica	94
5.2.1 Acquisizione dell'immagine CT	
5.2.2 Risultati della tomografia	
5.2.2 Considerazioni sulle regioni di contorno tra reticolo e parete solida	
Capitolo 6	
Conclusioni	
Bibliografía	
Dionograna	107

Figura 29. Provino sottoposto a compressione (a sinistra), schema della macchina di
test (a destra) [18]56
Figura 30.Curva Carico-Deformazione per il provino numero 1058
Figura 31. Provino sottoposto a carico di compressione fino allo scorrimento del primo
piano 59
Figura 32. Bilancia idrostatica utilizzata per la misurazione
Figura 33. Curva Err% - Dc (diametro di asta)65
Figura 34. Acquisizioni e misurazione delle dimensioni delle strutture cellulari67
Figura 35. Bordo della traccia di scansione: scansione del nodo (1) scansione delle
sole aste (3), scansione della zona di congiunzione aste-nodo (4)69
Figura 36. Ingrandimento di due tracce di scansione in corrispondenza del nodo.
Struttura con diametro di nodo nominale da 1.65mm (A), struttura con diametro di
nodo nominale di 0.3mm (B)70
Figura 37. Reticoli inglobati in matrice polimerica epossidica71
Figura 38. Micrografia di reticolo 7. Le tracce di scansione hanno dimensione
differente in funzione della loro posizione all'interno del nodo. Le tracce di scansione
in corrispondenza del layer di congiunzione aste-nodo hanno forma allungata72
Figura 39. Micrografia della struttura 7: le tracce di scansioni sono ben visibili,
specialmente applicando il filtro dark field che mette in risalto le zone scure (a destra)
72
Figura 40.Tracce di scansione (in blu) ai vari livelli di una struttura cellulare reticolare:
scansione delle aste (1), scansione delle aste e del bordo del nodo separatamente
(3), scansione del layer di congiunzione delle aste e del nodo (4,5), scansione del
solo nodo (6)
Figura 41.Deformazione delle tracce di scansione e strizione in corrispondenza del
layer di congiunzione asta-nodo74
Figura 42. Spessore dello strato di polvere depositato variabile con la difettosità del
substrato: Spessore A diverso dallo spessore B (rappresentazione reale estratta da
immagine CT)
Figura 43. Caso limite: la strizione in tal caso ha ingenerato una mancata
solidificazione della polvere
Figura 44. Ingrandimento della zona in cui è avvenuta la sinterizzazione indesiderata;
provino 10
Figura 45. Zone di sinterizzazione indesiderata; maggior concentrazione di polvere
sinterizzata in corrispondenza del layer di congiunzione asta-nodo (sinistra),
agglomerati di polvere compatta lungo la direzione perpendicolare al piano di
scansione (destra)76
Figura 46. Andamento di ΔE_p in funzione della dimensione di cella base80
Figura 47. Curve carico-deformazione per i reticoli 8 e 984
Figura 48. La parete solida presenta una difettosità differente in base alle
caratteristiche del reticolo che la supporta86
Figura 49. Valutazione del parametro NSZ da CAD87
Figura 50. Principio di funzionamento della microtomografia computerizzata92
Figura 51. Macchinario tomografico Phoenix V utilizzato per le analisi92

5 Indice delle Figure

Figura 52. Provino 12x12x12mm³ progettato per l'analisi tomografica94 Figura 53. Strutture cellulari disposte in 3 piani, che definiscono 4 interfacce d separazione: l'interfaccia 1 separa i supporti dai reticoli del piano1, l'interfaccia 4
riporta un'indicazione numerica che definisce la posizione delle strutture cellulari ne piani sottostanti94
Figura 54. Acquisizione delle immagini CT 2D96
Figura 55. Visualizzazione tridimensionale della micro CT 3D (basso, destra) e sezior
secondo i piani xy, xz, yz della micro CT 3D. Le porosità del materiale sono
evidenziate e colorate in funzione del loro diametro equivalente dimensione9
Figura 56. Dettaglio di microCT: porosità sferica di 25µm93
Figura 57. Visualizzazione in ambiente CAD della microtomografia CT98
Figura 58. A sinistra, sezione di piano con porosità evidenziata, a destra ui
fotomontaggio della medesima sezione con, in trasparenza, le zone di contatto della superficie solida e il reticolo che la supporta99
Figura 59. Sezioni della micrografia CT in corrispondenza della zona di transizione tra
reticolo (1) e parete solida completamente formata (4)99
Figura 60. Selezione di zone 3mmx3mm su cui eseguire l'analisi di porosità 100 Figura 61. Andamento %pori per dimensione dei pori maggiori di 20µm - NSA 102

Indice delle Tabelle

Tabella 1.Estratto dalla tabella riassuntiva delle strutture cellulari reticolari
caratterizzate dalla comunità scientifica [15]32
Tabella 2. Pro e contro dell'applicazione dei metodi di simulazione su strutture
cellulari reticolari37
Tabella 3. Tipi di celle maggiormente utilizzate nella pratica di progettazione delle
moderne strutture cellulari reticolari42
Tabella 4. Intervalli di variabilità dei parametri geometrici dei provini realizzati50
Tabella 5. Caratteristiche dei 14 tipi di provino realizzati52
Tabella 6. Risultati delle prove meccaniche di compressione, i valori indicati sono la
media delle misurazioni effettuate60
Tabella 7. Risultati delle pesate64
Tabella 8. Tab.7 ordinata secondo il criterio di diametro d'asta crescente65
Tabella 9. Applicazione dell'eq4.4 per la stima del peso del provino 1466
Tabella 10. Valori di Dc e Dn reali misurati per mezzo di acquisizioni al microscopio
ottico
Tabella 11. Discrepanza tra valori reali e nominali dei diametri di nodo e connettore.
68
Tabella 12. Valori di snellezza nominale e reale per i reticoli studiati; numero di nodi
per cm^3 di ogni struttura
Tabella 13. Valori dei parametri di merito e del loro incremento al variare dei
parametri caratteristici di reticolo80
Tabella 14. Estratto da tab.1181
Tabella 15. Valori dei parametri di merito e del loro incremento al variare dei
parametri caratteristici di reticolo83
Tabella 16. Caratteristiche geometriche dei provini 3,8 e 984
Tabella 17. Misurazione delle tolleranze geometriche e dimensionali dei provini
realizzati. In verde, il provino è conforme alla tolleranza di \pm 0.1mm prevista dal
processo DMP, in rosso, il provino non è conforme
Tabella 18. Caratteristiche dei reticoli nel provino da analisi tomografica95

Capitolo 1

Introduzione

In molti campi dell'ingegneria meccanica si riscontra l'esigenza di realizzare strutture alleggerite che garantiscano rigidezza e prestazioni elevate. Con i recenti sviluppi delle tecnologie *Additive Manufacturing* di materiali metallici, è divenuta possibile la realizzazione di componenti integrati, composti interamente o parzialmente da strutture cellulari reticolari, con geometrie ottimizzate.

I campi biomedicale e aerospaziale sono quelli che maggiormente hanno beneficiato della possibilità di realizzare componenti di geometria *free-form*.

Nell'ambito biomedico, ad esempio, gli innesti ossei e dentali devono essere realizzati in materiali alleggeriti e altamente prestazionali, oltre che *customizzabili*. Nel campo aerospaziale, le strutture cellulari sono alla base di svariati componenti, a causa della risposta che forniscono sotto carichi compressivi e impulsivi e per la loro leggerezza, caratteristica di estrema importanza in tale settore.

Sempre più spesso le strutture cellulari vengono adottate inoltre, nel mondo delle competizioni sportive.

Tuttavia, la realizzazione di strutture cellulari reticolari rappresenta una sfida tecnologica complessa infatti le tecnologie additive a letto di polvere metallico, che rappresentano lo stato dell'arte nella realizzazione di strutture cellulari reticolari metalliche, introducono variazioni nella geometria e nelle dimensioni dei componenti strutturali che compongono il reticolo, rispetto alle dimensioni previste a progetto.

Il progettista di una struttura cellulare o di un componente in cui la struttura cellulare è integrata, deve poter prevedere le modifiche che il processo realizzativo indurrà nel componente finale; la previsione delle differenze topologiche tra il componente reale e quello progettato, insieme alle difettosità metallurgiche introdotte dal processo, devono essere considerate nei modelli matematici di simulazione adottati per il dimensionamento.

Generalmente le variazioni tra dimensioni e proprietà reali e di progetto si associano a parametri di macchina non ottimizzati e alla risoluzione della macchina, che assume particolare rilevanza nella realizzazione di strutture cellulari reticolari con aste e nodi di piccole dimensioni. In questo lavoro di tesi si propone un approccio di ricerca focalizzato alla definizione di indicazioni pratiche ed efficaci per la progettazione di strutture reticolari.

Utilizzando parametri di macchina ottimizzati per strutture cellulari reticolari, sono stati realizzati dei provini di struttura cellulare reticolare (con cella base di tipo diamond) che hanno permesso di correlare i valori dei parametri caratteristici geometrici della cella base e le modifiche topologiche introdotte dal processo additivo.

Attraverso l'effettuazione di prove meccaniche di compressione sui reticoli realizzati sono state indagate le relazioni tra le proprietà meccaniche delle strutture reticolari e i parametri di cella nominali (con particolare attenzione al diametro del nodo); all'atto pratico della progettazione è necessario conoscere le relazioni che intercorrono tra i parametri caratteristici della cella e le corrispondenti proprietà meccaniche del reticolo, tuttavia queste correlazioni, dovranno tenere in considerazione delle modifiche topologiche introdotte dal processo additive.

Si proporrà uno studio delle proprietà meccaniche basato su alcuni parametri di merito studiati per integrare al loro interno le informazioni della modifica topologiche dovuta al processo. Questo approccio consente di avere, già in fase di progettazione, un'indicazione del tipo di struttura reticolare che, in base ai vincoli di peso definiti dall'applicazione, potrà garantire una resistenza meccanica più vicina possibile all'ottimo di progettazione.

Nella parte conclusiva della tesi si affronterà la problematica dell'integrazione di strutture cellulari reticolari e il materiale pieno. I componenti integrati, di cui un'applicazione tipica sono gli innesti ossei e le protesi, sono componenti in cui le strutture cellulari vengono inserite con funzione primaria di alleggerimento del componente. L'introduzione di un reticolo permette una riduzione di peso correlata ad una diminuzione delle proprietà meccaniche che è generalmente inferiore all'introduzione di zone vuote. In questa tipologia di applicazioni il materiale pieno svolge la funzione strutturale primaria e dovrà essere affetto dalla minor porosità possibile, coerentemente a quella inevitabilmente introdotta nel processo additivo.

La difettosità di un componente realizzato con tecnologie additive è direttamente connessa con la qualità del supporto che la sostiene all'interno del letto di polvere in fase di realizzazione. Nei componenti integrati, i reticoli sono responsabili di sorreggere le pareti solide poste ad essi superiormente, all'interno del letto di polvere.

Le strutture cellulari reticolari che forniscono un miglior supporto alla parete solida supportata, dal punto di vista sia termico che meccanico, permettono di ottenere superfici di contorno al reticolo con minori difettosità.

Si ricercherà a tal proposito, una correlazione matematica tra la porosità della parete solida in corrispondenza della superficie di contorno del reticolo e le proprietà geometriche del reticolo.

Alcuni provini appositamente progettati verranno analizzati attraverso la tecnica non distruttiva di micrografia computerizzata, i risultati saranno quindi elaborati in modo tale da caratterizzare la porosità interna al materiale e correlarla alle grandezze geometriche reali della struttura cellulare.

In questo capitolo verrà esaminato l'attuale stato dell'arte della progettazione e della realizzazione di strutture cellulari reticolari; la trattazione sarà strutturata in modo tale da integrare i risultati scientifici più rilevanti ad oggi presenti in letteratura.

1.1 I materiali cellulari

I materiali cellulari, o in inglese "lattice", sono strutture composte da aste polimeriche o metalliche, sovrapposte e interconnesse in modo tale da definire superfici quadrate o romboidali nello spazio tridimensionale.

In questo lavoro di ricerca si farà riferimento ad una particolare tipologia di strutture cellulari, ovvero quelle reticolari, che si compongono di aste e nodi.

In comparazione con gli altri tipi di strutture cellullari, le strutture reticolari presentano migliori prestazioni meccaniche.

Modificando la topologia e la geometria della struttura è possibile intervenire direttamente sulle prestazioni meccaniche della stessa, rendendola all'applicazione a cui deve rispondere.

Esistono differenti modi per classificare i materiali cellulari, generalmente risulta possibile individuare 3 macro distinzioni [1,2]:

1. Materiale cellulare randomico (Disordered lattice structure):

la cella base di questo tipo di struttura è distribuita randomicamente nello spazio, le celle sono di dimensioni e forme differenti.



Figura 1. Reticolo randomico

2. Struttura cellulare reticolare periodica (Periodic lattice structure): questa tipologia di struttura cellulare può essere considerata come costituita a partire dalla ripetizione periodica della cella base secondo una forma, una dimensione e una geometria definita nello spazio tridimensionale Euclideo. Ogni cella costituente tale struttura presenta la stessa geometria e dimensione.

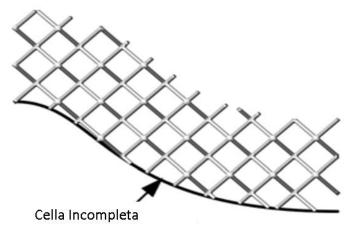
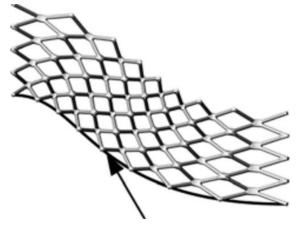


Figura 3. Struttura Cellulare Reticolare Periodica

3. Struttura cellulare reticolare non periodica (Conformal lattice structure): nelle strutture reticolari non periodiche, il reticolo è caratterizzato dalla stessa geometria, tuttavia ogni cella ha dimensioni e individua forme diverse. Una caratteristica interessante di questo tipo di reticolo è che mantiene l'integrità di ogni sua cella; i nodi di ogni cella esterna al reticolo si dispongono in modo tale che i nodi si dispongano in corrispondenza della superficie che delimita il reticolo stesso (che sia reale fittizia); nessuna cella pertanto è incompleta.



Regione di contorno della struttura cellulare

Figura 2.Struttura cellulare reticolare non periodica

L'utilizzo di questa ultima tipologia di reticolo è ad oggi limitata a rari casi relativamente a componenti e applicazioni tecnologicamente avanzate, infatti i software di progettazione di strutture cellulari reticolari non permettono ad oggi di disegnare questa tipologia di reticolo; è perciò necessario un impegno dal punto di vista informatico, che si traduce nell'implementazione ad hoc di programmi specifici, modellati sulla singola applicazione.

Si può operare una ulteriore distinzione relativamente alle sole strutture reticolari periodiche e non periodiche che riguarda gli spessori delle aste che costituiscono il reticolo: se queste ultime hanno dimensioni uniformi, allora si dirà che il reticolo è omogeneo, quando il reticolo è costituito da aste di dimensioni non uniforme, si dirà che il reticolo è eterogeneo.

Le strutture cellulari reticolari periodiche possiedono delle proprietà nettamente superiori rispetto alle strutture cellulari "honeycomb": è infatti possibile progettare tali strutture appositamente per rispondere a certi requisiti relativamente alle prestazioni meccaniche, come la resistenza agli sforzi di taglio a alle deformazioni in generale. [3]

I reticoli spesso trovano campo applicativo nell'assorbimento di urti: è stato dimostrato che le strutture reticolari offrono la possibilità di controllare in modo molto più accurato dei materiali convenzionali il processo di assorbimento dell'energia dell'impatto. [4]

L'elevato rapporto tra area superficiale e volume fa in modo che questo tipo di materiale si presti per la realizzazione di scambiatori di calore ad alte prestazioni [5,6]; le strutture cellulari periodiche, è stato studiato [7], possiedono proprietà di trasferimento di calore superiori alle schiume.

Inoltre, le strutture cellulari reticolari si prestano, se realizzate con materiali appropriati, ad essere utilizzate nel campo biomedicale per la riparazione di ossa, cartilagini e tessuti. Oltre alle proprietà meccaniche elevate se relazionate al peso, queste strutture si prestano ad essere integrate a livello biologico [8].

Esula dall'obbiettivo questa tesi, l'ottimizzazione topologica e la progettazione di strutture lattice finalizzate all'assorbimento di urti e impatti.

1.2 Realizzazione di strutture cellulari

Le strutture cellulari sono costituite da geometrie estremamente sofisticate: per la realizzazione di tali strutture si può fare affidamento su diverse tecnologie produttive, sopra tutte, le tecnologie additive, che si dimostrano particolarmente adatte alla realizzazione di forme complesse. Le tecnologie Additive Manufacturing sono tuttavia le uniche che permettono la produzione di oggetti a superficie *freeform*, come le strutture reticolari e altri tipi di strutture cellulari in cui il materiale è costituito da unità microstruttrali ordinate *randomicamente* o con un pattern specifico.

In natura le strutture cellulari sono molto diffuse; l'evoluzione ha affinato alcuni materiali che presentano una elevata resistenza meccanica se paragonata al peso e alla densità.

Molteplici sono le problematiche tecniche da superare per ottenere strutture cellulari con proprietà omogenee e prestazioni ripetibili.

Il termine Additive Manufacturing si riferisce ad una serie di processi produttivi attraverso i quali è possibile realizzare oggetti tridimensionali mediante addizione di materiale.

Nelle tecniche di produzione additiva il componente viene costruito sezione per sezione tramite l'aggiunta progressiva di materiale; questa operazione è diretta tramite un sistema computerizzato nel quale è caricato il disegno 3D che si vuole ricreare.

Gli oggetti prodotti per AM possono avere forme estremamente complesse e particolari che sarebbero impossibili da realizzare con le lavorazioni tradizionali.

Le tecnologie che vengono generalmente adottate con successo per la realizzazione di strutture reticolari dedicate ad applicazioni dell'ingegneria meccanica sono:

- La Stereolitografia di resine fotosensibili.
- Le tecnologie di fusione e sinterizzazione da letto di polvere metallico.

Tale trattazione, prenderà in esame esclusivamente strutture realizzate per mezzo di tecniche additive, nella fattispecie, quelle ottenute mediante fusione o sinterizzazione selettiva di polvere metallica.

1.3.1 Tecnologia AM a letto di polveri metalliche

La produzione additiva in materiale metallico si basa sull'utilizzo dell'energia di un laser oppure di un fascio di elettroni per sinterizzare o portare a fusione (parziale o totale) polveri metalliche fini.

Le tecnologie ad oggi più utilizzate nel settore dell'AM a polveri metalliche sono:

- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective Laser Melting (SLM)
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
- Electron Beam Melting (EBM)

Il principio di funzionamento è per tutte il medesimo: le polveri metalliche sono utilizzate per formare uno strato sottile spesso qualche decina di micrometri su di una piattaforma; tale strato viene successivamente fuso selettivamente da un fascio laser (o fascio di elettroni). Per ogni strato di polvere deposta, il laser (o fascio di elettroni) va a delineare un'area precisa che è la sezione del componente che si vuole produrre.

Ogni nuovo strato di polvere è steso sopra al precedente così che ci sia una continuità strutturale tra le sezioni consecutive scansionate.

La tecnologia che è stata utilizzata per realizzare le strutture cellulari reticolari oggetto di questa trattazione, prende il nome di DMP, acronimo di "Direct Metal Printing". Questa tecnologia può essere inclusa all'interno del macrogruppo delle

tecnologie SLM "Selective Laser Melting": la tecnologia in questione è di proprietà dalla multinazionale di produzione additiva 3D Systems.

1.3.2 La tecnologia DMP

La DMP è una tecnologia sviluppata e perfezionata da 3DSystems, azienda statunitense leader mondiale nel campo della produzione di apparecchiature per *l'additive manufactoring*.



Figura 4. Macchinario DMP ProX 320, utilizzato per la realizzazione delle strutture cellulare reticolari oggetto di studio

Un laser a fibra di itterbio di potenza relativamente elevata, solitamente maggiore di 400W, porta a fusione le polveri metalliche in modo selettivo. La matematica 3D CAD del componente di partenza è così progressivamente riprodotta nel letto di polvere metallica, strato su strato.

Diverse polveri metalliche possono essere utilizzate con i macchinari DMP, solitamente la polvere viene stratificata con spessori che non superano i 60 µm.

L'elevata densità di energia concentrabile attraverso le sorgenti laser di ultima generazione consente di utilizzare polveri metalliche monofasiche senza la necessità di aggiungere elementi basso fondenti, che invece erano necessari nelle prime tecniche di fusione selettiva.

In fig4. si riporta una foto del macchinario.

Il materiale istallato sulla macchina in questione è Alluminio AlSi10Mg, la polvere presenta le seguenti caratteristiche meccaniche.

MEASUREMENT COND	CONDITION	METRIC			U.S.		
MEASUREMENT	CONDITION	AS-BUILT	AFTER STRESS RELIEF	DIRECT AGEING	AS-BUILT	AFTER STRESS RELIEF	DIRECT AGEING
Young's modulus (GPa ksi)	ASTM E8M	71 ± 2	73 ± 6	73 ± 6	10300 ± 300	10600 ± 900	10600 ± 900
Ultimate strength (MPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		450 ± 30 420 ± 60	310 ± 20 300 ± 20	420 ± 30 410 ± 40	65 ± 4 61 ± 9	45 ± 3 44 ± 3	61 ± 4 60 ± 6
Yield strength Rp0.2% (MPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		260 ± 30 230 ± 40	200 ± 20 170 ± 20	270 ± 20 260 ± 40	38 ± 4 33 ± 6	29 ± 3 25 ± 3	39 ± 3 38 ± 6
Plastic elongation (%)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		8 ± 4 5 ± 2	12 ± 2 9 ± 4	6 ± 2 3 ± 2	8 ± 4 5 ± 2	12 ± 2 9 ± 4	6 ± 2 3 ± 2
Hardness, Rockwell B (HRB)	ASTM E18	71 ± 4	50 ± 6	72 ± 4	72 ± 4	50 ± 6	72 ± 4
Impact toughness³, typical (J ft-lb)	ASTM E23	3-4	5-12	1-3	2-3	4-9	1-2

Figura 5 Proprietà Meccaniche AlSi10Mg da scheda tecnica [9]

MEASUREMENT	METRIC	U.S.	ELEMENT	% OF WEIGHT
Density			Al	Balance
Relative, based on	>99.9	>99.9	SI	9.00-11.00
pixel count ¹ (%)			Mg	0.20-0.45
Absolute theoretical ² (g/cm ³ lb/in ³)	2.68	0.097	Fe	≤0.55
			Cu	≤0.10
			Mn	≤0.35
			Ni	≤0.05
			Zn	≤0.10
			Pb	≤0.05
			Sn	≤0.05
			Ti	≤0.15

Figura 6. Proprietà fisiche (a sinistra) e composizione (a destra) della lega di AlSi10Mg [9]

1.3.3 Schema di funzionamento generale macchinari AM laser.

Ogni macchina DMP è caratterizzata dalle seguenti parti principali:

- Camera di processo: è chiusa ermeticamente attraverso pareti coibentanti che permettono di controllare l'atmosfera di processo e quindi l'ossigeno presente, responsabile della formazione di ossidi, e la temperatura. Per evitare che si formino ossidi, che rimangono come impurità nel materiale decretando un forte calo di prestazioni del materiale, è necessario che l'ossigeno presente si attesti sotto valori che, per l'alluminio, sono nell'ordine delle 100PPM. La tecnologia DMP consente di ottenere una camera di processo con una percentuale di ossigeno a regime inferiore alle 25PPM, valore di rifermento nel campo della produzione additiva.
- Sistema ottico e laser: il laser è il dispositivo elettronico responsabile dell'emissione del fascio di radiazione elettromagnetica. Attraverso delle lenti il fascio luminoso viene focalizzato su uno specchio mobile, quest'ultimo ha il compito di dirigere il fascio in qualsiasi punto possibile del layer. Il fascio laser

- adottato nei macchinari DMP può essere focalizzato fino ad una dimensione di 30µm.
- Piattaforma di costruzione (building platform): si muove lungo l'asse z permettendo la costruzione del pezzo strato su strato. Il pezzo viene ancorato alla piattaforma tramite il primo strato. La piattaforma deve essere rettificata prima di ogni lavorazione per garantirne la planarità, successivamente sabbiata così che la rugosità sia sufficiente a garantire l'ancoraggio del primo strato di polvere. È importante rimuovere anche gli eventuali residui di liquido refrigerante che vengono depositati in fase di rettifica, questi evaporando al passaggio del laser, impediscono l'adesione della polvere al substrato.
- Dispenser delle polveri (dispenser platform): muovendosi lungo l'asse z rende possibile il rifornimento di polveri della piattaforma di costruzione. La macchina DMP utilizzata ha 2 dispenser, così che ogni passaggio del recoater si possa stendere uno strato di polvere.
- Recoater: ha il compito di portare la polvere dal dispenser alla piattaforma di
 costruzione appiattendo il più possibile lo strato di polvere. Il recoater della
 macchina DMP è formato da due sottili lame di silicone che vengono sostituite
 in fase di set-up per ogni lavorazione.

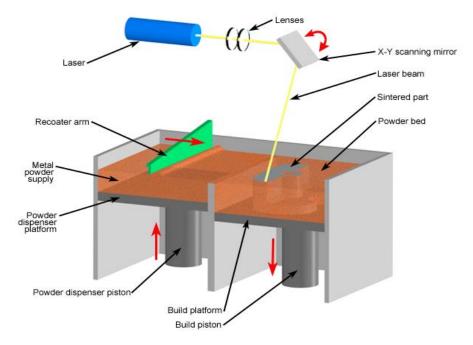


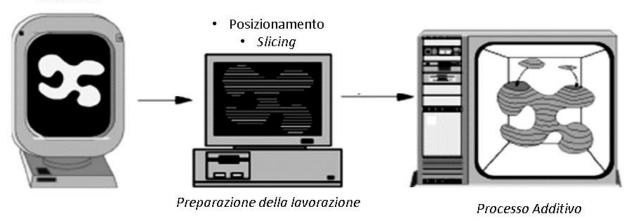
Figura 7. Schema di funzionamento della macchina DMP

Le fasi della produzione additiva metallica da letto di polveri ha inizio con il:

- Caricamento del modello CAD tridimensionale dell'oggetto da realizzare.
- Individuazione di una direzione di "crescita" e posizionamento virtuale del componente nel volume di lavorazione: è importante che i supporti che sostengono il componente nella polvere e lo connettono alla piattaforma, siano sempre rimuovibili in fase di postprocesso, un posizionamento non corretto potrebbe creare la necessità di supportare zone non raggiungibili con gli utensili utilizzati per rimuovere i supporti, all'interno del componente stesso, come ad esempio condotti interni; inoltre, un giusto posizionamento del componente permette di diminuire i pretensionamenti generati dalle dilatazioni termiche differenziali prodotte dalla fusione e solidificazione selettiva.
- Compensazione dei ritiri termici: si imposta una scala che permette di ottenere un componente finito che, a temperatura ambiente, abbia le dimensioni nominali conformi con le matematiche CAD del componente stesso.
- Realizzazione dei supporti: i supporti dovranno garantire un saldo ancoraggio
 del componente alla piattaforma di lavorazione. Il compito dei supporti è anche
 quello di impedire che il componente, a causa delle tensioni interne indotte
 dalla solidificazione differenziale e dai cicli termici di riscaldamento
 raffreddamento indotti dal passaggio del laser, si muova perdendo la posizione,
 o interferendo con il passaggio del recoater. I supporti vanno progettati con
 particolar attenzione in corrispondenza degli hotspot, ovvero delle zone in cui
 il calore non viene evacuato in modo efficace, queste zone sono causa di forti
 tensionamenti interni del componente.
- Slicing del componente: in base al materiale adottato e al posizionamento del componente, un algoritmo definisce le coordinate spaziali che il laser percorrerà in fase di lavorazione, istante per istante.
- Caricamento dei file di "slicing" in macchina.
- Set-up della macchina: è importante assicurarsi che i dispenser contengano sufficiente polvere metallica per terminare il job. In questa fase si sigilla la macchina e si porta sotto vuoto, la macchina DMP esegue due cicli di vuoto per rimuovere l'ossigeno intrappolato nelle polveri stipate nel dispenser; infine si impostano le quote di riferimento dei dispenser e della piattaforma, si può allora iniziare la lavorazione.
- Rimozione della polvere dal build volume a fine lavorazione.
- Trattamento termico di distensione: i componenti, ancora ancorati alla piattaforma, vengono inseriti in forno per un ciclo termico di distensione (per la lega di Alluminio AlSi10Mg oggetto di questa trattazione, il ciclo si compie in 2-3h a 250°C). La distensione scongiura la deformazione dei componenti a causa delle tensioni residue della lavorazione, quando i supporti verranno rimossi.

- Rimozione dei supporti: questa operazione generalmente si esegue manualmente. Per componenti particolarmente delicati la rimozione può avvenire mediante elettroerosione o attraverso macchine a controllo numerico.
- Finitura del componente fino al raggiungimento da rugosità superficiale richiesta.

Modello 3D



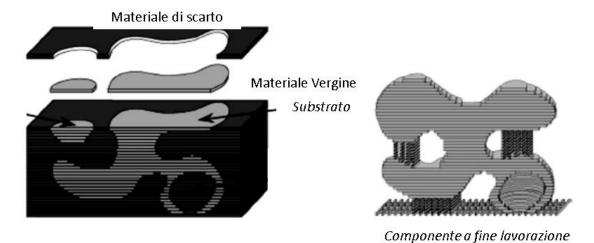


Figura 8.Le fasi del processo Additive Manufacturing da letto di polvere metallica

1.3.5 Fasi del ciclo di lavorazione

Una serie di 4 operazioni viene ripetuta layer dopo layer durante il ciclo di lavorazione:

- 1. Esposizione: il laser fonde selettivamente le polveri metalliche. Il fluido generato dalla fusione ha un'elevata tensione superficiale che sta alla base delle irregolarità sulla superficie scansionata
- 2. Abbassamento piattaforma di lavorazione: la piattaforma viene abbassata di uno spessore pari allo spessore di polvere che si vuole depositare (quest'ultimo è correlato con lo spessore di materiale solido che si vuole ottenere da una scansione)
- 3. Innalzamento del dispenser: il dispenser viene elevato ad una quota tale per cui sia disponibile una quantità di polvere sufficiente a stendere un nuovo layer sopra l'ultimo layer scansionato.
- 4. Formazione del nuovo strato di polvere: il *recoater* preleva la polvere dal dispenser stendendo un sottile strato di polvere in corrispondenza della superficie superiore della zona di lavorazione.

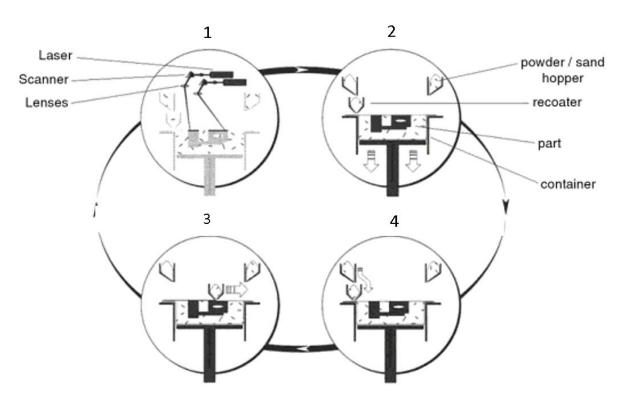


Figura 9. Fasi del ciclo di lavorazione

1.3.6 Fisica del processo

Il processo ha inizio nel momento in cui il laser colpisce le particelle di polvere: queste assorbono parte dell'energia del fascio laser incidente, riscaldandosi fino a fondere. Il laser esegue la scansione del piano determinando la formazione di una traccia continua di metallo liquido che ha forma cilindrica. Le particelle che circondano la fase liquida cilindrica vengono attratte dal materiale fuso (figura 10(1)), fondendosi a loro volta; dal materiale liquido possono generarsi microschizzi di metallo fuso (figura 10(2)). Nel macchinario DMP, i microschizzi vengono intercettati da un flusso di Argon continuo al di sopra del letto di polvere metallica, che li traporta al di fuori della zona di scansione.

1.3.5.1 Balling Effect

La diminuzione della tensione superficiale della fase liquida comporta la rottura del bagno metallico in diversi agglomerati di forma sferica (fig. 10(4)); questo fenomeno chiamato "balling effect" è la causa della presenza di discontinuità nelle tracce di scansione. La discontinuità è tra la traccia composta da sfere di metallo fuso e gli agglomerati di polveri circostanti.

Si definisce il parametro *Hatch Distance* (Hs) come l'ampiezza del gap tra i vettori adiacenti e paralleli individuabili dal centro degli spot laser durante le passate sul letto di polvere ovvero la distanza tra due passate.

L'Hs è un parametro di processo di fondamentale importanza ed influenza le caratteristiche del pezzo finito.

Definendo un secondo parametro X come la larghezza della discontinuità tra la traccia fusa e gli agglomerati di polvere circostanti:

• se Hs < X (fig.10(5a)):

il laser colpisce prevalentemente la sfera di metallo fuso e gli agglomerati di polvere ad essa adiacenti ma solo in piccola parte il letto di polvere. Il *balling effect* in questo caso interesserà un'area più piccola e le sfere di metallo fuso risulteranno di dimensioni inferiori rispetto a quelle immediatamente adiacenti: le sfere più piccole riempiranno il gap formatosi in precedenza garantendo una buona adesione tra le passate.

• Se Hs > X (fig.10(5b)):

le sfere generate dalla seconda passata non saranno perfettamente aderenti a quelle della prima; solo gli agglomerati di particelle tra di esse presenti garantiranno una debole coesione.

Il legame tra una passata e l'altra sullo stesso piano non è ottimale [9].

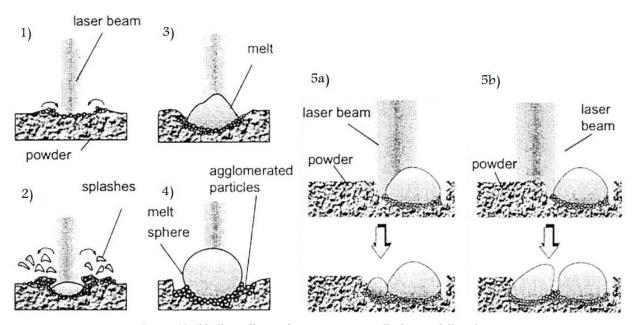


Figura 10. Il balling effect e i fenomeni connessi alla fusione delle polveri.

Il *balling effect* è un processo metallurgico complesso al quale sono legate le proprietà finali del materiale fuso dalle polveri, inoltre la presenza delle sfere di metallo ostacola una uniforme deposizione dei nuovi strati di polvere su quelli elaborati in precedenza.

La determinazione dei parametri di processo, che permettano di evitare le problematiche connesse al *balling effect*, è fondamentale per garantire:

- buona adesione tra le tracce di metallo fuso in passate successive;
- bassa porosità;
- buone proprietà meccaniche.

1.4 Teoria di base dei materiali cellulari

Le proprietà meccaniche delle strutture cellulari reticolari dipendono da diversi fattori: la dimensione e la geometria della cella, le proprietà meccaniche del materiale con cui sono realizzate, la periodicità e la interconnessione tra celle, dalla forma e dalla sezione delle aste che costituiscono il reticolo, dalla porosità, dalla densità relativa del materiale ecc.

Si definisce generalmente il rapporto tra densità del reticolo e densità del materiale bulk, tale rapporto prende il nome di densità relativa (ρ^*) della struttura cellulare; Le proprietà delle strutture cellulari reticolari sono fortemente connesse a tale parametro.

1.4.1 Comportamento sforzo-deformazione di strutture cellulari

Il comportamento ideale (sforzo-deformazione) di una struttura cellulare reticolare sottoposta a compressione è mostrata in fig.11. La curva di compressione ottenuta a partire da un test uniassiale di compressione consente di determinare se il comportamento del materiale è "bending-dominated" o "stretch-".

Il comportamento bending-dominated caratterizza le strutture cellulari a cella aperta o i materiali cellulari randomici, mentre il comportamento descritto dalla curva "stretch-dominated" è il più comune nei materiali cellulari a cella chiusa o talvolta anche nelle strutture cellulari reticolari periodiche a cella aperta.

Il modulo elastico e il campo elastico in strutture *stretch-dominated* si dimostra generalmente superiore a quello delle strutture *bending-dominated* che presentano pari densità relativa; tale differenza è dovuta alle differenze nel comportamento della struttura precedente al collasso: le celle che hanno comportamento *stretch-dominated* possiedono prestazioni meccaniche relativamente al loro peso che sono

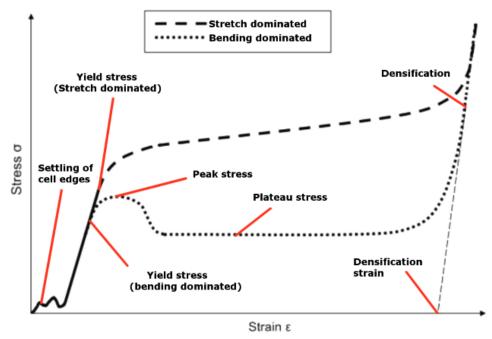


Figura 11. Comportamento ideale di strutture strech-dominated e bending-dominated [1]

superiori alle *bending-dominated*; sono pertanto da preferire per le applicazioni strutturali nel campo dell'ingegneria meccanica.

La regione plastica, in particolar modo, è caratterizzata dalle più marcate differenze; le strutture *bending-dominated* evidenziano un picco di stress e poi la rottura, seguita da un plateau definito da un valore di tensione pressoché costante, e ad un livello inferiore rispetto al picco verificatosi durante la rottura.

Questo plateau prosegue all'aumentare della deformazione fino a quando la densità relativa del lattice non si avvicina all'unità; successivamente la curva si impenna, descrivendo la densificazione della struttura reticolare.

D'altro canto, nelle strutture *stretch-dominated*, la rottura è seguita da un incremento circa lineare con un coefficiente angolare inferiore a quello relativo alla curva in campo elastico; successivamente, nelle zone prossime alla densificazione, la curva si impenna analogamente a quanto descritto per le strutture *bending dominated*.

1.4.2 Descrizione geometrica delle celle: il criterio di stabilità di Maxwell

Al fine di comprendere i comportamenti bending e *stretching dominated*, si considerino le celle rappresentate in forma schematica bidimensionale in fig.12.

La condizione per cui una struttura reticolata costituita da b strutture e j nodi (che in tale trattazione vengono considerati come cerniere prive di attrito), è staticamente e cinematicamente stabile (condizione di isostaticità), ovvero che non collassa immediatamente quando sottoposta ad un carico, se:

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

Che in tre dimensioni si scrive:

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

Se M<0 (fig. 12(a)), la cella è labile, ovvero presenta uno più gradi di libertà: nella direzione in cui la struttura lascia libertà di movimento, quest'ultima non esercita resistenza.

Se i nodi fossero bloccati, come avviene nelle strutture cellulari, le aste che costituiscono la cella fletterebbero in corrispondenza dell'applicazione di un carico.

Se invece M=0, come nel caso descritto da fig.12(b), la cella cessa di essere labile; quando viene sottoposta ad un carico, negli elementi che la costituiscono si sviluppano tensioni di trazione e compressione pura: la struttura si dirà allora "stretch-dominated".

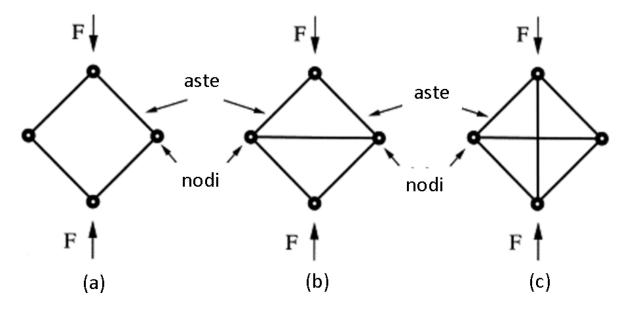


Figura 12.(a) struttura labile, (b) struttura isostatica, (c) struttura iperstatica

Se ora considerassimo i nodi bloccati, il comportamento della struttura sarebbe differente, infatti le aste che compongono la struttura stessa, sono elementi snelli e di conseguenza, la struttura dimostrerà una maggiore rigidità quanto più questi elementi sono sottoposti a trazione e compressione, piuttosto che a flessione.

Da questa considerazione si può asserire che

"Le strutture stretch-dominated hanno una più alta efficienza strutturale rispetto alle strutture bending-dominated"

Con fig.12(c), si introduce un ulteriore concetto; lo schema di cella in questione ha M>0, e rappresenta il caso di struttura reticolare iperstatica.

I criteri espressi dalle espressioni di cui sopra, sono condizioni necessarie alla rigidità della struttura, tuttavia non sono sufficienti: queste infatti non tengono in considerazione dei possibili stati di stress interno alla struttura stessa.

Tale trattazione teorica è perfettamente coerente con le curve di fig.11: sia il modulo elastico che la tensione che definisce l'entrata in campo plastico sono maggiori nel caso di struttura *stretch-dominated*.

M.Ashby[1] ha indagato a lungo le proprietà delle strutture cellulari, riportando in grafici i valori di E/E_s (modulo elastico della struttura reticolare su modulo elastico del materiale pieno che costituisce la struttura) e $6/6_s$ (tensione di snervamento della struttura cellulare su tensione di snervamento del materiale pieno), in relazione al parametro ρ/ρ_s (densità della struttura reticolare su densità del materiale pieno).

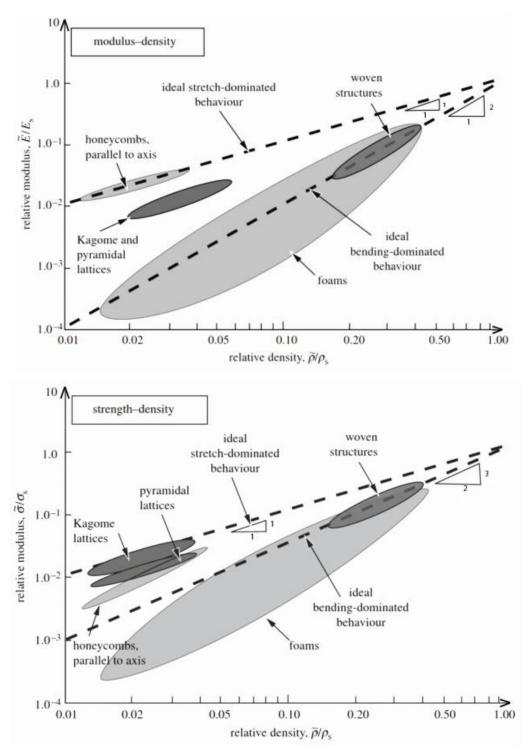


Figura 13.Correlazione tra Modulo elastico relativo - Densità relativa per differenti strutture cellulari. Le strutture bendingdominated hanno un comportamento descritto dalla linea con coefficiente angolare di 3/2, le strutture strech dominated invece, il coefficiente è pari a 1.

Nelle strutture *stretch-dominated*, il parametro E/E_s dimostra diretta proporzionalità con ρ/ρ_s , d'altro canto, le strutture *bending-dominated*, hanno un modulo elastico che scala secondo $(\rho/\rho_s)^2$ (fig. 13(a))

Da tali grafici sperimentali si osserva inoltre che le schiume metalliche, descritte per un ampio intervallo di densità relative, si posizionano nel campo delle strutture bending-dominated; i materiali honeycomb sono particolarmente prestazionali.

D'altro canto, se il carico è applicato nelle direzioni normali alle celle, le prestazioni crollano.

Per quanto riguarda lo stress δ interno al materiale, il comportamento è pressoché analogo a quanto descritto per il caso della rigidezza, tuttavia cambiano i coefficienti angolari: le strutture *stretch-dominated* mostrano un $6/6_s$ proporzionale a (ρ/ρ_s) , mentre nelle strutture *bending- dominated*, la proporzionalità è del tipo $(\rho/\rho_s)^{3/2}$.

1.5 Difficoltà nella modellazione di componenti contenenti strutture reticolari

La previsione delle prestazioni di strutture cellulari reticolari ottenute mediante tecnologia additive rappresenta una sfida importante essenzialmente per due motivazioni:

 Costo Computazionale: i metodi esistenti che si utilizzano per disegnare, dimensionare e simulare le proprietà meccaniche nel campo dell'ingegneria meccanica, non sono spesso adatti e affidabili nel trattare strutture dalle geometrie così complesse come le strutture reticolari



Figura 14.Esempi di componenti integrati con strutture cellulari reticolari: in alto un telaio frutto di una progettazione generativa, in basso un pedale ultra leggero per una applicazione automotive ad alte prestazioni.

• Difetti Metallurgici e Limiti intrinseci delle tecnologie Additive Manufacturing

Qualsiasi componente prodotto mediante tecniche additive presenterà delle difettosità che sono connesse intrinsecamente al processo produttivo.

Si descriveranno a seguire un elenco dei limiti e delle difettosità connesse alle tecnologie AM a letto di polvere metallica:

- 1. Precisione dimensionale: la tolleranza dimensionale dei pezzi ottenuti per additive manufacturing a letto di polveri metalliche è indicativamente ±0,05-0.1mm ogni 100 mm; spesso sono indispensabili lavorazioni successive di finitura, e ciò aumenta inevitabilmente il tempo necessario per la produzione del manufatto così riducendo la flessibilità del processo. La precisione dimensionale rappresenta un grande limite delle tecnologie AM da polveri essendo tale caratteristica alla base della ripetibilità in scala industriale di un componente.
- 2. **Dimensioni massime del componente**: le dimensioni massime dei pezzi ottenibili con i macchinari SLM e EBM sono limitate dai volumi delle camere nel quale avviene il processo: il macchinario DMP320 utilizzato per la realizzazione delle strutture reticolari studiate in questo lavoro di tesi, ha un building volume di 273x273x400 mm³. Build Volume di volume maggiore sono di difficile utilizzo perché non è ad oggi possibile controllare i ritiri termici per componenti di grandi dimensioni.
- 3. **Rugosità superficiale**: la distribuzione granulometrica non omogenea delle polveri e la difficoltà di stesura e pre-compattazione delle stesse induce una finitura superficiale granulare e porosa con rugosità aritmetica che raggiunge (e talvolta supera) gli 11µm; in alcune applicazioni potrebbero essere necessari ulteriori processi di finitura per garantire una migliore qualità superficiale.
- 4. Stress Residui: la natura stessa del processo comporta la presenza di stress residui nel materiale indotti dai rapidi cicli termici di raffreddamento e riscaldamento (0.5-25 ms). L'elevata densità di energia concentrata dal laser induce la presenza di importanti gradienti termici che sono responsabili di ulteriori stress nel componente. Le tensioni residue possono causare deformazioni, nucleazione di microcricche e in generale il peggioramento delle proprietà meccaniche nonché la riduzione dell'affidabilità del componente. Affinché siano limitati gli effetti degli stress residui si può operare preriscaldando le polveri o post-riscaldando il pezzo finito per distendere le tensioni. Non sempre tuttavia è possibile risolvere totalmente le problematiche connesse agli stress residui.

Il processo di fusione selettiva è inoltre responsabile dell'insorgenza di difettosità metallurgiche [11]

I più comuni difetti metallurgici che si possono verificare nei componenti prodotti per fusione selettiva sono:

- Porosità: nei processi SLM è tipicamente presente una porosità connessa:
- alla presenza di vapore metallico all'interno del metallo fuso: i gas possono rimanere intrappolati dalla turbolenza superficiale o destabilizzare la traccia di scansione stessa.
- All'incompleta fusione delle polveri metalliche.

Una distanza eccessiva tra due passate ostacolerà la creazione di uno strato continuo di materiale. Il vapore metallico inoltre tenta di fuoriuscire dalle tracce fluide appena scansionate dal laser; queste ultime possono allora collassare su sé stesse formando dei vuoti.

Per ridurre la porosità si dovrà pertanto rendere stabili le tracce di scansione attraverso la modifica dei parametri di processo, in particolare tale esigenza richiede un aumento della potenza del laser e della velocità di scansione così da velocizzare il tempo di riscaldamento e raffreddamento e quindi limitare la formazione dei vapori metallici.

La presenza di porosità nella struttura potrebbe essere connessa alle dimensioni delle polveri utilizzate oltre che alla bagnabilità tra cilindro fuso e substrato. Utilizzando polveri di dimensione elevata (superiore ai 100 µm) è necessario un laser dalla elevata potenza di emissione: il trasferimento di calore nello strato polverulento infatti è ostacolato dalla presenza di vuoto nello spazio tra le particelle. Inoltre, per una fissata densità di energia, la struttura del materiale ottenuta con polveri grandi tende ad essere più porosa di quella ottenuta da polveri fini. L'utilizzo di polveri dalle dimensioni molto piccole può originare altresì porosità nel materiale; i film di ossidazione hanno infatti un'importanza molto superiore quando il rapporto superficie/volume è elevato. La presenza di ossidi va a ridurre la bagnabilità all'interfaccia solido-liquido. Le polveri di alluminio ad oggi più comunemente utilizzate hanno di dimensioni comprese tra i 20 e 50 µm, la polvere utilizzata per realizzare le strutture oggetto di tale trattazione ha esattamente questa dimensione.

2. Cracking: alcune leghe di alluminio, come quella presa in esame, possono incorrere nel fenomeno del cracking durante la solidificazione o la fusione; le leghe di alluminio infatti hanno un ampio range di temperature di solidificazione, un alto coefficiente di espansione termica e si restringono fortemente solidificando. Il fenomeno del cracking in fase di fusione può essere ridotto minimizzando la dispersione dell'energia del laser nel letto di polveri. Durante la solidificazione, gli elementi di lega e le impurità sono confinati ai bordi di grano e persistono in fase liquida fino a basse temperature: affinché gli stress residui e quindi i fenomeni di cracking siano minimizzati è necessario che il liquido sia sufficiente a riempire le fratture che si generano durante il raffreddamento, in questo modo sono mitigati gli effetti di intaglio: le tensioni residue sono in parte assorbite dal materiale solidificatosi all'interno della fessura. La sensibilità al cracking delle leghe di alluminio processate con macchinari SLM dipende dai parametri di processo adottati; generalmente parametri consigliati dalle case produttrici dei macchinari in funzione del materiale adottato, sono sufficienti a scongiurare la presenza di fessurazioni nel componente pieno [12]. Nelle strutture reticolari spesso tali parametri non consentono di evitare completamente il cracking.

- 3. Perdita degli elementi in lega: l'elevata densità di energia concentrata dal laser sulla polvere metallica può provocare l'evaporazione selettiva di alcuni elementi di lega bassofondenti in quanto possiedono una pressione di vapore all'equilibrio superiore. L'evaporazione selettiva degli elementi di lega è responsabile della degradazione delle proprietà funzionali dei componenti ottenuti tramite fusione selettiva con fasci laser. Ad esempio l'evaporazione del magnesio durante la fusione laser delle leghe di alluminio che lo contengono, può inibire il processo di rafforzamento per precipitazione della lega così provocando la riduzione di numerose proprietà meccaniche desiderabili come: resistenza meccanica, durezza, duttilità, resistenza alla corrosione e suscettibilità al cracking. L'impoverimento dagli elementi alliganti inoltre destabilizza la traccia di scansione e genera porosità nel materiale; la perdita degli elementi di lega va pertanto contrastata [13]. A tal proposito è necessario regolare la temperatura del bagno di fusione intervenendo direttamente sulla potenza emessa dal laser. Attraverso l'utilizzo di polveri la cui composizione è appositamente progettata per compensare la perdita degli elementi di lega è possibile risolvere parzialmente il problema del crollo di proprietà meccaniche del materiale densificato. Rimane tuttavia problematica dell'instabilità delle tracce di scansione consequente alla presenza di vapori metallici nel bagno di fusione, problematica che risulta acuita nella realizzazione di strutture reticolari.
- 4. Inclusione di ossidi: l'ossido superficiale inibisce il meccanismo di densificazione favorendo il "balling effect", inoltre è causa dell'interruzione della crescita dei grani tra i layer. L'ossido è presente nel bagno di fusione e può essere di due tipi: "Ossido Vecchio", ovvero quello che ricopre le polveri metalliche che costituiscono il letto, e l'"Ossido Nuovo", la fusione delle polveri tramite il raggio laser provoca l'intrappolamento dei vuoti, che prima separavano le polveri, nel bagno di fusione, inoltre anche i vapori di metallo vengono trattenuti nel bagno dai moti turbolenti di superficie. La superficie del bagno di fusione si ricoprirà di uno strato di ossido (ossido nuovo) a causa dell'aria e dei gas intrappolati. La fenomenologia del processo di decadimento delle proprietà di un componente a causa degli strati di ossido è stata approfondita solo di recente. Louvis et al. [14] attraverso le sue ricerche dimostrò che le problematiche legate all'utilizzo dell'alluminio e delle sue leghe nelle tecnologie AM da polveri sono dovute perlopiù alla presenza di ossido metallico: venne osservato che lo strato di ossido si forma sia sulla superficie già solidificata che in quella ancora liquida. Lo strato ossidato che si trova in corrispondenza della superficie più elevata del bagno di fusione evapora quando colpito dal raggio laser, rimane tuttavia intatto nelle altre superfici. Le

forze di Marangoni (fig. 15.A) sono la causa di un rimescolamento del bagno di fusione, ciò induce la rottura dello strato di ossido tra layer consecutivi: l'ossido che viene distrutto è quello che ha precedentemente ricoperto la superficie superiore del substrato (ossido formatosi dopo la scansione del layer che fa da substrato) (fig. 15.B).La conseguenza di tale fenomeno si individua nella formazione di "pareti di ossido" tra le tracce dello stesso piano; dove le due pareti di ossido si incontrano si può osservare la formazione di un poro. Tale problematica viene alleviata adottando laser più potenti e diminuendo il gap tra una passata e l'altra.

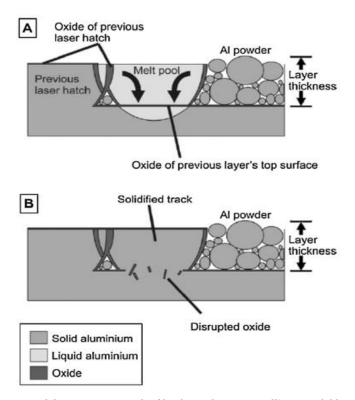


Figura 15. Rappresentazione del comportamento dei film di ossido presenti all'interno del bagno di fusione [14]

I processi di ossidazione sono ritenuti tra i maggiori responsabili della presenza di porosità e cracking nei componenti di alluminio e leghe ottenuti per SLM, tuttavia non sono ancora del tutto chiare le dinamiche e i ruoli dell'ossido nella formazione di tali difettosità. Le dinamiche chimico-fisiche che prendono parte al processo di fusione delle polveri non sono ancora pienamente comprese, infatti è estremamente complesso studiare il fenomeno di trasmissione del calore nel letto di polveri: il mezzo non è omogeneo, c'è formazione di fase liquida e le condizioni non sono stazionarie, per di più tutti i parametri che regolano i flussi termici sono connessi al materiale utilizzato e alla geometria scansionata. Risulta impossibile pertanto formulare un modello generale; per ogni condizione di processo e per ogni materiale si devono adottare diversi modelli previsionali delle proprietà del materiale finito.

1.6 La Progettazione di strutture cellulari reticolari

La progettazione e l'ottimizzazione di strutture cellulari si può pensare suddivisa in tre momenti: progettazione e modellazione delle geometrie, modellazione della simulazione e modellazione del processo AM.

Una volta scelto il reticolo adatto all'esigenza, questo viene disegnato, si passa allora a ottimizzare il modello geometrico e di conseguenza, con il modello ottimizzato si simula il processo di produzione additiva e si modifica il modello per rendere possibile la realizzazione. Insieme al processo di produzione, hanno influenza sul componente finale, la rugosità superficiale, le proprietà anisotrope del materiale fuso selettivamente ecc. Tali aspetti vanno anch'essi investigati.

L'influenza del processo AM può essere considerata nel modello di simulazione per aumentarne l'accuratezza.

Quando il risultato della simulazione del componente reticolare progettato fornisce risultati soddisfacenti, e contemporaneamente il componente risulta realizzabile con le tecnologie additive, si può passare dalla fase di progettazione a quella di realizzazione.

In questo paragrafo si descriverà lo stato d'arte della progettazione di strutture cellulari reticolari.

1.6.1 Stato dell'arte della Progettazione

Le prestazioni meccaniche di strutture cellulari reticolari 3D sono strettamente connesse con la densità relativa ($\rho/\rho s$), la relazione; M. Ashby, come descritto nel paragrafo 2.2.2, ha definito le relazioni tra proprietà lineari elastiche e densità relativa, altre proprietà meccaniche come il limite del campo elastico e plastico, il creep, la resistenza a frattura sono anch'esse correlate con la densità relativa.

Malgrado la conoscenza delle relazioni che intercorrono tra proprietà meccaniche e densità relativa possano fornire ai progettisti una base per scegliere la densità relativa del reticolo, è estremamente complesso determinare con esattezza le prestazioni di una struttura cellulare reticolare unicamente a partire da tali relazioni.

Spesso infatti, reticoli che hanno la stessa densità relativa, esibiscono delle proprietà meccaniche totalmente differenti l'uno dall'altro, con moduli elastici, moduli di taglio e moduli di Poisson distinti.

Per prevedere le proprietà meccaniche di un una struttura cellulare reticolare in modo accurato non è possibile affidarsi esclusivamente alle considerazioni di cui sopra, ma è necessario intraprendere iter di progettazione più complessi, i più importanti ad oggi utilizzati saranno descritti nei paragrafi seguenti.

1.6.1.1 Metodo Sperimentale

Il metodo sperimentale è la via più rapida per ricavare le proprietà meccaniche di una struttura cellulare reticolare di cui si è già provveduto alla realizzazione. Negli ultimi anni una gran quantità di prove meccaniche di compressione è stata condotta al fine di indagare le prestazioni di varie tipologie di strutture cellulari reticolari.

I moduli elastici ottenuti dalle prove di compressione condotte da numerosi esponenti della comunità scientifica, sono stati riassunti in alcune tabelle [15]. Di cui si riporta un estratto in tab.1.

Material	Elastic modulus of bulk material (GPa)	Lattice topology	Relative density (%)	Compressive elastic modulus (MPa)	Reference
AlSi10Mg	72.4		10	177.89–198.39	
Ti6Al4V	110		5–20	130 ± 20 to 1250 ± 40	
		6		120 ± 30 to 1250 ± 70	
	114	國	25 30 40 50	1900 ± 100 900 ± 100 3100 ± 400 4300 ± 100	
			25 30 40 50	1200 ± 400 1400 ± 200 3400 ± 300 4600 ± 200	

Tabella 1.Estratto dalla tabella riassuntiva delle strutture cellulari reticolari caratterizzate dalla comunità scientifica [15].

Questi esperimenti hanno dimostrato che le proprietà meccaniche di una struttura cellulare reticolare prodotta mediante tecniche additive non possono essere banalmente ricavate nota la densità relativa, infatti altre variabili intervengono a modificare le proprietà meccaniche del reticolo, nella fattispecie, la dimensione della cella, la dimensione delle travature che compongono la struttura, e la stessa rugosità superficiale.

In generale si è osservato che, a parità densità relativa, la resistenza del reticolo decresce all'aumentare della dimensione della cella [15]. Poiché inoltre, la rugosità delle aste realizzate con metodi additivi è elevata, questa avrà una influenza maggiore per aste piccole.

Un risultato sperimentale particolarmente interessante è quello descritto da de Formanoir [16], che sottopose dei provini di struttura cellulare reticolare in Titanio Ti-6Al-4V ad un attacco chimico. Dall'indagine delle proprietà meccaniche per mezzo di una prova di compressione, osservò che i provini sottoposti ad attacco chimico, dimostravano una rigidezza superiore rispetto agli stessi provini che non l'avevano subito, in virtù della loro più bassa rugosità.

Altri importanti studi [17] hanno dimostrato che il campo di sforzi legati ad un carico di compressione sulla struttura reticolare, non è affetto significativamente dalle aste orizzontali, perpendicolari all'asse di applicazione del carico [18].

In generale attraverso il metodo sperimentale è possibile ottenere direttamente le proprietà meccaniche del reticolo ottenuto mediante tecniche additive; tuttavia emergono ovvie limitazioni nell'implementare tale metodologia nelle applicazioni ingegneristiche:

- Il costo della produzione additiva di componenti metallici è molto alta e il metodo sperimentale richiede lo studio di numerosi provini al fine di rendere affidabile e accurato il modello.
- La produttività dei sistemi AM metallici è relativamente bassa; realizzare dei provini potrebbe richiedere diversi giorni.

Il metodo sperimentale non si presta di fatto all'ottimizzazione delle proprietà meccaniche di una struttura cellulare reticolata. Al fine di incrementare le prestazioni di una struttura cellulare è indispensabile simularle analiticamente e numericamente. Sono due i modelli studiati e applicati per stimare le proprietà meccaniche di una struttura reticolare in fase di progettazione: l'omogeneizzazione e l'analisi agli elementi finiti.

1.6.1.2 Omogeneizzazione

Con omogeneizzazione ci si riferisce ad una metodologia di progettazione in cui si sostituiscono le proprietà del materiale reale con un modello di materiale equivalente.

In questo modo è possibile superare le numerose difficoltà di simulazione connesse alle proprietà reali di una struttura cellulare reticolare specialmente in corrispondenza delle condizioni di contorno.

La teoria matematica dell'omogeneizzazione [19,20] è utilizzata per ricavare le proprietà di un materiale omogeneo equivalente ad un materiale periodico eterogeneo (una struttura cellulare è un materiale eterogeneo, pur essendo del tipo periodico omogeneo). È possibile individuare due momenti del processo: in primis, a partire dalla singola cella, si ricavano le proprietà del materiale omogeneizzato equivalente, poi, il materiale omogenizzato è sostituito alla struttura cellulare nel suo complesso.

Questo metodo risulta essere meno dispendioso in termini di risorse computazionali rispetto ai metodi agli elementi finiti; in fig.16, il modello agli elementi finiti di tipo "beam" si compone di un numero di elementi indicativamente 240 volte maggiore che nel caso di materiale omogeneizzato.

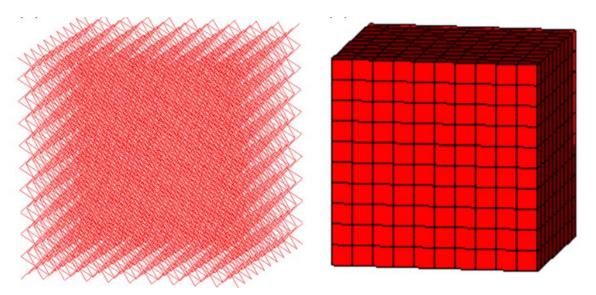


Figura 16. Un cubo di materiale lattice considerato con il metodo agli EF di tipo "beam" (sinistra) e attraverso il metodo di Omogeneizzazione (destra).

La teoria di omogeneizzazione può essere applicata alle strutture cellulari reticolari periodiche in virtù della loro periodicità: queste ultime infatti, sono composte da celle base uguali e ripetute.

Il metodo di omogeneizzazione può essere utilizzato per trovare, nella fase di progettazione, la geometria ottimale della struttura cellulare *relativamente a certe condizioni al contorno.*

Questa tecnica, oltre ad essere efficiente dal punto di vista computazionale, conduce ad un risultato affetto da un errore relativamente ridotto rispetto a quello reale: si possono infatti considerare:

- Spessori delle pareti costituenti la cella non uniformi
- Distribuzione non omogenea del materiale.

L'omogeneizzazione viene condotta a partire dallo studio delle proprietà del reticolo reale, e tiene in considerazione la dimensione delle aste e altre proprietà reali del materiale; nel processo di omogeneizzazione non vengono assunte semplificazioni per il materiale oggetto di omogeneizzazione; i risultati che si raggiungono dall'applicazione del metodo sono più affidabili e accurati di quelli ricavabili dall'applicazione del modello teorico di Ashby ed è particolarmente vantaggiosa nel caso di celle dalla geometria e forma particolarmente complesse.

1.6.2 Analisi agli Elementi Finiti

Con lo sviluppo delle tecnologie Additive Manufacturing, la libertà di progettazione è cresciuta notevolmente: i metodi di omogeneizzazione potrebbero non essere sufficientemente affidabili per strutture di tipo *freeform* o dalla geometria complessa. Attualmente la gran parte dei dimensionamenti e quindi delle simulazioni delle proprietà meccaniche di strutture cellulari reticolari, viene condotto per mezzo dei metodi basati sulla simulazione agli elementi finiti.

Generalmente esistono due approcci alla modellazione con elementi finiti: attraverso aste e attraverso elementi solidi tridimensionali. Lo studio attraverso dei modelli composti da aste consente di adottare un numero di elementi necessari alla simulazione che è stimato minore dell'1%, rispetto alla quantità di elementi richiesta dal metodo con elementi solidi per la stessa struttura. Tuttavia non sempre è possibile adottare il modello composto da sole aste.

1.6.2.1 Modello EF di elementi "beam".

La determinazione delle proprietà meccaniche elastiche, del modulo di taglio e flessionale, possono essere stimate modellando la struttura cellulare reticolare attraverso il metodo agli EF ad elementi "beam": la struttura reticolare si immagina composta da elementi "beam" unidimensionali disposti nello spazio 3D. Tale metodo è estremamente vantaggioso dal punto di vista computazionale, tuttavia trascura le proprietà dei nodi delle strutture e le zone di separazione tra il reticolo e le pareti solide. Inoltre le difettosità introdotte dal processo realizzativo sono difficilmente integrabili al modello.

1.6.2.2 Modello EF di Elementi Solidi.

Il modello agli Elementi Finiti composto da elementi "beam" presenta dei limiti connessi alla dimensione e alla rigidezza delle aste che compongono la struttura reticolare; nel caso di aste spesse e rigide, il modello di EF di aste non risulta affidabile e si discosta dai risultati sperimentali; in tal caso è necessario modellare la struttura reticolare attraverso il modello EF agli elementi solidi 3D.

Un altro vantaggio del modello EF a Elementi Solidi tridimensionali è che permette di analizzare come gli intagli e la distribuzione del materiale in relazione all'area dell'asta che costituisce il reticolo, influenzino la distribuzione delle tensioni nella struttura.

Il metodo più avanzato che si può adottare per simulare le proprietà meccaniche di una struttura cellulare reticolare è l'analisi agli elementi finiti basata su immagini micro CT; in queste analisi, il modello viene realizzato a partire da immagini tridimensionali della struttura reale, in cui sono riportati anche i difetti reali della struttura stessa.

Utilizzando la tomografia a raggi X per ricavare immagini di singole aste della struttura reticolare è possibile correggere il modello si simulazione, senza condurre prove sperimentali distruttive.

37 Introduzione

In tabella 2 sono riassunti i vantaggi e gli svantaggi di ogni metodo di analisi descritto.

Metodo	Vantaggi	Svantaggi
Metodo Sperimentale	Può essere utilizzato come riferimento per convalideare i risultati dei	Alto costo attuativo del metodo Complessità nella realizzazione di test meccanici su componenti con forme complesse nelle macchine di prova meccanica comunemente utilizzate
	Ha un costo computazionale basso	Non è applicabile a strutture cellulari reticolari eterogenee
Omogenizzazione	Adottabile per strutture cellulari non reticolari	Complessità di incorporazione nel modello della difettosità connessa al processo
	lCosto computazionale relativamente hasso	Gli elementi "beam" possono essere adottati solo se le strutture sono snelle; il metodo non è applicabile a strutture tozze.
EF con elementi "beam"	lPossibilità di modellare strutture cellulari reticolari eterogenee	Non è possibile introdurre in modo accurato la porosità legata al processo additivo
	Possibilità di modellare strutture cellulari reticolari con spessori non omogenei variando la rigidezza degli elementi "beam"	l nodi delle strutture reticolari sono difficilmente modellizzabili
	Itomografica a raggi X. in questo modo é possibile introdurre nel modello	Il costo computazionale è elevato, specialmente per strutture cellulari reticolari di grandi dimensioni.
EF con elementi solidi 3D	La modellazione delle strutture avviene per mezzo di elementi solidi	è complesso realizzare una mesh nelle aste di reticolo particolarmente fini
	F' nossibile considerae l'influenza del nodo della struttura reticolare.	La mesh introdotta potrebbe non essere sufficiente per simulare accuratamente el eproprietà della struttura reticolare

Tabella 2. Pro e contro dell'applicazione dei metodi di simulazione su strutture cellulari reticolari

1.6.3 Correzione dei modelli di simulazione

I componenti realizzati con tecniche additive manufacturing sono caratterizzati da proprietà peculiari che non possono essere trascurate nelle fasi di progettazione e simulazione di strutture cellulari reticolari.

Sono molteplici gli aspetti che vanno considerati nei modelli di simulazione, i più importanti sono:

- Influenza dell'angolo di realizzazione delle aste sullo spessore e sulle proprietà.
- Irregolarità nella superficie: "scalinatura" della superfice tra un layer e il consecutivo connessa al processo layer-by-layer.
- Presenza di porosità distribuita.
- Discrepanza tra il volume relativo reale e nominale della struttura reticolare (nei reticoli).

Questi aspetti, che caratterizzano ogni componente realizzato mediante tecniche additive, diventano più rilevanti per le strutture cellulari reticolari a causa della dimensione ridotta delle aste in relazione alle irregolarità tra layer e alla porosità presente.

La problematica della rugosità superficiale è particolarmente importante e viene relazionata anche al fatto che le polveri non completamente fuse vengano inglobate parzialmente nel bagno di fusione; tale fenomeno è connesso all'aumento di diametro delle aste della struttura reticolare, discostandosi così dal diametro nominale progettato: tale aspetto va tenuto in considerazione poiché modifica in modo significativo le proprietà meccaniche della struttura stessa.

Anche la finitura superficiale andrebbe considerata in fase di simulazione delle prestazioni del reticolo [21]; generalmente i componenti che hanno subito una lavorazione delle superfici, con un abbassamento della rugosità, presentano proprietà superiori che nel caso di superfici non lavorate, c'è tuttavia da constatare l'estrema difficoltà nella lavorazione delle superfici di una struttura reticolare. La finitura di questo tipo di strutture si ottiene per mezzo di attacchi con acidi forti che corrodono il materiale rendendo più uniformi le superfici.

Un altro importante aspetto da considerare è il pattern stesso di scansione del layer: i componenti metallici ottenuti per additive manufacturing, presentano proprietà fortemente isotrope, ciò è dovuto prevalentemente alla microstruttura anisotropa del materiale. La direzione in cui avviene la solidificazione è infatti correlata con la microstruttura del materiale [22], è correlata alla direzione ed alla traiettoria della traccia di scansione del layer. Esistono dei fattori di correzione dei modelli di simulazione per tenere in considerazione la variazione delle proprietà meccaniche in funzione in funzione della posizione di crescita del componente e del pattern di scansione.

1.7 Integrazione delle strutture cellulari reticolari a componente

L'integrazione delle strutture cellulari reticolari ed componenti solidi pieni rappresenta una soluzione tecnologicamente avanzata per accrescere le prestazioni meccaniche in termini di rapporto resistenza meccanica su peso, di un componente; l'introduzione di un reticolo permette una riduzione significativa del peso del componente finale: le zone sostituite con strutture cellulari reticolari arrivano a pesare anche il 95% in meno che le stesse zone in materiale bulk, mantenendo una funzione strutturale.

La logica di ottimizzazione topologica del componente che si adotta in fase di integrazione della struttura reticolare al bulk, è quella di inserire materiale esclusivamente dove necessario.

Le strutture reticolari sono una soluzione estremamente interessante al fine di ottenere una riduzione di peso del componente attraverso una ottimizzazione topologica: i reticoli infatti offrono una flessibilità di progettazione notevole.

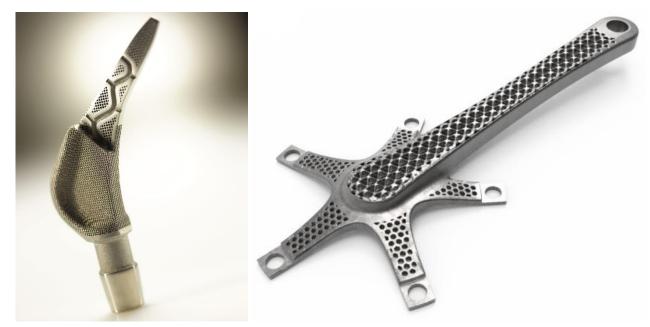


Figura 17. Componenti alleggeriti mediante l'introduzione di strutture cellulari reticolari. A sinistra una protesi d'anca [23], a destra una pedivella di una bicicletta da competizione.

Capitolo 2

Progettazione di componenti alleggeriti mediante l'introduzione di strutture cellulari reticolari

2.1 Proposta di un modello di workflow di progettazione e ottimizzazione topologica

L'interesse che è stato riservato negli ultimi anni, nei campi dell'ingegneria meccanica, alle strutture cellulari reticolate, ha stimolato l'introduzione nel mercato, di strumenti software per la disegnazione 3D di tali strutture. La fase di progettazione è stata ed è tutt'ora, benché in misura inferiore che in passato, un collo di bottiglia nel processo che porta alla realizzazione delle strutture fortemente ne limita l'utilizzo e la diffusione; i metodi di progettazione negli ambienti CAD tradizionali lasciavano poca libertà al progettista e la fase di scelta del reticolo era di fatto vincolata alla selezione di pochi parametri geometrici collegati alla geometria del reticolo stesso; le ricerche della comunità scientifica, si è pertanto limitata per anni a indagare le relazioni tra le proprietà meccaniche dei reticoli e una piccola parte dei parametri ad oggi utilizzabili per disegnare un reticolo.

Con lo sviluppo di software dedicati alla progettazione di strutture reticolari e all'integrazione delle stesse a componenti bulk, la fase di drawing è stata resa più semplice, tuttavia l'integrazione di strutture reticolari e componenti bulk rimane ancora un processo non immediato.

I nuovi software di progettazione e integrazione di strutture reticolari e componenti bulk, hanno ampliato in modo significativo le prospettive di utilizzo di questi componenti alleggeriti; ad oggi le strutture cellulari reticolari vengono utilizzate e introdotte in componenti dalle geometrie complesse, per cui i metodi di progettazione e ottimizzazione utilizzati in passato non sono più applicabili in quanto adatti a livelli di complessità dei reticoli inferiore.

Per le motivazioni di cui sopra, si proporrà a seguire un innovativo workflow progettuale per componenti ottimizzati topologicamente attraverso l'introduzione di strutture cellulari reticolari.

La progettazione di un componente contenente una struttura reticolare può essere pensata articolata in 3 momenti (all'interno di un processo iterativo):

- 1. Il Pre-Processo
- 2. Simulazione agli Elementi Finiti Solidi
- 3. Ottimizzazione Topologica

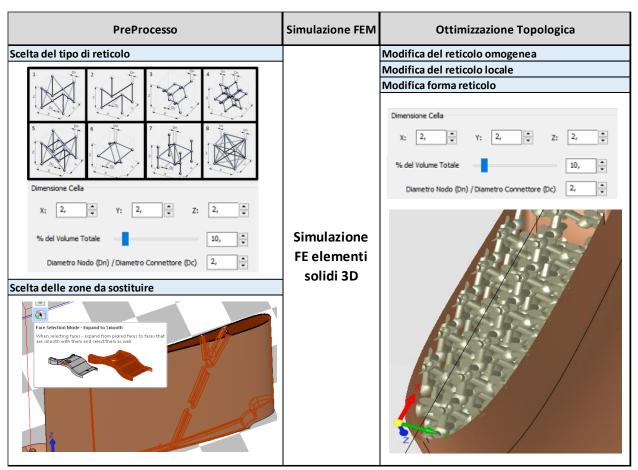


Figura 18. Schema semplificato: le tre fasi della progettazione di componenti "lattice-integrated" applicate ad un alettone di vettura monoposto da competizione.

2.1.1 Pre-processo

La fase di pre-processo consiste nella:

 scelta del tipo di reticolo, della geometria e dei parametri caratteristici di cella: i software più avanzati di progettazione di reticoli permettono di disegnare un gran numero di tipologie di strutture cellulari reticolari di tipo periodico (fig.19), i reticoli non periodici, non sono ancora disegnabili dai programmi di progettazione specifici più utilizzati (come 3DXpert o nTopology); è possibile progettare reticoli non periodici attraverso software di modellazione di l'operazione estremamente complessa superfici, ma è l'implementazione di funzioni specifiche per la singola applicazione. Esula da questa trattazione lo studio di tale tipologie di strutture cellulari. Gli studi condotti sulle strutture cellulari reticolate hanno permesso di restringere la scelta della tipologia di reticolo a quelle elencate a seguire, queste strutture sono tutte del tipo stretch-dominated e garantiscono il miglior compromesso tra proprietà meccaniche e peso:

#	Struttura
1	Diagonale
2	Diagonale Alleggerita
3	Octect Truss
4	Dodecaedro
5	Diamante e diagonali
6	Diamante
7	Diamante e Colonne
8	Cubico Facce Centrate

Tabella 3. Tipi di celle maggiormente utilizzate nella pratica di progettazione delle moderne strutture cellulari reticolari.

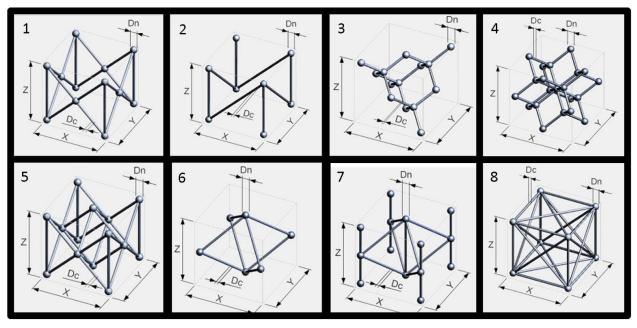


Figura 19.Rappresentazione delle celle base maggiormente utilizzate nella moderna pratica di progettazione di strutture cellulari reticolari.

I software di disegno più avanzati permettono di progettare anche geometrie di celle personalizzate. Una volta scelto il tipo di cella base che costituirà il reticolo, si dovranno individuare i parametri che definiscono le dimensioni della cella e delle aste e nodi che la costituiscono.

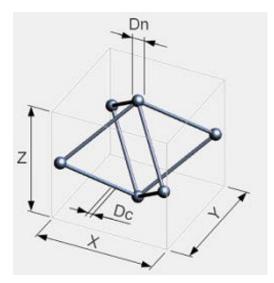


Figura 20. Cella romboidale con parametri di cella caratteristici

I parametri che generalmente adottati all'atto pratico della progettazione sono (con riferimento alla fig.20):

- Le dimensioni massimali della cella base che costituisce il reticolo (ovvero X, Y e Z)
- La frazione di volume di reticolo rispetto al pieno, indicato come %Volume Totale: questo parametro è equivalente alla densità relativa ρ^* definita al paragrafo 1.4
- Il rapporto tra il diametro dei nodi (*Dn*) e il diametro dei connettori o aste (*Dc*) che compongono il reticolo (*Dn/Dc*): questo parametro è stato introdotto solo nelle ultime versioni dei software di progettazione e rappresenta una variabile progettuale in più rispetto al passato.

La definizione dei suddetti parametri (o dei parametri linearmente dipendenti) permette di ottenere un reticolo univocamente definito.

2. Scelta delle zone da sostituire con il reticolo nel componente bulk: l'individuazione delle zone del componente pieno da sostituire con il reticolo, è conducibile a partire da un'analisi non raffinata agli elementi finiti, che possa evidenziare le zone sottoposte a minor stress: in tali zone si effettuerà la sostituzione del materiale bulk con il materiale cellulare. La sostituzione delle zone interessate avviene a partire della definizione di una superficie fittizia che le contenga, a partire da tale superficie, per mezzo di funzioni booleane, è possibile selezionare la porzione di materiale da sostituire con il reticolo precedentemente scelto.

2.1.2 Simulazione agli Elementi Finiti Solidi

In passato la progettazione e la simulazione delle proprietà di componenti integrati con strutture reticolari era limitata componenti di geometria semplice, pertanto i vantaggi connessi al risparmio di risorse computazionali faceva dei metodi sperimentali, di omogeneizzazione e agli EF con elementi "beam" una scelta da preferire a metodi agli elementi finiti solidi 3D.

I moderni componenti lattice integrati, grazie ai nuovi software di progettazione sono caratterizzati da:

- nuovi parametri di reticolo e nella fattispecie la possibilità di definire Dn, il diametro del nodo (e la forma dello stesso).
- Superfici di separazione tra lattice e solido di forma complessa.
- Componenti alleggeriti di forma complessa.

Queste caratteristiche decretano il fallimento dei metodi di simulazione precedentemente adottati: malgrado il dispendio di risorse computazionali superiore, il metodo agli EF solidi tridimensionali è l'unico metodo in grado di tenere in considerazione l'influenza di un nodo maggiorato o le superfici di separazione tra reticolo e solido di forma complessa, fornendo una stima attendibile delle prestazioni del componente.

2.1.3 Ottimizzazione topologica

All'interno della fase di ottimizzazione topologica possono essere identificate le seguenti operazioni:

- 1. Modifica della tipologia di reticolo e dei parametri caratteristici della cella.
- 2. Modifica della zona di materiale pieno sostituita con il reticolo.
- 3. Modifica locale del reticolo: ottimizzazione topologica locale della cella, modifica locale dello stato tensionale del reticolo.

2.2 Considerazioni sul metodo progettuale proposto

Il "modus operandi" che si propone in questa trattazione è frutto di considerazioni derivanti dall'esperienza diretta nel campo dell'industria della produzione Additive Manufacturing. L'utilizzo di componenti integrati con strutture reticolari è riservato ad applicazioni dall' alto contenuto tecnologico, generalmente relative all'ingegneria aerospaziale e biomedicale, e per le quali si richiede estrema affidabilità. Le simulazioni dei comportamenti sotto carico dovranno essere pertanto relativamente precise, e dovranno considerare la difettosità e l'eterogeneità delle strutture considerate. La produzione di un componente mediante tecnologie additive ha dei costi complessivi elevati, e sempre nell'ordine delle migliaia di euro; questo ha spinto il mercato a riservare i metodi di realizzazione additive solo ai componenti di geometrie estremamente complesse e non realizzabili mediante altre tecnologie produttive.

Negli ultimi anni inoltre, sono state realizzate macchine additive metalliche dai volumi di lavoro sempre maggiori (fino a 1000x800x800 mm), in cui la polvere viene scansionata da più laser contemporaneamente; il funzionamento di tali macchinari è stato relegato a componenti di piccole dimensioni (prodotti in quantità elevate), infatti le dilatazioni termiche di componenti di grande dimensione sono difficilmente controllabili. I ritiri differenziali del componente causati dal passaggio del laser, pretensionano fortemente il componente e non di rado, i supporti di ancoraggio del pezzo alla piattaforma vengono rotti dalle deformazioni del componente stesso. È oramai pratica consolidata limitare la dimensione massima dei componenti realizzati con tecnologie additive ad un valore prossimo a 400x400x400 mm a prescindere dal build volume disponibile.

Per le motivazioni sopra esposte, con il workflow progettuale proposto, si consiglia di abbandonare l'utilizzo di metodi previsionali delle proprietà meccaniche che si basano sui metodi sperimentali, di omogeneizzazione o EF di tipo "beam".

Questi ultimi possono fornire risultati attendibili per reticoli dalla geometria semplice, e per reticoli in cui non si interviene ottimizzando la dimensione dei nodi, inoltre tali metodi non permettono di prevedere con precisione le proprietà di strutture integrate, in cui è presente un'interfaccia reticolo-solido, come ampliamente dimostrato negli ultimi anni da più studi di settore.

I metodi previsionali delle proprietà meccaniche agli elementi finiti solidi tridimensionali si profilano pertanto come l'unica scelta perseguibile al fine di dimensionare i tipici componenti integrati con strutture cellulari reticolari richiesti dal mercato.

Lo studio dei metodi agli elementi finiti solidi e il loro affinamento finalizzato al dimensionamento di componenti integrati realizzati mediante tecniche additive, è oggetto di studio da parte della comunità scientifica da diversi anni.

Adottare il metodo di simulazione FEM con elementi solidi tridimensionali, per strutture cellulari reticolari, richiede un tempo di calcolo non trascurabile, per questo motivo è importante scegliere i parametri caratteristici di reticolo di primo tentativo in modo tale che siano il più vicino possibile a quelli ottimali. Inoltre, in fase di ottimizzazione topologica è importante modificare i parametri di reticolo per entrare nella seconda iterazione in modo tale da avvicinarsi all'ottimo di progettazione con il minor numero di iterazioni possibile.

L'obbiettivo di questa trattazione è quello di sviluppare una guida operativa per la progettazione e l'ottimizzazione topologica di componenti integrati con strutture cellulari reticolari, così da poter raggiungere l'ottimo ti progettazione in nel modo più rapido possibile e con il minor dispendio possibile di risorse. Il lavoro si focalizzerà nel fornire indicazioni di progettazioni efficaci, che tengano in considerazione delle criticità realizzative e dei moderni parametri geometrici di reticolo, oltre che delle proprietà meccaniche.

Nel dettaglio:

 Pre-Processo: i parametri di cella che definiscono le strutture cellulari reticolari integrate di primo tentativo, dovranno possibilmente essere il più vicine possibili all'ottimo di progettazione. Inoltre la simulazione EF con elementi solidi non considera i limiti connessi alla tecnologia produttiva. Quando il reticolo viene integrato ad un solido, questo avrà, nella fase di realizzazione, una funzione di supporto delle strutture da esso sostenute. Nella zona occupata dal reticolo, infatti, non è possibile inserire dei supporti rimuovibili in fase di finitura.

Si deve evitare di adottare una combinazione di parametri di reticolo che, pur rivelandosi ottimale in fase di simulazione, non consente la realizzazione del componente. Questo accade quando il reticolo non fornisce il supporto richiesto dalle pareti solide durante il processo additivo. In fase di pre-processo andrà inoltre valutata l'influenza dei parametri caratteristici di cella sulle proprietà metallografiche del solido e del reticolo stesso (questo argomento sarà trattato nel Cap.5).

• Ottimizzazione Topologica: per questa fase è necessario conoscere la relazione con cui le prestazioni meccaniche di una certa struttura cellulare reticolare sono correlate ai parametri di cella.

Nei capitoli seguenti verranno investigate le relazioni tra i moderni parametri di cella e le proprietà meccaniche in strutture cellulari reticolari. Saranno indagati inoltre i valori limite entro i quali è possibile variare i parametri caratteristici di cella, senza incorrere in problematiche di carattere realizzativo.

Capitolo 3

Le strutture cellulari reticolari periodiche: provini, prove meccaniche e risultati

In questo capitolo verranno descritte le prove meccaniche condotte in questa ricerca. Si descriverà la fase progettazione dei provini di struttura cellulare reticolare, per cui verranno illustrate le motivazioni che hanno portato alla scelta dei parametri geometrici e di processo adottati. Verrà inoltre descritto il processo realizzativo delle strutture e le sue criticità. Infine si presenteranno i risultati delle prove meccaniche di compressione.

I provini sono stati realizzati per mezzo di processi additivi metallici, utilizzando il macchinario DMP ProX 320B. La polvere istallata nel macchinario è della lega di alluminio AlSi10Mg. Le singole particelle che costituiscono il letto di polveri sono prodotte per spray atomization ed hanno una dimensione compresa tra 20 e 50 µm, valore tipico delle polveri commerciali.

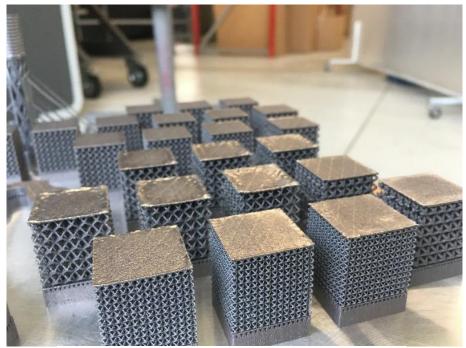


Figura 21. Alcuni dei provini prima del Post-processo

3.1 Realizzazione dei provini

La ricerca della relazione tra le proprietà meccaniche di una struttura cellulare reticolare e i parametri geometrici di reticolo, si è sviluppata a partire da prove di compressione su 14 tipologie di provini differenti.

La scelta delle proprietà geometriche di reticolo è stata condotta coerentemente a al proposito di questo lavoro di tesi, ovvero di fornire delle valide indicazioni pratiche per la pratica di progettazione di strutture cellulari reticolari.

3.1.1 Scelta delle caratteristiche geometriche dei provini

I provini che sono stati sottoposti a test di compressione sono di forma cubica con dimensioni massimali di 25x25x25mm. Tale dimensione è stata scelta essenzialmente per due motivazioni:

- Dimensioni coerenti con la normativa ASTM E9-09 comunemente adottata all'interno dei laboratori di ricerca del Politecnico di Torino come riferimento per le prove meccaniche a compressione [24].
- Condurre uno studio in cui si potesse trascurare l'influenza delle dimensioni della struttura sul modulo Elastico

3.1.1.1 Dipendenza della rigidezza dalle dimensioni della struttura cellulare

La rigidezza di una struttura cellulare reticolare è connessa a numerose variabili, quelle a cui si attribuisce maggiore rilevanza sono:

- La dimensione della cella, che supposta di dimensioni uguali in tutte le direzioni, verrà identificata con *D*.
- La percentuale di volume rispetto al totale *%VolumeTot* (come introdotto nel paragrafo 2.1.1)
- La dimensione dei nodi rispetto a quella dei connettori "Dn/Dc".
- La direzione di applicazione del carico.
- La dimensione totale del reticolo in relazione alla dimensione della cella base o analogamente, il numero delle celle dei piani perpendicolari al carico *n*.

Ovvero, il modulo elastico di una struttura cellulare reticolare sottoposta a compressione può essere definito da una funzione del tipo:

$$E_c = E_c \left(D, \%VolTot, \frac{Dn}{Dc}, n \right)$$
 (3.1)

La dimensione totale del reticolo è una variabile che generalmente viene trascurata nello studio delle strutture cellulari reticolari. Fissando le altre variabili, il modulo elastico di una struttura reticolare decresce con proporzionalità inversa secondo il cubo della dimensione del reticolo [18]. Questa diminuzione di rigidezza della struttura viene associata ad una introduzione di celle nei piani orizzontali, che in tal caso corrispondono a quelli perpendicolari al carico, considerato di compressione, applicato nella direzione verticale. La rigidezza del reticolo, invece, non viene influenzata dall'introduzione di celle lungo la dimensione verticale. La rigidezza della

struttura è pertanto connessa con il numero di aste nella direzione in cui viene applicato lo sforzo e più precisamente, al numero di celle nel piano perpendicolare al carico.

Prendendo come esempio la struttura di tipo FCC-L Cubico Facce Centrate alleggerita, rappresentata in fig.22, la comprensione di tale comportamento risulta più intuitiva.

La singola cella ha quattro aste verticali.

Considerando sul piano orizzontale, insieme a questa prima cella, una seconda,

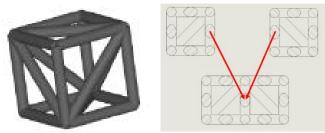


Figura 22. Struttura FCC-l e unione di più strutture sullo stesso piano

identica alla prima, saranno presenti 8 aste verticali.

Tuttavia se le due celle fossero unite a formare un reticolo "2x1", il numero totale di aste verticale sarebbe 6. Pertanto una struttura reticolare presenterà una rigidezza inferiore delle due celle che la compongono, prese singolarmente. Il ragionamento può essere esteso a strutture di dimensioni superiori.

Il comportamento appena descritto converge ad un valore del modulo di modulo elastico della struttura cellulare per cui, incrementando il numero di celle nel piano orizzontale, la rigidezza della struttura non ne viene più influenzata.

Per tale condizione, il modulo elastico della struttura sottoposta a compressione sarà del tipo:

$$E_c = E_c \left(D, \%VolTot, \frac{Dn}{Dc} \right)$$
 (3.2)

Valida per

$$n(D) > n_d(D)$$

Con n_d : numero di celle dei piani perpendicolari al carico discriminante dopo il quale E_c rimane costante al variare di n.

La scelta dei parametri geometrici di struttura è stata condotta in modo tale da ricadere nella condizione descritta dall'equazione di cui sopra, in base alla quale le proprietà meccaniche elastiche di reticolo non dipendono da n.

3.1.2 Scelta dei *parametri* geometrici della struttura cellulare reticolare

Il tipo di cella base scelta come oggetto dello studio, è del tipo "diamond", tipologia tra le maggiormente adottate nelle progettazioni di strutture cellulari reticolari per il campo automotive e aerospaziale.

La valutazione esatta del numero di celle per cui il modulo di Young non è più condizionato dal numero di celle orizzontali del piano (campo di validità dell'equazione 3.2) è possibile testando a compressione una serie di provini, ottenuti variando il numero di celle n, mantenendo costante il valore D (variando le dimensioni massime del provino lungo il piano perpendicolare al carico) e ripetendo l'operazione per diversi valori del parametro D.

Dai risultati delle prove meccaniche si sarebbero potute individuare le dimensioni massimali (L_{max}) del provino lungo il piano perpendicolare al carico, per ogni valore di D per cui rimane valida l'equazione 3.2. La scelta delle dimensioni del provino per cui si sarebbe potuto operare un confronto tra strutture con parametri di cella differente, all'interno del campo di validità dell'eq.3.2 si ottiene a partire da:

$$Lmax = n_d * D_{max} \quad (3.3)$$

dove:

n: numero di celle del piano perpendicolare al carico; per n>n_d

 \mathbf{D}_{max} : dimensione di cella massima per il quale si decide di realizzare la comparazione.

 L_{max} : dimensione del provino con dimensioni D_{max} per cui vale l'eq.3.2.

In altri termini, l'equazione 3.2 rimane valida per qualunque provino di dimensioni L_{max} per cui le dimensioni di cella sono inferiori a D_{max} .

In questa trattazione tuttavia non è stata compiuta tale valutazione empirica.

I provini realizzati hanno parametri caratteristici definiti in tab.4.

Lmax (mm)	D (mm)	%VolTot (%)	Dn/Dc	n (#)
25	2/3/4	10 / 20 / 25	1/2	>200

Tabella 4. Intervalli di variabilità dei parametri geometrici dei provini realizzati

Il valore L_{max} è stato scelto considerando in primis *il massimo* valore compatibile con la normativa adottata (per avere il maggior numero di n possibile), e calcolando il numero di celle n per tale valore. In letteratura alcuni studi riportano che un valore di $n \ge 200$ consente di ricadere, per strutture cellulari reticolari di tipo FCC-I, nel campo di validità dell'eq.3.2 [18], e tale valore risulta sempre verificato per L_{max} adottato.

Con questi provini si è voluto indagare anche il comportamento delle proprietà meccaniche al variare della dimensione dei nodi; si è quindi variata, tra un provino e l'altro, la dimensione dei nodi, concepiti come sfere, a parità degli altri parametri.

Il parametro Dn/Dc è stato a lungo trascurato dagli studi condotti dalla comunità scientifica riguardanti le proprietà meccaniche di strutture reticolari; i moderni software di progettazione di strutture cellulari includono la possibilità di modificare tale parametro.

Per poter studiare la variazione delle proprietà meccaniche al variare di Dn/Dc, per ogni combinazione di D, %VolTot sono stati realizzati 2 tipologie provini, uno con dimensione di nodo standard e l'altro con diametro di nodo maggiorato (di un fattore 2).

Come si vedrà nel capitolo seguente, la maggiorazione del nodo consente di incrementare le prestazioni del reticolo a parità di frazione volumica occupata dal reticolo.

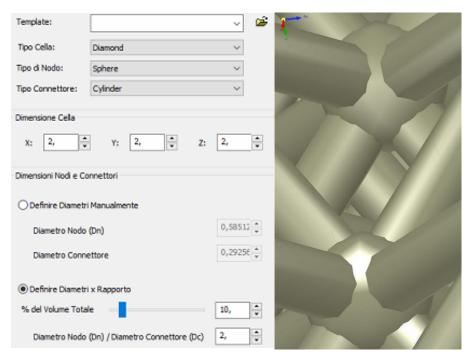


Figura 23. Definizione della struttura cellulare reticolare in "3DXpert" software di progettazione additive manufacturing.

Ogni provino inoltre è stato dotato di due pareti sottili entro le quali la struttura cellulare rimane contenuta.

Queste pareti solide piane hanno la funzione di:

- agevolare la realizzazione del reticolo e la rimozione di supporti; i supporti generalmente realizzati per sostenere un componente all'interno del letto di polvere, sono costituiti da pareti sottili verticali insieme a cilindri e coni verticali che compenetrano il componente stesso. La rimozione dei supporti è una operazione che viene compiuta a mano, distaccare un supporto da una struttura reticolare è complesso e spesso causa la rottura di parte della struttura cellulare reticolare.
- Fornire una superficie piena di accoppiamento con i piatti della macchina per la prova a compressione.

In tabella sono riportati i parametri geometrici che definiscono i reticoli realizzati.

#	Tipo di struttura	Dimensione Cella (mm)	Dn/Dc	%Volume Tot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)
1	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30
2	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59
3	Diamond	4	2	0,10	1,16	0,58
4	Diamond	3	1	0,20	0,65	0,65
5	Diamond	3	2	0,20	1,25	0,62
6	Diamond	4	1	0,25	0,98	0,98
7	Diamond	4	2	0,20	1,66	0,83
8	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59
9	Diamond	4	2	0,25	1,87	0,94
10	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30
11	Diamond	2	2	0,10	0,59	0,29
12	Diamond	3	1	0,10	0,45	0,45
13	Diamond	3	2	0,10	0,87	0,43
14	Diamond	4	1	0,20	0,86	0,86

Tabella 5. Caratteristiche dei 14 tipi di provino realizzati

In totale sono stati realizzati 42 provini, 3 per ognuna delle per ogni tipologia di tipologie, 2 dei quali sono stati sottoposti a prove di compressione di tipo distruttivo, il terzo è stato conservato come campione per le analisi statiche.

Alcune tipologie di struttura sono state realizzate più volte; i provini sono stati realizzati una seconda volta perché si è ritenuto necessario validare i risultati ottenuti precedentemente. (ad esempio i provini 1 e 10, 8 e 2 sono tra di loro uguali).

1.3 Disegno e realizzazione dei provini

La progettazione dei provini è stata condotta mediante il software di disegno dedicato alla stampa 3D metallica: 3DXpert.

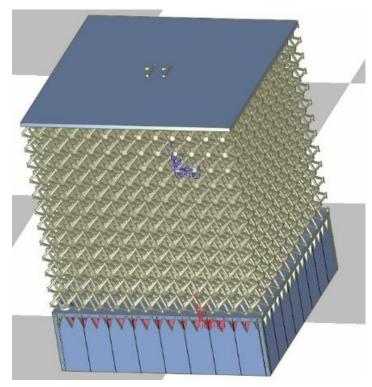


Figura 24. CAD 3D del provino 11 con supporti.

Una volta definita la struttura cellulare reticolare per mezzo dell'apposita funzione interna al programma, sono stati disegnati i supporti dei provini, con la funzione di ancorare i provini stessi alla piattaforma di alluminio.

I documenti CAD ottenuti sono stati quindi "affettati", la funzione di *slicing* (affettamento), permette di calcolare punto per punto, istante per istante, la potenza, la velocità e la posizione del laser durante la scansione di ogni layer. Tale funzione applica algoritmi in cui le variabili di ingresso sono la geometria e la dimensione della fetta di componente da fondere in relazione al substrato, ovvero alle fette di componente scansionate nei layer precedenti; la funzione analizza e opera una previsione sulle tensioni interne al materiale che si produrranno a causa delle dilatazioni termiche differenziali in fase di fusione selettiva. L'output della funzione è una matrice contenente, per ogni piano, la potenza del laser associata ad ogni coordinata del layer, quindi la sua velocità.

È importante che il componente non sviluppi internamente delle tensioni residue tali da deformare il componente stesso, e di conseguenza, rompere i supporti: la deformazione eccessiva di un componente o la rottura dei supporti, potrebbero causare il bloccaggio del *recoater*, pregiudicando così la buona riuscita dell'intera lavorazione

Particolare attenzione è stata dedicata alla realizzazione dei supporti, infatti la superficie di 0.25 mm su cui la struttura cellulare si appoggia, tende a deformarsi,

imbarcandosi (fenomeno tipico nelle tecnologie a letto di polvere metallico quando si scansiona una superficie piatta) o sviluppando concavità in corrispondenza dei punti di compenetrazione dei supporti con la stessa. Per mitigare tale problematica, si è progettato un supporto fitto, con numerosi punti di contatto con la superficie. Un supporto di questo tipo trasmette in modo più efficiente il calore, infatti, essendo il letto di polvere un isolante termico a causa dei numerosi vuoti tra le particelle metalliche, il supporto è di estrema importanza per l'evacuazione del calore dal pezzo.

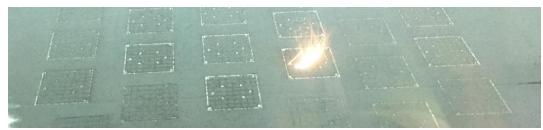


Figura 25. Scansione dei supporti.

È importante che il piano su cui appoggia il reticolo non sia deformato, infatti questo potrebbe compromettere l'adesione del reticolo al piano stesso.

La piattaforma con i provini ancora connessi tramite i supporti è stata rimossa dalla macchina e quindi sottoposta al trattamento termico di distensione.



Figura 26. Estrazione della piattaforma dal letto di polvere

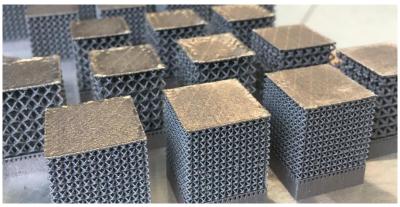


Figura 27. Piattaforma rimossa dalla macchina, prima del trattamento termico.

Il post-processo e la finitura dei componenti incominciano con il trattamento termico di distensione: la piattaforma con i provini ancora connessi è stata inserita in un forno a 250°C per circa 150 minuti e lasciata raffreddare in forno fino a temperatura ambiente. I provini sono stati quindi rimossi dalla piattaforma per mezzo di una sega a nastro e finiti manualmente.

La finitura ha richiesto:

- Rimozione dei supporti attraverso strumento di taglio apposito.
- Pulizia e spianatura delle facce.

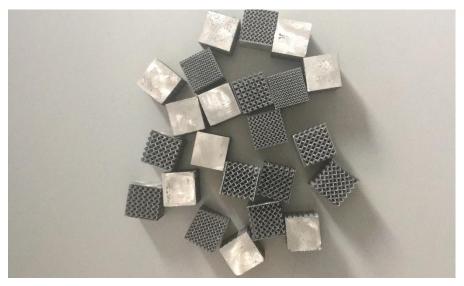


Figura 28. Provini alla fine del postprocesso, prima delle prove meccaniche di compressione

Come è possibile osservare da fig.27, le superfici piane connesse con la struttura cellulare reticolare hanno rugosità e difettosità differenti. Le difettosità sono state rimosse manualmente tramite un piano abrasivo fino all'ottenimento di superfici perfettamente piane e parallele tra loro.

3.2 Test di compressione

Il test di compressione a cui sono state sottoposte le strutture cellulari è stato condotto sotto controllo di deformazione alla velocità di 2 mm/min. La macchina utilizzata per le prove è una MTS Alliance LPS 504.

Lo spostamento del piatto superiore è misurato attraverso un deflettometro, mentre il carico applicato è rilevato direttamente da una cella di carico.

Per garantire migliore accoppiamento tra i piatti della macchina e il provino, è stata inserita una sfera tra il cilindro metallico a contatto diretto con il provino e quello connesso direttamente alla cella di carico; anche una modesta non planarità tra la due facce orizzontali del provino a contatto con la macchina, potrebbe invalidare i risultati della prova.

Le prove di compressione sono state filmate con una telecamera adottando un frame rate di 60FPS, ciò ha permesso di valutare la dinamica della rottura delle strutture cellulari studiate.

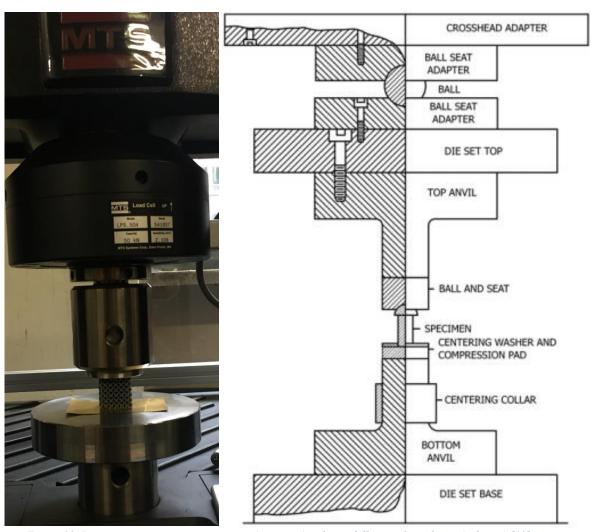


Figura 29. Provino sottoposto a compressione (a sinistra), schema della macchina di test (a destra) [18]

Sono stati testati 28 provini, 2 per ogni tipologia riportata in tab.5

La velocità di avvicinamento della piattaforma superiore a quella inferiore, che genera la compressione dei provini, è stata individuata previa compressione di 4 provini appositamente realizzati per il settaggio della macchina.

3.3 Risultati delle prove sperimentali

I test di compressione condotti sui provini di strutture cellulari hanno fornito delle curve Carico-Deformazione con andamento similare tra loro, per questo motivo si riporterà a scopo esemplificativo la curva Carico-Deformazione ottenuta per uno dei provini a cui è stato associata la numerazione 10 (fig.30).



Figura 30.Curva Carico-Deformazione per il provino numero 10

È possibile distinguere due macro-zone: con riferimento a fig.30 la zona A descrive il comportamento elastico della struttura, che si conclude con la rottura delle aste in corrispondenza del piano di scorrimento a 45° (A); la zona B, in cui si osservano i fenomeni plastici e lo scorrimento dei piani.

In campo elastico, il provino inizialmente si deforma sotto il carico di compressione a cui viene assoggettato; il piano di scorrimento a 45° all'incrementare del carico, presenta una deformazione superiore ai piani adiacenti, fino al raggiungimento del collasso (fig.30.6). Esula dagli obbiettivi preposti indagare le proprietà nella zona B, tuttavia si riporta la seguente considerazione: il comportamento descritto dalla curva in corrispondenza della zona B, è connesso al tipo di cella, il quale influenza in modo diretto la dinamica della frattura e di scorrimento dei piani. Il tipo di cella scelto descrive piani di scorrimento a 45°. Lo scorrimento di un piano comporta la frattura delle aste in corrispondenza dello stesso; non appena lo scorrimento termina, la struttura esibisce ancora un comportamento elastico. Questo comportamento si ripete più volte. Più piccola è la dimensione della cella, e più marcato sarà questo andamento.

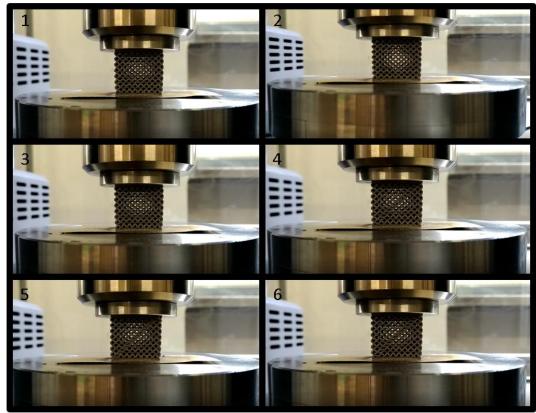


Figura 31. Provino sottoposto a carico di compressione fino allo scorrimento del primo piano.

3.3.1 Le prestazioni meccaniche dei provini

A partire da ogni curva Carico-Deformazione del tipo in fig.30 sono stati calcolati i valori del modulo elastico e del carico al quale avviene lo snervamento della struttura cellulare reticolare (in base alla *definizione dello 0.2%.*)

#	Tipo di struttura	Dimensione Cella (mm)	Dn/Dc	%Volume Tot (%)	Eave(Mpa)	PAve(N)
1	Diamond	2	1	0,10	338	5028
2	Diamond	4	1	0,10	82	1557
3	Diamond	4	2	0,10	114	1550
4	Diamond	3	1	0,20	228	6581
5	Diamond	3	2	0,20	527	7478
6	Diamond	4	1	0,25	380	8186
7	Diamond	4	2	0,20	514	6712
8	Diamond	4	1	0,10	71	1279
9	Diamond	4	2	0,25	741	11008
10	Diamond	2	1	0,10	367	5100
11	Diamond	2	2	0,10	277	4334
12	Diamond	3	1	0,10	123	1894
13	Diamond	3	2	0,10	141	2409
14	Diamond	4	1	0,20	310	5097

Tabella 6. Risultati delle prove meccaniche di compressione, i valori indicati sono la media delle misurazioni effettuate

Per ogni tipologia di provino analizzato sono state realizzate due prove di compressione, in tab.6 si riportano solo i valori del modulo elastico e del carico di snervamento medi tra le due prove.

Capitolo 4

Analisi dei risultati delle prove sperimentali

In questo capitolo, i risultati delle prove meccaniche verranno analizzati. I provini di struttura cellulare reticolare sono stati ispezionati più approfonditamente, nella fattispecie si son condotte delle misurazioni di volume e densità, insieme ad uno studio al microscopio elettronico.

L'identificazione delle proprietà fisiche e geometriche reali dei provini di struttura cellulare reticolare ha permesso di correggere le considerazioni preliminari a proposito delle relazioni che legano le prestazioni meccaniche e parametri caratteristici di reticolo.

4.1 Misurazione delle proprietà fisiche con bilancia idrostatica

Il Principio di Archimede è applicato al fine di misurare la densità del materiale cellulare reticolare esaminato. Un corpo immerso in un liquido è soggetto ad una forza di galleggiamento, diretta verso l'alto, e in modulo pari al peso del volume di liquido spostato dal corpo immerso. Tale forza di galleggiamento va sotto il nome di spinta idrostatica.

4.1.1 Base teorica della misurazione

Attraverso una bilancia idrostatica, strumento in grado di misurare il peso di un solido in aria en in un mezzo liquido, che nel caso in esame è acqua, è possibile determinare la forza idrostatica considerando la differenza di peso tra provino immerso in liquido e in aria vale:

$$G = W(a) - W(H20)$$
 (4.1)

dove:

- W(a)= peso del solido in aria
- *W(H2O)*= peso del solido immerso in acqua.

Dalla G è possibile pertanto calcolare il volume immerso in acqua:

$$V = \frac{G}{\rho} \qquad (4.2)$$

dove:

V= volume del solido

 ρ_{H2O} = densità dell'acqua.

La misurazione delle proprietà fisiche di un provino di struttura cellulare reticolare presenta numerose criticità; per ottenere una misurazione accurata è necessario tenere in considerazione la presenza di alcune fonti di errori nella misurazione:

- I provini di struttura cellulare reticolare hanno una geometria interna particolarmente complessa, le celle della struttura offrono una resistenza al passaggio dell'acqua quando il provino viene immerso, per tale motivazione, il provino potrebbe preservare bolle d'aria all'interno; la problematica è acuita per provini in cui il diametro di cella è particolarmente fine.
- La polvere metallica d'alluminio, da cui sono stati fusi selettivamente i componenti, potrebbe rimanere adesa alle superfici esterne dalla struttura reticolare. Per provini in cui le dimensioni di cella sono piccole, la polvere tende a formare degli agglomerati difficilmente evacuabili dalla struttura. La presenza di polvere e agglomerati è causa di errore nella misurazione.
- La forza idrostatica di galleggiamento dipende temperatura del liquido in cui viene immerso il solido, infatti, la densità del dell'acqua è funzione temperatura.
- Il solido è soggetto ad una forza di galleggiamento anche nel mezzo gassoso, generalmente questa fonte di errore viene trascurata.

Per ridurre le imprecisioni nella misurazione connesse alle fonti di errore sopra descritte si è:

- misurata la temperatura dell'acqua in cui è stato immerso il provino. Il valore della densità dell'acqua è stato corretto a partire dalle tabulazioni della funzione della densità, al variare della temperatura.
- I provini sono stati soggetti ad una pulizia profonda, per rimuovere le polveri metalliche adese al reticolo, nella fattispecie, le strutture sono state investite con getto di aria compressa e lavate con alcool. Successivamente queste ultime sono state immerse in un bagno ad ultrasuoni.
- Per evitare che le bolle d'aria permanessero all'interno del provino in fase di misurazione, ogni provino è stato immerso previamente in contenitore d'acqua in cui attraverso una immissione forzata d'acqua, si è provveduto a rimuovere le bolle d'aria interne. Le superfici del reticolo pertanto sono state bagnate prima dell'immersione nel contenitore di misurazione, ciò ha permesso di favorire la penetrazione dell'acqua nel reticolo (una superficie bagnata ha un angolo di bagnabilità ridotto)

Le operazioni di pulizia del provino e di immissione forzata di acqua al suo interno hanno consentito di ottenere dei risultati diversi anche fino al 15% rispetto a quelli ottenuti in una misurazione preliminare, operata senza tali accortezze. La densità dell'acqua distillata utilizzata nella misurazione varia indicativamente di 0.02% per ogni modifica di 1°C di temperatura. La correzione operata sulla densità dell'acqua produce una modifica del valore della densità finale rilevabile sulla terza cifra decimale, ciò significa che tale correzione è trascurabile rispetto alle altre condotte.

4.1.3 Misurazioni, risultati e prime considerazioni

Il processo di misurazione attraverso la bilancia idrostatica consta di tre fasi principali:

- 1. Taratura della Bilancia
- 2. Posizionamento del provino nel piano superiore della bilancia per misurare il *peso in aria*, quindi registrare la misurazione.
- 3. Immersione del provino all'interno del contenitore previamente riempito d'acqua, il provino andrà sistemato al di sopra del piatto della bilancia, completamente immerso, si misura quindi il peso nel mezzo, infine si registra la misurazione in memoria.
- 4. La bilancia fornisce la densità del materiale di cui è composto il provino.

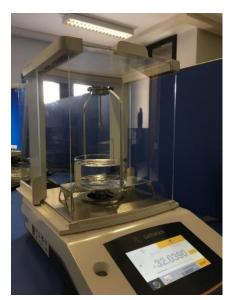


Figura 32. Bilancia idrostatica utilizzata per la misurazione

Con la finalità di ridurre la possibilità di errore, il processo è stato ripetuto più volte per ogni provino.

Terminata ogni misurazione, i provini sono stati asciugati con un getto d'aria calda dell'acqua residua della misurazione, prima di sottoporli ad una nuova pesatura.

Di seguito si riportano i valori misurati, nella fattispecie si enumereranno:

- Peso in aria (g)
- Peso nel mezzo (q)
- Densità del materiale (g)

In tab.7 si riporta anche il valore del peso nominale, questo valore è calcolato a partire dal volume ideale e la densità ideale del materiale.

Qualsiasi programma di CAD dedicato alle tecnologie additive consente di estrarre il valore del volume del solido disegnato.

Nell'ultima colonna della tabella si riporta l'errore tra i valori di peso nominale e peso reale misurato, espresso in percentuale e calcolabile secondo:

Err% =
$$\frac{(P_{real} - P_{id})}{P_{id}} \cdot 100$$
 (4.3)

dove:

Preal: peso della struttura misurato in aria

 P_{id} : peso del provino di progetto, valutato considerando la densità della lega AlSi10Mg priva di porosità e il volume della struttura CAD disegnata.

#	Tipo di struttura	Dimension e Cella (mm)	Dn/Dc	%VolumeT ot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)	Peso Nominale (g)	Peso in Aria (g)	Peso in H2O (g)	Densità (g/cm^3)	Err% (%)
1	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	5,62	10,19	5,87	2,35	81
2	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	5,66	6,90	4,32	2,02	22
3	Diamond	4	2	0,10	1,16	0,58	5,85	11,98	6,33	2,41	105
4	Diamond	3	1	0,20	0,65	0,65	9,72	10,99	6,33	2,41	13
5	Diamond	3	2	0,20	1,25	0,62	9,83	11,51	6,68	2,49	17
6	Diamond	4	1	0,25	0,98	0,98	11,65	12,16	7,47	2,59	4
7	Diamond	4	2	0,20	1,66	0,83	10,29	10,98	5,51	1,99	7
8	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	5,64	6,90	4,32	2,02	22
9	Diamond	4	2	0,25	1,87	0,94	12,11	12,80	7,63	2,47	6
10	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	5,62	11,97	5,94	2,13	113
11	Diamond	2	2	0,10	0,59	0,29	5,64	11,29	6,35	2,21	100

Tabella 7. Risultati delle pesate

Si constata che i valori di densità misurati risentono di un errore; pur avendo ripetuto la misurazione più volte, non è stato possibile rimuovere totalmente le bolle d'aria dall'interno dei provini; questo fenomeno è particolarmente significativo per i provini in cui la dimensione di cella è di 2 mm, nei quali l'aria tende a rimanere con più facilità intrappolata tra le celle del reticolo. La densità misurata per i provini caratterizzati da questa dimensione di cella è inferiore a quella nominale anche del 20%. Poiché la tecnologia DMP garantisce che la densità del materiale fuso selettivamente sia sempre superiore al 99% rispetto a quella del materiale pieno, tale misurazione è da considerarsi affetta da errore non trascurabile.

La tabella inoltre evidenzia che i valori di peso in aria misurati sono differenti da quelli attesi:

La causa di tale discrepanza si ritiene connessa a:

- Presenza di porosità nel materiale.
- Dimensioni reale degli elementi di reticolo (nodi e aste) differenti dai valori nominali.
- La polvere adiacente la traccia di scansione rimane intrappolata o si compatta in corrispondenza di hotspot.

Ordinando la tabella (tab.7) secondo il criterio del diametro di connettore crescente, è possibile osservare che: dall'interpolazione dei valori dell'errore percentuale *Err*% e il diametro nominale dell'asta *Dc*, per tutti i valori superiori a un certo Dc, esiste una correlazione che segue una legge esponenziale del tipo:

$$Err\% = C \cdot e^{-b \cdot Dc} \qquad (4.4)$$

dove i coefficienti C e b assumono i valori:

C = 205.7

a = 3.956.

#	Tipo di struttura	Dimension e Cella (mm)	Dn/Dc	%VolumeT ot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)	Peso Nominale (g)	Peso in Aria (g)	Err% (%)
11	Diamond	2	2	0,10	0,59	0,29	5,64	11,29	50
1	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	5,62	10,19	81
10	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	5,62	11,97	113
3	Diamond	4	2	0,10	1,16	0,58	5,85	11,98	105
8	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	5,64	6,90	22
2	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	5,66	6,90	22
5	Diamond	3	2	0,20	1,25	0,62	9,83	11,51	17
4	Diamond	3	1	0,20	0,65	0,65	9,72	10,99	13
7	Diamond	4	2	0,20	1,66	0,83	10,29	10,98	7
9	Diamond	4	2	0,25	1,87	0,94	12,11	12,80	6
6	Diamond	4	1	0,25	0,98	0,98	11,65	12,16	4

Tabella 8. Tab.7 ordinata secondo il criterio di diametro d'asta crescente

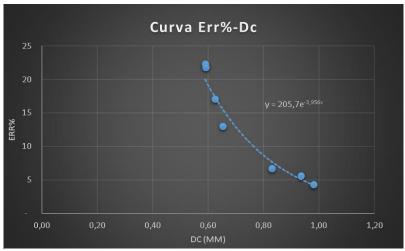


Figura 33. Curva Err% - Dc (diametro di asta)

L'equazione rappresentata in fig.33 mostra che, per aste di diametro superiore a 0.58 mm, l'errore decresce all'aumentare del diametro dell'asta, mentre per valori inferiori, non esiste una correlazione diretta tra il diametro delle aste e l'errore tra i valori di peso ideale e reale. Ciò significa che, per strutture reticolari cellulari caratterizzate da diametri di asta ridotti (inferiori a 0.58mm), la struttura reale è morfologicamente diversa da quella nominale, tanto che il peso reale della struttura si discosta da quello atteso di valori superiori al 50%.

Questa equazione, all'interno del suo dominio di definizione, permette di stimare esattamente il peso reale di una struttura reticolare già dalla fase di progettazione, noto il peso nominale e la dimensione nominale delle aste: entrambi questi valori sono derivabili direttamente dal software di progettazione CAD utilizzato.

#	Tipo di struttura	Dimensione Cella (mm)	Dn/Dc	%Volume Tot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)	Peso Nominale (g)	Err% (%)	Peso da Eq 4.4 (g)	Peso Reale (g)	Errore 4,4 (%)
14	Diamond	4	1	0,20	0,86	0,86	9,67	7	10,32	10,53	1,98

Tabella 9. Applicazione dell'eq4.4 per la stima del peso del provino 14

Applicando l'eq.4.4 al provino 14 (i provini 12,13 e 14 sono stati sottoposti alla sola pesata in aria) si ottiene il risultato sintetizzato in tab.9.

La stima del peso operata attraverso la formula empirica ha dimostrato, per il caso analizzato, la sua validità, conducendo ad un errore del 2%.

La formula in questione ha comprovato la sua validità anche nella previsione del peso di strutture cellulari reticolari inserite in componenti solidi.

La stima del peso di un manufatto integrato con strutture reticolari, a partire dalla fase di progettazione, è di basilare importanza al fine di ottenere un alleggerimento effettivo del componente.

I parametri C ed a, che compaiono nell'equazione 4.4 dipendono dalle cause che generano la discrepanza tra i valori di peso nominale e reale, tali cause, come testimoniato dall'eq.4.4, sono a loro volta connesse con il diametro dell'asta costitutiva del reticolo.

Si può ragionevolmente supporre che *C* ed *a* dipendano da:

- Tecnologie realizzativa
- Tipo di materiale
- Tipologia di reticolo adottata

Rimangono tuttavia verificati nel range di dimensioni della cella base analizzato e per i differenti valori del rapporto *Dn/Dc.*

Tali considerazioni di carattere puramente sperimentale invitano a considerare l'effetto che il diametro delle aste ha sulla fisica del processo. Nei capitoli seguenti si approfondiranno, attraverso analisi non distruttive, le cause fenomenologiche della discrepanza tra il peso reali e atteso; nella fattispecie, attraverso acquisizioni 2D al microscopio ottico e 3D, attraverso la tecnica di tomografia computerizzata, si analizzerà la geometria reale dei provini realizzati.

4.2 Osservazione dei provini con microscopio ottico

La struttura interna delle aste e dei nodi delle strutture cellulari esaminate è stata indagata per mezzo del microscopio ottico LEICA DMI3000M.

In una prima fase dell'analisi si aveva come obbiettivo la sola determinazione delle dimensioni reali di nodi e aste, perciò la preparazione delle strutture oggetto di osservazione è consistita in:

- Isolare ed estrarre un singolo piano del reticolo: la luce del microscopio colpisce in questo modo solo un piano della struttura cellulare.
- Selezionare un piano di cui analizzare le strutture reticolari.
- Realizzare un piano in corrispondenza della mezzeria del reticolo selezionato.
- Lucidare il piano realizzato (lucidatura grossolana, finalizzata esclusivamente ad aumentare i contrasti, la carta abrasiva adottata per questa operazione è di grana 1200).

Le acquisizioni sono state successivamente post prodotte per mezzo del software LeicaLAS, attraverso il quale è stato possibile correlare i valori espressi in pixel alle dimensioni reali.

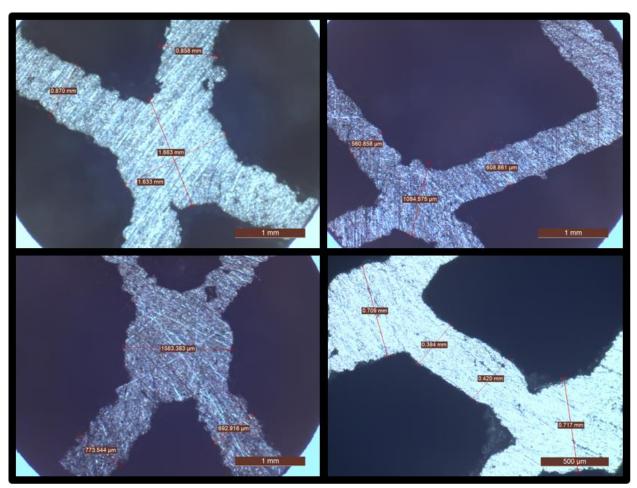


Figura 34. Acquisizioni e misurazione delle dimensioni delle strutture cellulari.

Dagli ingrandimenti si osserva (fig.34) che le aste del reticolo presentano una superficie corrugata e i diametri delle sezioni sono variabili. Tuttavia la rugosità presente rientra nell'intervallo di tolleranze dimensionali garantite dalla tecnologia DMP.

I valori misurati si riportano in tab.10. Sono state eseguite più misurazioni (almeno 3 in vari punti dell'asta) di cui successivamente è stata operata una media aritmetica.

4.2.1 Analisi	delle	dimensioni	reali	dei	provini
---------------	-------	------------	-------	-----	---------

#	Struttura	Cell Size (mm)	Dn/Dc	%VolumeT ot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)	DnReale (mm)	DcReale (mm)
1	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	0,55	0,40
2	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	0,75	0,60
3	Diamond	4	2	0,10	1,16	0,58	1,10	0,50
4	Diamond	3	1	0,20	0,65	0,65	0,68	0,63
5	Diamond	3	2	0,20	1,25	0,62	1,19	0,60
6	Diamond	4	1	0,25	0,98	0,98	1,00	0,98
7	Diamond	4	2	0,20	1,66	0,83	1,69	0,88
8	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	0,75	0,60
9	Diamond	4	2	0,25	1,87	0,94	1,87	0,95
10	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	0,55	0,40
11	Diamond	2	2	0,10	0,59	0,29	0,71	0,35
12	Diamond	3	1	0,10	0,45	0,45	0,60	0,43
13	Diamond	3	2	0,10	0,87	0,43	0,87	0,41
14	Diamond	4	1	0,20	0,86	0,86	0,85	0,80

Tabella 10. Valori di Dc e Dn reali misurati per mezzo di acquisizioni al microscopio ottico.

La rilevazione dei diametri dei connettori e dei nodi è perfettamente coerente con la misurazione dei pesi dei reticoli rivelando che, nel caso di strutture cellulari con diametri di asta inferiori a 0.5 mm (nei quali il peso reale è superiore almeno del 50% rispetto al peso nominale su tutte le strutture pesate), i diametri d'asta reali sono maggiori di quelli nominali.

Nodo Nominale	Asta Nominale	Nodo Reale	Asta Reale	Errore% su Dn	Errore% su Dc
Dn (mm)	Dc (mm)	Dn real (mm)	Dc real (mm)	(%)	(%)
0,30	0,30	0,55	0,40	83,3	33,3
0,59	0,29	0,71	0,35	21,4	19,5
0,59	0,59	0,75	0,59	26,7	-0,3
1,25	0,62	1,08	0,60	-13,1	-3,8
1,66	0,83	1,69	0,80	1,8	-3,6
1,87	0,94	1,88	0,98	0,6	4,4

Tabella 11. Discrepanza tra valori reali e nominali dei diametri di nodo e connettore.

La discrepanza tende a diminuire all'aumentare del diametro dell'asta.

Analogamente a quanto succede per i diametri delle aste, anche nei nodi si osserva una discrepanza tra il valore del diametro reale e quello nominale. In questo caso si misurano errori che superano l'80% nel caso di diametri di nodo inferiori a 0.3 mm.

La causa di una differenza così marcata tra i valori dei diametri reali e nominali, sia per i nodi che per le aste di piccole dimensioni, è da ricercarsi nella fisica del processo. Nella realizzazione delle strutture reticolari affette da errore insorge una problematica fisica connessa alle dimensioni caratteristiche della cella, che causa la fuoriuscita dalla zona di tolleranza garantita dal processo.

Si consideri a tal proposito la rappresentazione in fig.35 dove sono riportate i percorsi di scansione del laser per quattro layer differenti dello stesso provino.

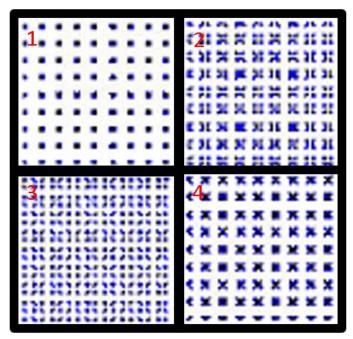


Figura 35. Bordo della traccia di scansione: scansione del nodo (1) scansione delle sole aste (3), scansione della zona di congiunzione aste-nodo (4)

Quando il laser colpisce la polvere, deposita su di essa una elevata quantità di energia, che la surriscalda fino a fonderla. Il calore della traccia di scansione viene trasmesso nelle aste del reticolo realizzato al di sotto del layer scansionato. Solo una piccola parte dell'energia depositata dal laser verrà ceduta alle polveri adiacenti al bagno di fusione, infatti la conducibilità termica della polvere, in cui son presenti numerosi spazi vuoti, è di molto inferiore a quella delle aste, che sono costituite da materiale pieno.

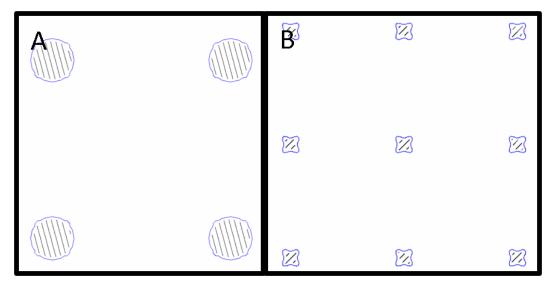


Figura 36. Ingrandimento di due tracce di scansione in corrispondenza del nodo. Struttura con diametro di nodo nominale da 1.65mm (A), struttura con diametro di nodo nominale di 0.3mm (B).

La dimensione dell'asta determina la velocità della riduzione della temperatura nella zona scansionata in corrispondenza del nodo. Un'asta di diametro maggiore è responsabile di un raffreddamento più rapido della zona scansionata, mentre nel caso di diametro d'asta ridotto (fig.36(B)), la zona scansionata si raffredderà più lentamente. Si ipotizza pertanto che il mantenimento di una temperatura elevata e prossima a quella di fusione, in corrispondenza della zona scansionata, induca a una sinterizzazione indesiderata delle polveri immediatamente adiacenti al bagno di fusione, fenomeno che sta alla base dell'aumento del peso descritto nel paragrafo 4.1.3.

Si ricercherà quindi, nei paragrafi successivi, una spiegazione fenomenologica dell'evidenza sperimentale per cui si riscontrano diametri di nodo reali molto maggiori rispetto ai diametri nominali, quando le aste sono di dimensioni contenute.

La trattazione seguirà con uno studio micrografico condotto al microscopio ottico delle strutture cellulare analizzate.

4.2.2 Micrografia dei nodi e delle aste dei reticoli

I campioni sottoposti a micrografia sono un:

- campione di reticolo numero 7: tale struttura è caratterizzata da diametro di nodo e di asta rispettivamente di 1.66 mm e 0.83 mm. In questa struttura si è osservata una similitudine dimensionale e geometrica elevata con la struttura nominale realizzata in ambiente CAD. Dalle misurazioni sul peso e sui diametri reali si riscontra un peso della struttura reale, rispetto alla stima realizzata in fase di progettazione, del 6% superiore, mentre i diametri di asta e di nodo reali e nominali sono discordi per un valore percentuale del 4%, valori che consentono di rimanere abbondantemente all'interno delle tolleranze garantite dal processo.
- Campione di reticolo numero 10: questa struttura reticolare caratterizzata da diametro di asta e nodi a progetto di 0.3mm, ha presentato, nel caso reale, un

peso superiore del 53% rispetto al valore di peso stimato da CAD; tale maggiorazione di peso è connessa ad un valore del diametro reale di nodo dell'80% superiore rispetto al valore nominale e quello di asta, del 33%.

L'obbiettivo dell'investigazione è quello di indagare il motivo fisico connesso alla discrepanza tra peso e dimensioni reali e nominali, perciò è stato selezionato un piano perpendicolare ai layer di processo, che contenesse sia i nodi che le aste e che fosse perpendicolare alle tracce di scansione, ciò ha permesso di evidenziare i bordi di queste ultime.

Il campione è stato preparato all'analisi attraverso le sequenti operazioni:

• Inglobazione dei campioni in resina polimerica bicomponente di Dibenzonyl Peroxide Methyl Methacrylate e relativo indurente: il risultato dell'inglobazione è mostrato in figura 37. La resina ha il compito di sostenere il campione, garantire che rimanga immobile in fase di analisi, permetterne la lucidatura e migliorare il contrasto del fondo con il campione. La resina, diffrangendo la luce che la investe, produce una retroilluminazione omogenea.

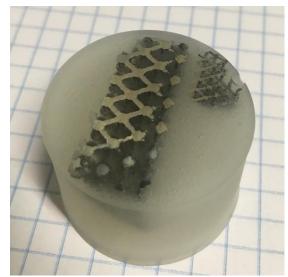


Figura 37. Reticoli inglobati in matrice polimerica epossidica.

- Lucidatura del provino: il provino, è stato lucidato mediante l'utilizzo di carte abrasive con grana crescente da 400, 600, 800, 1000, 1200 e 2400; successivamente si è ricorso all' abrasione mediante poolish con particelle di 6,3 e 1µm.
- Attacco acido: la microstruttura, i bordi di grano, i bordi della traccia di scansione e i colli di sinterizzazione sono stati messi in risalto applicando per circa 30 secondi un acido Keller.

In tutte le micrografie è stato possibile distinguere:

Il bordo della traccia di scansione: il bordo della traccia di scansione ha dimensione definita dallo spot del laser, dall'Hatch Distance, dalla temperatura e dalla viscosità del bagno di fusione; tanto più il metallo fuso sarà fluido,

maggiormente la traccia avrà un profilo schiacciato. La forma della traccia è connessa perciò alla dinamica di raffreddamento; per tempi di raffreddamento superiore, il bagno metallico permane più a lungo in fase liquida ed ha più tempo per raggiungere una geometria stabile, definita dell'equilibrio tra la forza gravitazionale le tensioni superficiali. Le tracce di scansione hanno dimensioni comprese tra 120 e 190µm (fig.39).

- Le polveri, di dimensioni comprese tra 20-50 μm.
- La porosità sferica di dimensione inferiore a 10 µm.
- I colli di sinterizzazione.

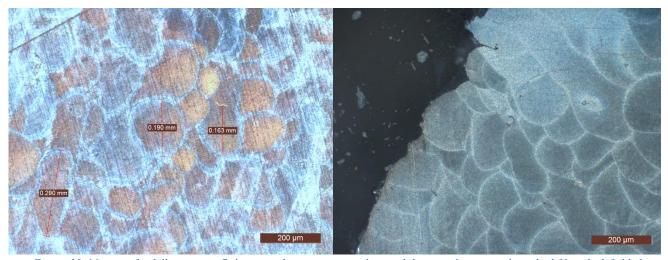


Figura 39. Micrografia della struttura 7: le tracce di scansioni sono ben visibili, specialmente applicando il filtro dark field che mette in risalto le zone scure (a destra)

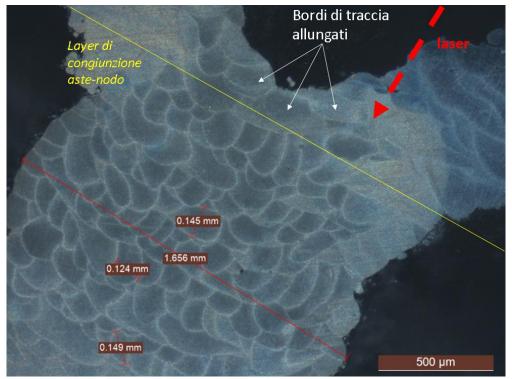


Figura 38. Micrografia di reticolo 7. Le tracce di scansione hanno dimensione differente in funzione della loro posizione all'interno del nodo. Le tracce di scansione in corrispondenza del layer di congiunzione aste-nodo hanno forma allungata

In fig.39 è possibile osservare un nodo del reticolo identificato con il numero 7. Le tracce di scansione sono ben definite e hanno una forma variabile in funzione della posizione che occupano all'interno del nodo.

Il profilo delle tracce di scansione situate nella parte centrale del nodo è circolare e tende ad assottigliarsi e allungarsi in corrispondenza del layer di congiunzione tra il nodo e le aste. Questa evidenza sperimentale può essere spiegata considerando che il percorso del laser in corrispondenza del layer di congiunzione nodo-asta (fig.40(4,5)), ha lunghezza molto superiore al percorso di scansione in corrispondenza del layer di mezzeria del nodo (fig.40 (6)). Nel layer di congiunzione, il laser percorrerà i contorni del nodo e delle aste che vi si connettono, e proseguirà riempiendo le zone interne. Poiché il materiale imputato alla trasmissione del calore depositato dal laser verso i supporti, è quello contenuto nelle aste che sorreggono il nodo stesso, quando il laser deposita una dose di energia maggiore nel layer di congiunzione nodo-asta, il bagno di fusione rimane allo stato liquido per un tempo più lungo, creando le condizioni per l'assottigliamento della traccia che si deforma sotto il proprio peso.

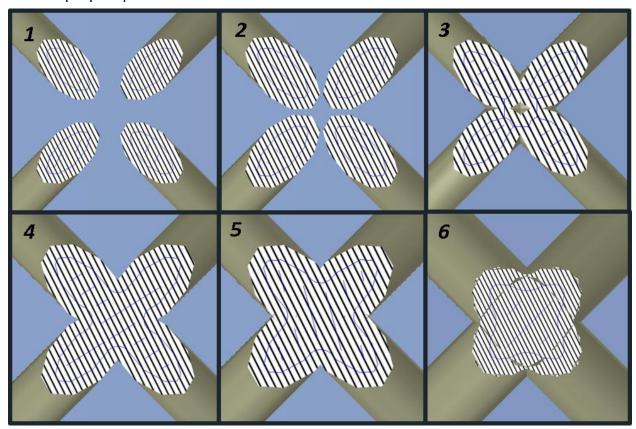


Figura 40.Tracce di scansione (in blu) ai vari livelli di una struttura cellulare reticolare: scansione delle aste (1), scansione delle aste e del bordo del nodo separatamente (3), scansione del layer di congiunzione delle aste e del nodo (4,5), scansione del solo nodo (6).

Le considerazioni di cui sopra possono essere estese al campione di reticolo identificato con il numero 10, la cui micrografia è riportata in fig.41.In questo caso, l'effetto di appiattimento della traccia di scansione risulta acuito. Il reticolo 10 è formato da aste di diametri ridotti (0.3 mm) e l'energia depositata nel nodo viene trasmessa più lentamente ai supporti.

Figura 41.Deformazione delle tracce di scansione e strizione in corrispondenza del layer di congiunzione asta-nodo.

La traccia di scansione permarrà ad una temperatura elevata per un intervallo temporale superiore rispetto al caso precedentemente analizzato; ciò si riflette sulla forma delle tracce stesse, che rimanendo allo stato liquido per un tempo maggiore, si deformano in maniera più evidente sotto il proprio peso.

Si può osservare inoltre che, in corrispondenza delle zone di giunzione asta-nodo, la permanenza allo stato liquido della traccia di scansione induce una rifusione eccessiva della traccia sottostante: infatti le tracce di scansione osservate in questa zona sono tendenzialmente di dimensioni superiori a quelle situate al centro del nodo.

Poiché la traccia, collassando, ridurrà la sua altezza, lo strato di polvere disteso dal *recoater* durante la scansione del nuovo layer avrà uno spessore maggiore a quello nominale al di sopra della traccia deformata.

SUPERFICIE DELLA POLVERE ESPOSTA AL LASER

SUBSTRATO

Figura 42. Spessore dello strato di polvere depositato variabile con la difettosità del substrato: Spessore A diverso dallo spessore B (rappresentazione reale estratta da immagine CT triangolarizzata)

В

La superficie superiore della traccia di scansione, ha raggiunto una quota più bassa a causa della deformazione che l'ha interessata, tuttavia la superficie superiore del letto di polvere rimane ad una altezza costante.

Il laser scansionerà il nuovo layer con una potenza invariata (potenza nominale), non considerando che l'altezza dello strato di polvere da fondere è superiore a quello nominale; ciò si traduce in una parziale assenza di continuità tra l'asta e il nodo. In tutti i nodi esaminati del campione di reticolo 10 si è riscontrata infatti una strizione in corrispondenza della giunzione tra asta e nodo.

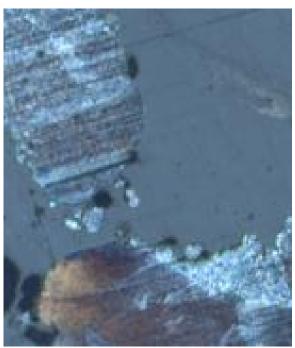


Figura 43. Caso limite: la strizione in tal caso ha ingenerato una mancata solidificazione della polvere.

La deformazione delle tracce di scansione produce un aumento della dimensione della traccia lungo il piano orizzontale: tale aumento è la causa della maggiorazione delle dimensioni del nodo nella direzione del piano della scansione.

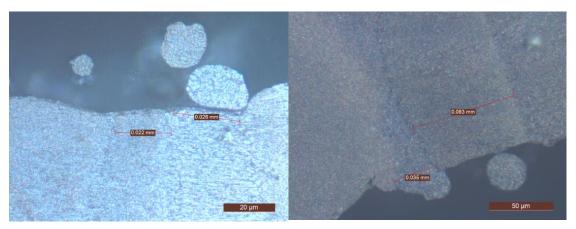


Figura 44. Ingrandimento della zona in cui è avvenuta la sinterizzazione indesiderata; provino 10. (500x a destra, 1000x a sinistra)

Tuttavia l'aumento delle dimensioni del nodo si rileva anche lungo il piano perpendicolare a quello della scansione.

In fig.44 si riportano alcuni ingrandimenti a 500x e 1000x della zona di nodo compresa tra le aste e individuata nella porzione di spazio superiore e inferiore al nodo (considerando il nodo orientato come nella lavorazione).

Il laser non ha percorso la zona in questione, infatti non è presente alcuna traccia di scansione: si ipotizza che la formazione di questa porzione di materiale compatto sia anch'essa connessa all'accumulo di calore in corrispondenza del piano di congiunzione asta-nodo. Nella zona in questione si osservano agglomerati di polveri parzialmente connessi alla parete solida; si osservano inoltre alcuni colli di sinterizzazione (distanziati dai 20 ai 50 µm, dimensione della polvere).

Il fenomeno di "sinterizzazione indesiderata" avviene, pur non modificando sensibilmente le dimensioni dell'asta e del nodo, anche nel caso della struttura reticolare numero 7 (fig.45 (sinistra))

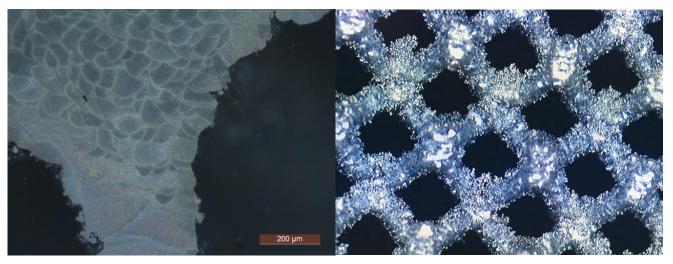


Figura 45. Zone di sinterizzazione indesiderata; maggior concentrazione di polvere sinterizzata in corrispondenza del layer di congiunzione asta-nodo (sinistra), agglomerati di polvere compatta lungo la direzione perpendicolare al piano di scansione (destra)

4.3 Effetto frazione di volume totale e del rapporto Dn/Dc sulla resistenza a compressione di strutture cellulari reticolari

Lo studio delle proprietà fisiche e morfologiche delle strutture cellulari reticolari in esame ha messo in evidenza che, pur adottando i migliori parametri di macchina, i provini risentono di modifiche topologiche in fase realizzativa

Queste differenze si ripercuotono sul peso del componente, pertanto, le proprietà meccaniche dei provini verranno considerate relazionate al peso e alle dimensioni reali.

Recenti studi [25] hanno adottato tecniche di micrografia CT al fine di valutare la differenza tra frazione di volume reale e nominale, così da correlare le proprietà meccaniche del reticolo alla %VolTot reale.

Tale approccio tuttavia non è conveniente all'atto pratico della progettazione. La caratterizzazione delle proprietà geometriche del reticolo attraverso una micrografia computerizzata è un'operazione estremamente dispendiosa in termini si tempi e costi e andrebbe ripetuta per diverse strutture reticolari al variare dei parametri di cella. Si proporrà a seguire un'analisi delle proprietà meccaniche dei reticoli al variare delle caratteristiche nominali di reticolo, a partire dalla definizione di alcuni parametri di merito che tengono in considerazione le caratteristiche geometriche e morfologiche reali delle strutture in esame.

Al fine di rendere maggiormente espressiva tale correlazione, si introducono due parametri:

La snellezza λ teorica e reale dell'asta che costituisce il reticolo. Tale parametro è un indice di snellezza dell'asta ed è funzione della sua lunghezza secondo l'espressione:

$$\lambda = \frac{D_c}{L}$$

dove:

D_c: diametro connettore

L: lunghezza dei nodi.

 Il numero di nodi per unità di volume che costituisce il reticolo N_{v.} Questo parametro è stato introdotto al fine di comprendere come, modificando la geometria della cella base, cambino le caratteristiche geometriche del reticolo stesso in funzione di quante volte la cella è ripetuta in un certo volume.

In tab.12 si riportano i valori di tali parametri per le strutture cellulari sottoposte a prove di compressione.

Dimensione Cella (mm)	Dn/Dc	%Volume Tot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)	Dn real (mm)	Dc real (mm)	λ(adim)	λreal (adim)	Nv (nodi/cm^3)
2	1	10	0,30	0,30	0,55	0,40	0,21	0,34	125
2	1	10	0,30	0,30	0,55	0,40	0,21	0,34	125
2	2	10	0,59	0,29	0,71	0,35	0,26	0,34	125
3	1	10	0,45	0,45	0,60	0,43	0,21	0,22	37
3	2	10	0,87	0,43	0,87	0,41	0,25	0,24	37
4	1	10	0,59	0,59	0,75	0,60	0,21	0,22	16
4	1	10	0,59	0,59	0,75	0,60	0,20	0,22	16
4	2	10	1,16	0,58	1,10	0,50	0,25	0,21	16
3	1	20	0,65	0,65	0,68	0,63	0,34	0,33	37
3	2	20	1,25	0,62	1,19	0,60	0,46	0,43	37
4	1	20	0,86	0,86	0,85	0,80	0,33	0,31	16
4	2	20	1,66	0,83	1,69	0,88	0,46	0,50	16
4	1	25	0,98	0,98	1,00	0,98	0,39	0,40	16
4	2	25	1,87	0,94	1,87	0,95	0,59	0,60	16

Tabella 12. Valori di snellezza nominale e reale per i reticoli studiati; numero di nodi per cm^3 di ogni struttura.

4.3.1 Studio delle proprietà elastiche di reticolo in funzione del rapporto Dn/Dc Lo studio delle relazioni tra proprietà meccaniche elastiche e parametri geometrici di reticolo ha previsto l'introduzione di due parametri di merito:

• Modulo Elastico su Peso Reale della struttura reticolare.

$$Ep = \frac{Ec}{P}$$

Dove:

Ec: modulo elastico ottenuto dal test di compressione (MPa)

P: peso reale della struttura (g)

• Modulo Elastico per Snellezza Reale delle aste costitutive della struttura cellulare reticolare.

$$E_{\lambda} = E_c \cdot \lambda_{real}$$

Dove:

 λ_{real} : snellezza reale delle aste del reticolo (mm/mm)

In tab.13 sono riassunti i risultati delle prove sperimentali in modo tale da evidenziare come le prestazioni meccaniche dei reticoli analizzati cambino in funzione della maggiorazione delle dimensioni del nodo.

La novità che si è introdotta in tale trattazione è particolarmente legata a tale aspetto: la maggiorazione del nodo, come verrà analizzato in seguito, conduce per certe condizioni geometriche di reticolo, ad un incremento delle proprietà meccaniche a parità di densità relativa, in altri termini, per certi parametri caratteristici della cella che costituisce il reticolo, aumentare il diametro del nodo permette di aumentare le proprietà meccaniche del reticolo a parità di peso nominale.

In questa trattazione la maggiorazione dei nodi che si è presa in considerazione adotta un coefficiente moltiplicativo di 2 ($D_n/D_c=1$ e 2)

Le modifiche che sono intervenute nelle strutture reticolari in fase di realizzazione, sono la causa delle differenze geometriche tra la struttura reale e nominale, e verranno considerate all'interno di parametri di merito. Ciò permetterà una trattazione maggiormente snella e finalizzata alla pratica di progettazione di tali strutture.

Lo studio in questione risulta più espressivo se si considerano come cambiano parametri di merito E_p e E_λ all'aumentare delle dimensioni del nodo: in tab.12 gli "incrementi percentuali" sono riportati sotto le colonne ΔE_p e ΔE_λ .

Dimensione Cella (mm)	%Volume Tot (%)				Dn/Dc = 2 Ελ(Mpa/g)	ΔEp(%)	ΔΕλ (%)
2	10	33	25	114	95	-24	-21
3	10	14	15	26	22	7	-20
4	10	11	11	18	24	0	25
3	20	21	47	75	210	124	64
4	20	28	47	95	255	68	63
4	25	31	58	151	441	87	66

Tabella 13. Valori dei parametri di merito e del loro incremento al variare dei parametri caratteristici di reticolo.

Introducendo alle ordinate di un grafico cartesiano i valori ΔE_p e ΔE_{λ} valutati per una percentuale di volume relativo rispetto al totale del 10%, e alle ascisse, la dimensione della cella base D, si ottiene quanto mostrato in fig.46.

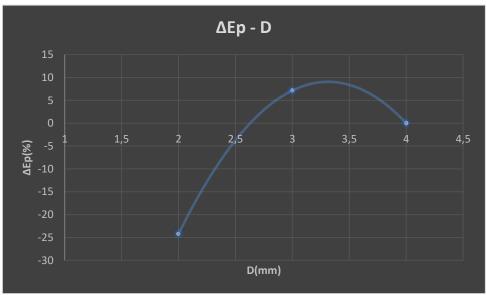


Figura 46. Andamento di ΔE_p in funzione della dimensione di cella base.

Quando le dimensioni di cella della struttura cellulare sono 2mm, il valore di ΔE_p è negativo:

un valore inferiore di zero descrive la situazione per cui, aumentando il diametro del nodo, il modulo elastico della struttura, a parità di %VolTot, diminuisce: tale modifica topologica non è pertanto conveniente al fine di ottenere migliori proprietà del reticolo in questione.

Il comportamento in questione può essere imputato prevalentemente a due motivazioni:

1. La quantità di nodi presenti all'interno della struttura cellulare reticolare come quella analizzata sono 125 /cm³, il valore maggiore tra tutte le strutture provate: quando si incrementa il diametro dei nodi, tale operazione va pensata applicata a tutti i nodi del reticolo. A parità di densità relativa (o %VolTot) di reticolo, la diminuzione del diametro nominale dell'asta sarà quindi percentualmente inferiore per le strutture caratterizzate da un più basso valore

del numero di nodi per volume unitario N_c. Nel caso in esame, la maggiorazione dei nodi comporta, a parità di %VolTot una diminuzione del 4% del diametro nominale delle aste (osservabile in tab.14, estratto delle prime 2 righe di tab11).

In base a quanto descritto nel paragrafo 4.2, le strutture cellulari reticolari caratterizzate da una dimensione di cella di 2mm hanno dimostrato una differenza non trascurabile tra i valori di diametro d'asta e di nodo nominali e reali.

Nodo	Asta			Errore% su	Errore% su
Nominale	Nominale	Nodo Reale	Asta Reale	Dn	Dc
Dn (mm)	Dc (mm)	Dn real (mm)	Dc real (mm)	(%)	(%)
0,30	0,30	0,55	0,40	83,3	33,3
0,59	0,29	0,71	0,35	21,4	19,5

Tabella 14. Estratto da tab.11.

Le dimensioni del nodo reale, quando Dn/Dc è pari a 1, sono maggiori di quelle previste in progettazione del 83.3% (Prima riga di tab.14.)

Pertanto, a causa delle problematiche connesse alla fisica del processo di realizzazione delle aste di diametro ridotto, progettando una maggiorazione del diametro del nodo del 100%, si è ottenuto nella realtà:

- un aumento effettivo del diametro del nodo, di solo 29%;
- una diminuzione del 12.5% del diametro delle aste che costituiscono la struttura, rispetto al 4% atteso e calcolato in fase di progettazione.

Il parametro λ permette di considerare contemporaneamente le variazioni di dimensioni delle aste e dei nodi reali e nominali: da tab.13 è interessante osservare che, incrementando la dimensione dei nodi (da Dn/Dc inizialmente pari a 1 e successivamente a 2), la snellezza teorica delle aste di reticolo aumenta, tuttavia snellezza reale ha andamento opposto.

Nelle strutture cellulari caratterizzate da frazione di volume relativa del 10% e con dimensione di cella di 3 e 4 millimetri, i diametri delle aste e dei nodi sono di dimensioni maggiori e pertanto, come dimostrato nel capitolo precedente, sussiste un errore inferiore tra le dimensioni nominali e quelle reali.

Il divario esistente tra i valori di snellezza reale e teorica conferma quanto appena descritto: in tutte le strutture in cui il diametro di cella è superiore a 2 mm questo divario è al massimo del 15% mentre per le strutture con dimensione di cella 2mm, si arriva abbondantemente sopra il 35%.

Interpolando i punti individuati nel grafico di fig.46, si individua una parabola con concavità vero l'alto. La tendenza deducibile da questa curva è che ∆E₀ continuerà a decrescere all'aumentare della dimensione della cella, per una dimensione della cella superiore ai 4mm: ciò si spiega considerando che, all'aumentare della dimensione della cella base, la snellezza decrescerà quando si maggiora il nodo: ciò è intrinseco alla definizione del parametro λ .

In altri termini, introdurre una maggiorazione del nodo in strutture cellulari reticolari con dimensione di cella base superiori 4 mm e frazione di volume del 10% non comporta un incremento delle proprietà meccaniche.

L'effetto di un valore ridotto del parametro λ , come si osserverà in seguito, influenza in modo ancora più importante il valore del carico di snervamento.

I valori di snellezza nominale e reale rimangono praticamente invariati per le strutture la cui frazione di volume relativa al totale è del 20% e 25%.

In questi reticoli, la dimensione delle aste è superiore e di conseguenza (Eq.4.4), l'errore tra il peso reale e nominale è inferiore.

Come si può osservare da tab.13, accrescendo la dimensione dei nodi, ΔE_p è sempre positivo, pertanto l'ottimizzazione topologica è efficace e conduce ad un aumento delle prestazioni meccaniche elastiche del reticolo sempre superiore al 65%, con un picco del 124% (nella cella con dimensioni 3mm), mantenendo pressoché invariato il peso della struttura.

Particolarmente interessante è stato osservare che il parametro di merito ΔE_{λ} , rimane costantemente nel range 59±1 % per tutte le strutture cellulari reticolari in cui %VolTot è superiore al 10%. Ciò dimostra che il modulo elastico della struttura è intrinsecamente correlato a λ (questa correlazione rimane valida solo quando non intervengono forti modifiche alla topologia del reticolo indotte nel processo additivo).

4.3.2 Studio del carico di snervamento in funzione del rapporto Dn/Dc Si introducono analogamente a quanto operato per il modulo elastico, i parametri di merito:

• Carico di snervamento su Peso Reale della struttura reticolare.

$$Pp = \frac{Pc}{P}$$

Dove:

Pc: carico di snervamento ottenuto dal test di compressione (N)

P: peso reale della struttura (g)

 Carico di snervamento su snellezza reale delle aste costitutive della struttura cellulare reticolare.

$$P_{\lambda} = P_{c} \cdot \lambda_{real}$$

Dove:

 λ_{real} : snellezza reale delle aste del reticolo (mm/mm)

La tabella riporta i valori di tali parametri e delle loro variazioni per le strutture cellulari reticolari con nodo maggiorato (Dn/Dc pari 2) a sottoposte a prova meccanica di compressione.) e no (Dn/Dc pari a 1).

Dimensione	%Volume	Dn/Dc = 1	Dn/Dc = 2	Dn/Dc = 1	Dn/Dc = 2	ΔPp(Mpa/g)	ΔΡλ (Mpa)
Cella (mm)	Tot (%)	Pp (MPa/g)	Pp(MPa/g) Pλ (Mpa) Pλ(Mpa/g)		a/g) Pλ (Mpa) Pλ(Mpa/g)		ΔΡΛ (IVIpa)
2	10	493	384	1701,5	1484,1	-22	-15
3	10	214	262	407,6	571,6	22	29
4	10	216	129	344,3	327,7	-40	-5
3	20	610	662	2128,5	3186,6	9	33
4	20	466	611	1559,9	3329,7	31	53
4	25	673	860	3256,0	6556,2	28	50

Tabella 15. Valori dei parametri di merito e del loro incremento al variare dei parametri caratteristici di reticolo.

Per le strutture la cui dimensione di cella base è di 2 mm e la frazione di volume del 10%, il ragionamento è analogo a quanto visto per il modulo elastico. Tuttavia il valore di ΔP_p , crolla per le strutture con cella base di dimensione 4mm.

Queste strutture sono caratterizzate dai valori di λ_{real} più bassi tra tutte le strutture analizzate.

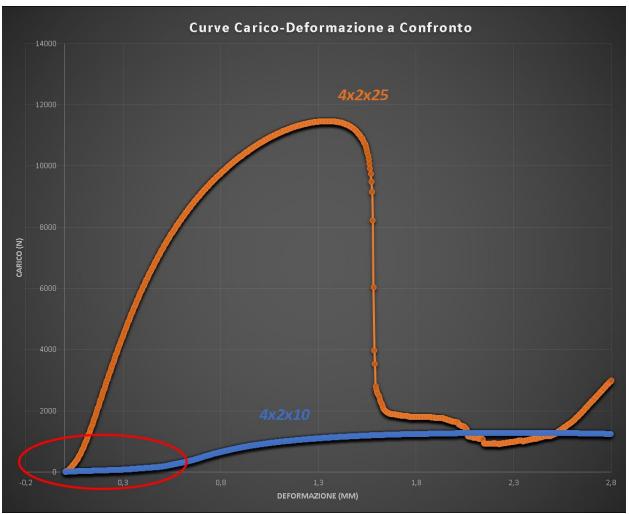


Figura 47. Curve carico-deformazione per i reticoli 8 e 9

In fig.47 sono riportate le curve sperimentali Carico-Deformazione per i provini 8 e 9. (in tab.16 le caratteristiche di tali provini e anche quelle del provino numero 3).

# Provi		Dimension e Cella (mm)	Dn/Dc	%VolumeT ot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)	Dn real (mm)	Dc real (mm)	λ(adim)	λreal (adim)
	8	4	1	10	0,59	0,59	0,75	0,60	0,21	0,22
	3	4	2	10	1,16	0,58	1,10	0,50	0,25	0,21
	9	4	2	25	1,87	0,94	1,87	0,50	0,59	0,31

Tabella 16. Caratteristiche geometriche dei provini 3,8 e 9

È possibile osservare, nella zona evidenziata in rosso, un comportamento tipico delle strutture cellulari e strettamente correlato al valore di λ_{rea} : la prima parte di curva relativa al provino 8 è caratterizzata da una zona a pendenza ridotta, in questa zona il carico è assorbito dalla struttura attraverso la flessione delle aste. Maggiore è la snellezza delle aste, più marcata è questa zona.

Le strutture con aste snelle si deformeranno maggiormente a parità di deformazione totale della struttura, in questo caso, la tensione locale al loro interno raggiungerà

valori maggiori che nel caso di struttura con aste maggiormente tozze a parità di deformazione totale del reticolo.

Lo scorrimento del piano pertanto avverrà quando le singole aste hanno già subito una deformazione plastica importante, ciò trova conferma dall'assenza di una rottura fragile della struttura per rottura del piano di scorrimento.

Con questa considerazione è possibile spiegare il valore -40 di ΔP_p (quando analogamente non si era registrato un abbassamento così importante del parametro ΔE_p): la snellezza reale delle aste nelle strutture 3 e 8 (per cui si è ricavato il valore ΔP_p in questione), decresce maggiorando la dimensione dei nodi: l'effetto di innalzamento delle tensioni locali all'interno delle aste avviene in funzione della snellezza reale (a livello progettuale la snellezza delle aste del provino 3 dovrebbe essere superiore a quella del provino 8), ciò comporta un sopraggiungimento della zona plastica più rapido che si riscontra nel valore di ΔP_p negativo.

Nel caso delle strutture con frazione di volume del 20% e 25%, il parametro di ΔE_{λ} , rimane costantemente nel campo 52±2%. Ciò dimostra che il carico che porta allo snervamento della struttura è intrinsecamente correlato a λ (questa correlazione rimane valida solo quando non intervengono forti modifiche alla topologia del reticolo indotte nel processo additivo).

4.5 Studio della zona di separazione tra struttura cellulare reticolare e parete solida

L'utilizzo di strutture cellulari reticolari nel campo dell'ingegneria, è generalmente riservato alle applicazioni nelle quali è richiesta una riduzione di peso.

Tuttavia, nella gran parte di tali applicazioni, è la parete solida e non il reticolo a svolgere in misura maggiore la funzione strutturale. In fase di progettazione è pertanto necessario considerare qual è il tipo di influenza che ha il reticolo sulle caratteristiche meccaniche e geometriche del materiale pieno a cui si integra.

Nella fattispecie, la struttura cellulare reticolare svolge una funzione di supporto (di lavorazione) delle zone di separazione tra la parete solida e il reticolo stesso, e come tale, modifica le proprietà geometriche e meccaniche della parete solida.

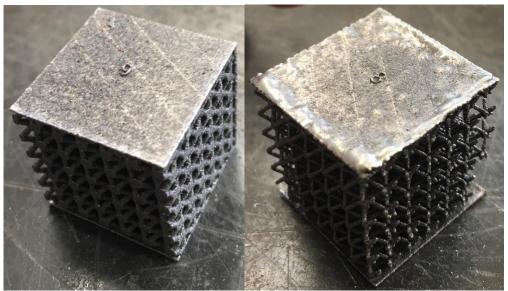


Figura 48. La parete solida presenta una difettosità differente in base alle caratteristiche del reticolo che la supporta.

I supporti svolgono la funzione di ancorare la parete solida, evitando che si muova durante la lavorazione, e, parimenti importante, trasmettono alla piattaforma il calore depositato dal laser sullo strato di polvere. Un supporto che non compie correttamente una delle due funzioni descritte, potrebbe indurre difettosità e variazioni geometriche nel materiale supportato.

Con la tecnologia DMP, adottando la lega di AlSi10Mg, la massima distanza non supportabile senza che compaia una forte difettosità nel componente realizzato è di circa 2 mm. Tale valore è ricavato sperimentalmente e consigliato dalla casa produttrice del macchinario.

L'immagine (fiq.48) evidenzia che le caratteristiche della struttura cellulare reticolare modificano le caratteristiche del materiale della parete supportata. Nella fattispecie, i provini 8 e 9, i cui reticoli hanno dimensioni di cella entrambi di 4mm, supportano in modo completamente diverso la parete solida.

Si definirà, al fine di studiare come varia tale difettosità in funzione dei parametri caratteristici delle strutture cellulari reticolari, un parametro dipendente dalla dimensione della cella e dal diametro delle aste e dei nodi: questo parametro indica

la minima distanza non supportata tra un'asta e l'altra, in corrispondenza della superficie di separazione solido-lattice.

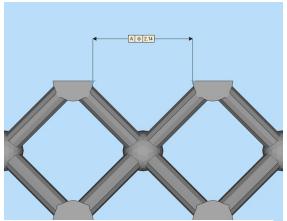


Figura 49. Valutazione del parametro NSZ da CAD

Si constata che una stima affidabile di tale parametro è fornita da:

$$NSZ = D - D_c \qquad (4.5)$$

ricordando che:

D: dimensione della cella di base

D_c: diametro dell'asta del reticolo

#	Tipo di struttura	Dimension e Cella (mm)	Dn/Dc	%VolumeT ot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)	NSZ (mm)	Comonente in tolleranza
11	Diamond	2	2	0,10	0,59	0,29	1,42	
1	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	1,70	
10	Diamond	2	1	0,10	0,30	0,30	1,70	
5	Diamond	3	2	0,20	1,25	0,62	1,75	
9	Diamond	4	2	0,25	1,87	0,94	2,13	
13	Diamond	3	2	0,10	0,87	0,43	2,131	
7	Diamond	4	2	0,20	1,66	0,83	2,34	
4	Diamond	3	1	0,20	0,65	0,65	2,35	
12	Diamond	3	1	0,10	0,45	0,45	2,55	
3	Diamond	4	2	0,10	1,16	0,58	2,84	
6	Diamond	4	1	0,25	0,98	0,98	3,02	
14	Diamond	4	1	0,20	0,86	0,86	3,136	
2	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	3,41	
8	Diamond	4	1	0,10	0,59	0,59	3,41	

Tabella 17. Misurazione delle tolleranze geometriche e dimensionali dei provini realizzati. In verde, il provino è conforme alla tolleranza di \pm 0.1mm prevista dal processo DMP, in rosso, il provino non è conforme.

Si osserva sperimentalmente che per tutti i provini (tab.11) in cui

$$NSZ \geq 2.2 \pm 0.1 \,mm$$

è presente una difettosità simile a quella osservabile in fig.48(a destra), e tale difettosità produce deformazioni della parete solida superiori a 0.1 mm (valore che determina la fuoriuscita del componente dai limiti di tolleranza previsti dal processo).

Il parametro NSZ fornisce un'indicazione della qualità del reticolo nello svolgere la funzione di supporto della parete solida che si appoggia su di esso, infatti ad un aumento di NSZ è connessa:

- Una maggior distanza tra due punti consecutivi sostenuti nella polvere
- Una diminuzione del diametro d'asta, e di conseguenza una diminuzione dell'efficienza della rimozione del calore dall'area scansionata.

L'evidenza sperimentale ha dimostrato che è possibile ottenere una parete solida sottile, all'interno delle tolleranze geometriche e dimensionali previste dal processo, solamente se il reticolo che la sorregge ha dei parametri compatibili con la sua funzionalità di sostegno meccanico e trasmissione termica necessari in fase di realizzazione.

Un'asta di diametro ridotto è causa di una riduzione della zona della parete solida priva di supporto (diminuisce NSZ), inoltre, trasmettendo una quantità di calore inferiore che nel caso in cui avesse diametro maggiore, la temperatura della parete solida scansionata rimane alta più a lungo, inducendo la deformazione da ritiro che si vede in figura.

Questo tipo di difettosità, che è facile osservare quando la parete solida è sottile (nell'ordine di grandezza del millimetro), viene mitigata nel caso di spessori superiori. Il motivo di ciò risiede nel processo tecnologico stesso.

Il recoater, distende uno strato di polvere al di sopra del layer precedentemente scansionato: richiamando fig.42, la polvere depositata presenta la superficie esposta al laser piana e ad una quota definita dall'altezza del recoater (o più precisamente, della lama di silicone del recoater); lo spessore dello strato di polvere è pertanto variabile in funzione dell'altezza del substrato. Quando la difettosità ha concavità rivolta verso il basso e supera in altezza la quota relativa al layer precedentemente scansionato, lo spessore della polvere sarà inferiore rispetto a quello nominale e viceversa. Il processo additivo tenderà intrinsecamente ad appianare tali difettosità.

Quando il laser depositerà calore su di uno spessore di polvere inferiore rispetto a quello nominale, la temperatura del bagno di fusione sarà più alta che nel caso di processo standard, ciò produrrà un bagno di fusione a più alta temperatura, un forte balling effect ed una produzione di vapore metallico; d'altro canto, se gli spessori sono maggiori di quelli nominali, l'energia depositata dal laser potrebbe non essere sufficiente a garantire la fusione dell'intero spessore dello strato di polvere, che pertanto non aderirà al substrato.

Entrambi i fenomeni descritti sono causa di introduzione di porosità intrinseca del materiale, dalla quale dipendono le proprietà meccaniche del componente e la sua affidabilità. A partire da queste considerazioni si può quindi ipotizzare che la porosità all'interno della parete solida che viene sorretta da una struttura cellulare reticolare, sia intrinsecamente connessa alle caratteristiche geometriche della struttura cellulare stessa.

Nel prossimo capitolo si studierà la relazione che intercorre tra i parametri caratteristici di reticolo e l'insorgenza di porosità internamente al materiale.

Capitolo 5

La porosità all'interno di un componente integrato con strutture cellulari reticolari

In questo capitolo, un provino contenente differenti tipologie di strutture cellulari reticolari, è stato analizzato attraverso tecniche di *microtomografia* computerizzata; la *microtomografia* è un'analisi non distruttiva dall'elevato grado di dettaglio che ha permesso di individuare la dimensione e la distribuzione spaziale della porosità nel materiale fino ad una dimensione minima di 5µm (risoluzione dell'immagineCT). Queste informazioni sono state quindi state messe in relazione con i parametri di cella delle strutture cellulari reticolari. Le informazioni contenute in questo capitolo dovranno essere considerate nella progettazione di una struttura "lattice-integrated" così da garantire che il materiale *bulk* con il quale si interfaccia il reticolo, contenga il più basso valore possibile pori.

5.1 Analisi della Porosità

La porosità interna e la rugosità superficiale sono tra i difetti più comuni nei componenti metallici ottenuti mediante tecniche additive.

La porosità è introdotta all'interno del componente realizzato:

- 1. dalla polvere: la polvere contiene porosità al suo interno in cui si trova del gas introdotto già nel processo di *spray atomization* con cui vengono prodotte. Tale tipo di porosità tende a rimanere nel componente fuso selettivamente.
- 2. Dal processo: il vapore metallico all'interno del metallo fuso può rimanere intrappolato a causa della turbolenza superficiale, la traccia di scansione, collassando su sé stessa a causa di tale turbolenza, produrrà dei vuoti; i parametri di macchina adatti consentono di limitare la turbolenza nella superficie della traccia, inoltre, quando la distanza tra le tracce adiacenti scansionate è eccessiva, la formazione di uno strato continuo di materiale risulterà ostacolata. I parametri di processo possono essere perciò settati opportunamente in modo tale da stabilizzare la traccia di scansione e ostacolare la formazione di porosità. Un altro tipo di porosità che è legata al processo è quella indotta da una parziale fusione della polvere: in tal caso il laser non fornisce energia sufficiente per fondere completamente le polveri. Le porosità formate da una fusione parziale del layer di polvere depositata, sono generalmente di forma non sferica; le dimensioni di tale tipo di porosità sono comprese in un range dimensionale che va dal decimo di millimetro fino ad al micron.
- 3. Dal meccanismo di solidificazione del bagno metallico: nella realizzazione di pareti spesse di materiale, quando la polvere viene portata a fusione, avviene una parziale rifusione del substrato; il gas intrappolato nel substrato e i vuoti tra substrato e layer di polvere potrebbero rimanere intrappolati nel bagno di fusione, non riuscendo a raggiungere la superficie prima che questa solidifichi, questo tipo di porosità è generalmente di forma sferica.

In questo capitolo si studierà la porosità di strutture cellulari reticolari attraverso la realizzazione di immagini-CT.

Questa fase di ricerca è stata svolta grazie alla collaborazione con Labormet S.r.l, che ha messo a disposizione il tomografo di sua proprietà per la realizzazione dello studio.

La porosità in strutture come quelle oggetto di studio, costituite da aste dai diametri relativamente ridotti, assume un'importanza cruciale per le proprietà meccaniche.

La quantità, la dimensione, e distribuzione spaziale della porosità in una struttura cellulare reticolare realizzata mediante tecniche additive è connessa:

- al tipo di macchina utilizzata,
- ai parametri di processo impostati;
- al materiale adottato;
- alle proprietà geometriche del reticolo;

Ad oggi non sono stati condotti studi che correlino, anche solo a livello fenomenologico, la dimensione e la distribuzione spaziale della porosità (nel solido che si interfaccia con il reticolo e nelle celle che costituiscono lo costituiscono) alle dimensioni delle aste che costituiscono il reticolo. Questa informazione è fondamentale importanza nella fase di progettazione di una struttura cellulare integrata.

La conoscenza del tipo di porosità e della sua distribuzione è necessaria a sviluppare, correggere e applicare i modelli di danneggiamento, di cui ancora difficilmente si riesce a prevedere il comportamento meccanico a fatica.

5.1 La tomografia microCT

La tomografia microCT è un test non distruttivo atto a realizzare una immagine tridimensionale ad alta risoluzione, questa è composta da una serie di immagini bidimensionali che sono fette ("slices") dell'immagine tridimensionale, rispetto ad un asse di rotazione.

Un tomografo, come descritto nello schema di funzionamento in fig.50, è composto da una sorgente di raggi X, un filtro (ed eventualmente un collimatore) che permette di focalizzare il fascio di elettroni; il provino da analizzare è fissato su di un mandrino avente 4 gradi libertà (3 spaziali e uno rotazionale) e che permette di posizionare il provino all'interno dell'area di misurazione con una precisione micrometrica.

L'acquisizione delle informazioni connesse al passaggio dei raggi X attraverso il provino avviene per mezzo di un detector; quest'ultimo è uno schermo contenente una lega di berillio, e permette di convertire il flusso di elettroni che lo colpisce, in un segnale elettrico interpretabile da un calcolatore.

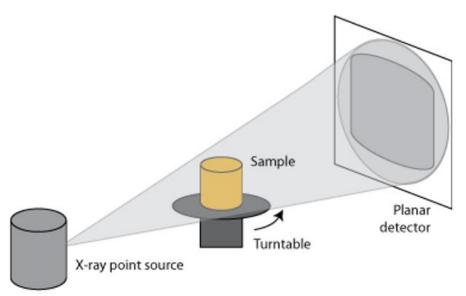


Figura 50. Principio di funzionamento della microtomografia computerizzata.

Il provino viene ruotato di angoli discreti: minore è l'angolo di rotazione e più alta sarà la risoluzione dell'immagineCT.

L'immagine tridimensionale finale si compone a partire dalle diverse immagini 2D acquisite ai diversi angoli di incidenza del fascio elettronico con il provino; infine l'immagine 3D viene ricostruita con un software dedicato.

La risoluzione ottenibile con questa tecnologia può permettere di ottenere voxel corrispondenti ad uno spazio fisico più piccolo del micron.



Figura 51. Macchinario tomografico Phoenix V utilizzato per le analisi.

Il principio fisico su cui si basa il test tomografico è l'attenuazione dei raggi X quando attraversano un dato materiale.

L'intensità dei raggi X che incidono sul materiale, diminuiscono secondo la legge:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu x} \qquad (5.1)$$

dove:

- I_0 è l'intensità del raggio incidente
- x è la distanza del materiale dalla sorgente
- I_x è l'intensità del flusso di elettroni ad una distanza x dalla sorgente,
- µ è il coefficiente di attenuazione lineare

A sua volta, l'attenuazione dipende dal tipo di materiale e dalla sorgente del fascio di elettroni: conoscendo di quanto il fascio fotonico è stato attenuato, si potrà quantificare la densità del materiale del provino, per ogni punto dello spazio 3D.

5.2.1 Il provino per l'analisi tomografica

Il provino che è stato realizzato appositamente per il test tomografico è visualizzabile in fig.51 e fig.52.

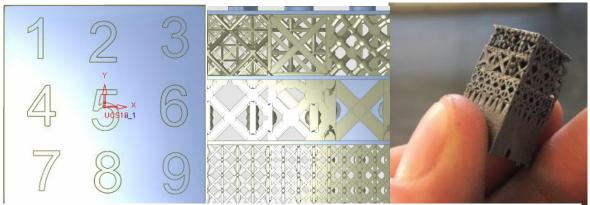


Figura 52. Provino 12x12x12mm³ progettato per l'analisi tomografica

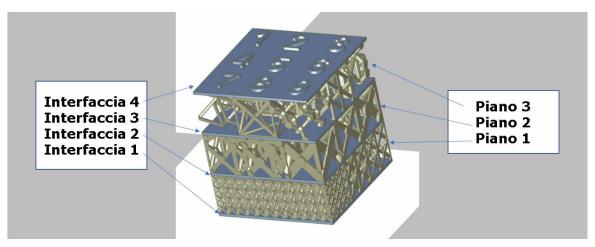


Figura 53. Strutture cellulari disposte in 3 piani, che definiscono 4 interfacce di separazione: l'interfaccia 1 separa i supporti dai reticoli del piano1, l'interfaccia 4 riporta un'indicazione numerica che definisce la posizione delle strutture cellulari nei piani sottostanti.

Le dimensioni del provino sono 12x12x12 mm, al suo risiedono 27 tipi strutture cellulari differenti, ognuno con uno specifico diametro Dc dell'asta costitutiva della cella base; nella fattispecie il provino contiene le strutture con caratteristiche sintetizzate in tab.18.

Con il provino in esame, è stato possibile condurre una caratterizzazione del materiale e della porosità ad esso associata, fino ad una dimensione di 5µm, per 27 tipologie di reticolo differenti, in soli 999 secondi.

La miniaturizzazione del provino ha permesso di ridurre notevolmente i costi della scansione.

I reticoli inseriti nei 3 piani del provino sono stati scelti con i seguenti obbiettivi di studio:

- Piano 1: Analisi della porosità connessa a reticoli con dimensioni al limite della tecnologia realizzativa.
- Piano 2: Analisi della porosità correlata a strutture cellulari reticolari di dimensioni analoghe a quelle testate meccanicamente.

• Piano 3: Prove realizzabilità al limite del %VolTot. (strutture estremamente snelle).

Pos.	Piano	Tipo di struttura	Dimensione Cella (mm)	Dn/Dc	%VolTot (%)	Dn (mm)	Dc (mm)
1	1	Diamond	2	1	15	0,39	0,39
2	1	Diamond	2	1	20	0,45	0,45
3	1	Diamond	2	2	10	0,57	0,28
4	1	Diamond	2	1	10	0,31	0,31
5	1	Diamond	3	1	10	0,46	0,46
6	1	Diamond	2	2	20	0,81	0,41
7	1	Diamond	1	1	10	0,16	0,16
8	1	Diamond	1	1	15	0,20	0,20
9	1	Diamond	1	1	20	0,23	0,23
1	2	Diamond	3	1	15	0,58	0,58
2	2	Diamond	4	1	15	0,77	0,77
3	2	Diamond	4	2	20	1,61	0,80
4	2	Diamond	3	1	20	0,68	0,68
5	2	Diamond	4	1	10	0,61	0,61
6	2	Diamond	4	2	10	1,14	0,57
7	2	Diamond	3	2	10	0,85	0,43
8	2	Diamond	3	2	20	1,20	0,60
9	2	Diamond	4	1	20	0,91	0,91
1	3	FCC	3	2	10	0,70	0,35
2	3	OctectTruss	3	2	10	0,58	0,29
3	3	Diagonals	3	2	10	0,85	0,43
4		OctectTruss	2	1	5	0,14	0,14
5	3	FCC	4	2	10	0,93	0,46
6	3	Light Diagonals	2	2	10	0,76	0,38
7		Diamond	3	1	5	0,41	0,41
8	3	FCC	4	1	5	0,32	0,32
9	3	Diamond Cristal	3	2	10	0,75	0,38

Tabella 18. Caratteristiche dei reticoli nel provino da analisi tomografica

5.2.1 Acquisizione dell'immagine CT

Il sistema di acquisizione utilizzato da Labormet S.r.l rappresenta lo "status dell'arte" in ambito di acquisizioni di immagini CT e permette di condurre l'acquisizione continua (ovvero con il provino in rotazione continua). Questa modalità di acquisizione dà la possibilità di ottenere di un'immagine 3D con un dettaglio pari al caso di acquisizione standard, in circa la metà del tempo.

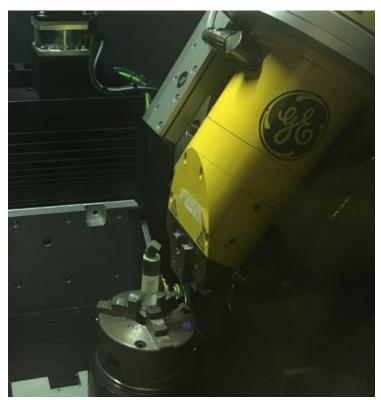


Figura 54. Acquisizione delle immagini CT 2D

Attraverso una prima scansione a bassa definizione si è potuta individuare la distanza tra sorgente e provino che avrebbe consentito l'ottenimento della risoluzione di immagine voluta (inferiore ai 10µm). L'acquisizione delle immagini 2D è avvenuta in modo in "modo continuo": il software dedicato ricostruisce l'immagine CT tridimensionale, a partire dalle immagini bidimensionali, nota la posizione del provino nello spazio 3D.

L'applicazione di questo metodo necessita di una capacità di calcolo elevata sia nella fase di ricostruzione dell'immagine 3D che nella postproduzione, infatti l'immagine realizzata a partire da "acquisizione continua" introduce un rumore in corrispondenza del centro di rotazione del provino che viene visualizzato come una nuvola di punti inscrivibile in un cilindro. Tali punti vanno rimossi attraverso una funzione che li



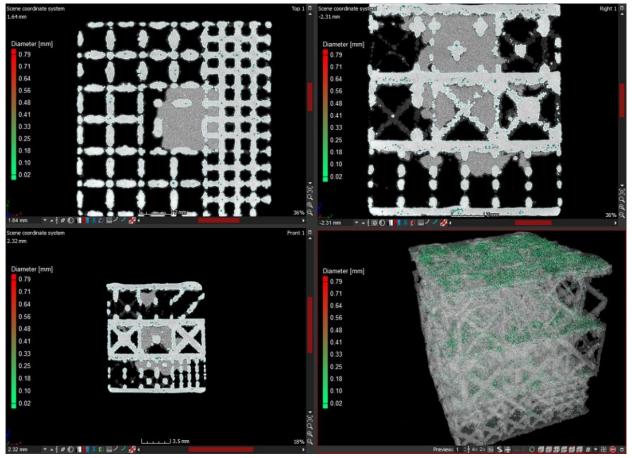


Figura 56. Visualizzazione tridimensionale della micro CT 3D (basso, destra) e sezioni secondo i piani xy, xz, yz della micro CT 3D. Le porosità del materiale sono evidenziate e colorate in funzione del loro diametro equivalente dimensione.

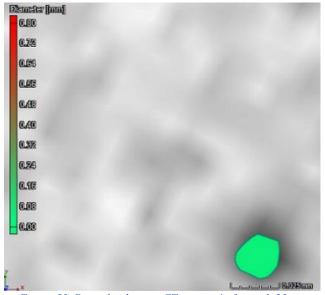


Figura 55. Dettaglio di microCT: porosità sferica di 25μm.

individua e rimuove attraverso una selezione sui livelli di intensità di colore associati ad ogni voxel.

La funzione riceve in input un valore a 8bit assegnato per ogni voxel dell'immagine e permette di selezionare la nuvola di punti dovuta al rumore dell'acquisizione rendendone possibile l'eliminazione.

Si riporta in fig.55 una vista e le 3 sezioni principali dell'immagine CT tridimensionale in cui sono evidenziate le porosità interne al materiale. Alle porosità è stata quindi assegnata una colorazione in funzione del valore del diametro equivalente che le descrive.

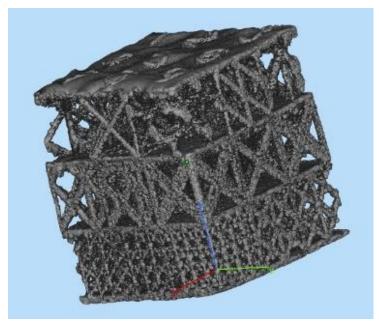


Figura 57. Visualizzazione in ambiente CAD della microtomografia CT (triangolarizzata).

5.2.2 Risultati della tomografia

La correlazione tra dimensioni e distribuzione spaziale dei pori con i parametri di reticolo caratteristici, è stata condotta attraverso le seguenti operazioni: in primis è avvenuta l'identificazione di un piano virtuale di riferimento, a partire dalle coordinate spaziali di 3 punti individuati sulla rappresentazione 3D di una superficie piana di struttura reale. Successivamente, la scansione tridimensionale è stata sezionata con piani paralleli al piano (datum) di riferimento, e distanziati tra loro 20 μ m. Le sezioni sono state esportate come immagini .tiff ad alta risoluzione. Questa operazione ha permesso un'analisi della porosità con i metodi comunemente usati nelle metallografie.

In questa trattazione si è prestata particolare attenzione alla porosità dei piani di materiale pieno che separa le strutture cellulari (interfacce tra i piani), pertanto, sono state selezionate le sole *sezioni* che rappresentano tale porzione di materiale. Il software dedicato all'analisi micrografica Leica LAS v4, ha permesso di *postprodurre* e analizzare le immagini delle sezioni delle interfacce previamente convertite in formato *scala di grigi a 8 bit*.

A seguire verranno descritti i risultati ottenuti per la sola" interfaccia 3" (con riferimento a fig.53): questa parete solida tiene traccia della porosità connessa alle strutture reticolari del piano 2 (di strutture) che lo sorreggono. Le altre interfacce non hanno permesso di ottenere risultati sperimentali significativi. Le aste di alcune strutture reticolari dei piani 1 e 3 (come mostrato in tab.18), hanno dimensione comparabile con la tolleranza della macchina e per questo non sono state realizzate

correttamente; per molti connettori infatti, non è stato possibile garantire la continuità strutturale. L'assenza di materiale in certe zone del reticolo ha ostacolato l'evacuazione del calore di scansione attraverso il reticolo (il reticolo non ha potuto svolgere la funzione di supporto). In corrispondenza delle porzioni di piano sorrette da strutture danneggiate si osserva infatti una porosità concentrata e elevata in modo anomalo. Tuttavia questa porosità si è estesa anche a porzioni di piano sostenute da un reticolo non danneggiato. Per questo motivo non è stato possibile correlare la porosità del materiale e le caratteristiche geometriche del reticolo.

Nelle sezioni dell'interfaccia 3 (in fig.58 e 59), la porosità si può distinguere dal materiale pieno poiché caratterizzate da un grigio più scuro: una funzione di selezione è stata appositamente programmata affinché potesse identificare tutte le porosità di dimensione compresa tra 10-100µm.

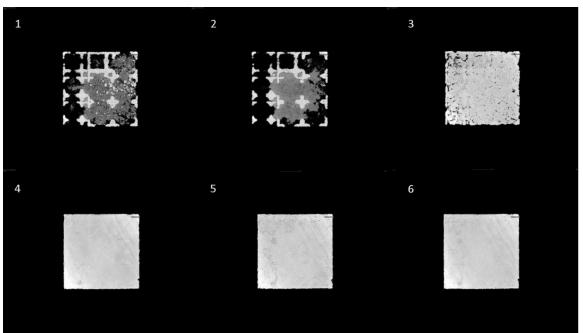


Figura 58. Varie sezioni della micrografia CT in corrispondenza della zona di transizione tra reticolo (1) fino alla parete solida completamente formata (4).

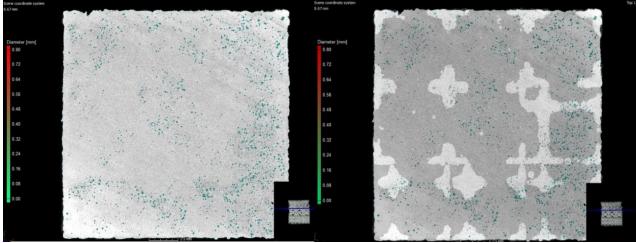


Figura 59. A sinistra, sezione di piano con porosità evidenziata, a destra un fotomontaggio della medesima sezione con, in trasparenza, le zone di contatto della superficie solida e il reticolo che la supporta.

In ogni sezione ottenuta dall'interfaccia 3 sono state individuate 9 aree di dimensione 3x3 mm (equivalenti a 276x276 pixel) come mostrato in fig.60.

Questa ulteriore selezione è finalizzata a epurare i risultati dell'analisi dagli effetti connessi alle zone di passaggio tra un tipo di reticolo e l'altro nel piano 2 sottostante.

Di ognuna delle 9 aree è stato infine esportato un report contenente il numero dei pori presenti e la loro dimensione.

I valori trovati per ogni sezione, sono stati quindi riordinati e normalizzati.

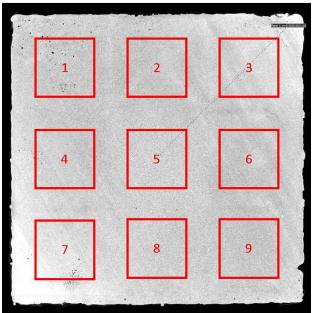


Figura 60. Selezione di zone 3mmx3mm su cui eseguire l'analisi di porosità

Considerando che il poro più grande individuato ha un diametro di circonferenza equivalente di 62 μ m e il più piccolo preso in esame, di 10 μ m, l'intervallo 10-62 μ m è stato suddiviso in 10 parti uguali.

Per ogni area selezionata è stato conteggiato il numero di pori di dimensioni confrontabili con i 10 intervalli dimensionali precedentemente definiti.

Il valore del numero di pori per ogni intervallo dimensionale è stato successivamente normalizzato rispetto al numero di pori complessivamente presenti nell'area analizzata.

$$\%pori = \frac{numero\ di\ pori\ della\ dimensione\ di\ banda\ considerata}{numero\ totale\ di\ pori} \cdot 100$$

La Tab.19. riporta i valori di *%pori* calcolati, correlandoli ai relativi intervalli dimensionali, per ognuna delle 9 aree selezionate.

Volendo correlare il tipo di porosità alle proprietà geometriche di reticolo e al processo realizzativo, è stata individuata una nuova distinzione dell'intervallo $10-62~\mu m$:

• Pori il cui diametro di circonferenza equivalente è inferiore a 20 μm : queste porosità hanno dimensioni più piccole delle dimensioni minime della polvere.

• Pori con diametro equivalente maggiore di 20 μm : sono porosità di dimensioni paragonabili alla polvere.

È stato necessario tenere in considerazione che, i volumi che contengono ogni reticolo sono di dimensioni contenute a causa dell'estrema miniaturizzazione del provino (4x4x3.90 mm), pertanto i reticoli sono costituiti da un basso numero di celle, e talvolta anche unitario; il parametro NSZ (relativo alla cella base) non è pertanto significativo (il valore di NFZ non corrisponde alla distanza non supportata tra due aste o nodi).

È stato a tal proposito definito un nuovo parametro come l'area più piccola del rettangolo inscrivibile nella zona di interfaccia non supportata. Tale parametro prende il nome di NSA (*NoSupportArea*) ed è stato misurato singolarmente per ogni struttura reticolare del piano 2 in corrispondenza della zona di separazione con l'interfaccia 3.

Stru	tture	Distribuzione dimensionale della porosità (%pori)							%р	ori			
Posizione	NSA (mm)	10-16 μm	16-21 μm	21-26µm	23-31μm	31-36µm	36-41μm	41-47 μm	47-52 μm	52-57 μm	57-62 μm	<20µm	20µm
4	4,0548	33	16	20	11	8	6	2	1	2	0	50	50
8	4,3884	39	12	21	11	8	5	3	1	1	1	51	49
1	4,664	31	16	16	11	10	3	5	2	2	1	47	50
7	5,2425	31	16	20	12	6	4	4	2	2	1	47	50
9	8,1787	34	17	26	10	3	5	3	1	0	1	51	49
3	8,7516	38	13	19	13	8	5	2	2	1	0	51	49
2	9,1506	29	17	16	13	8	6	6	3	2	1	46	54
5	10,112	38	8	19	13	6	8	5	1	0	0	47	53
6	10,971	32	11	18	11	12	8	4	2	2	1	43	57
											Media	48	51
											DevST	3	3

Tabella 19. In tabella si riportano i valori di "% pori" negli intervalli dimensionale compresi tra 10 e 62 µm.

5.2.2 Considerazioni sulle regioni di contorno tra reticolo e parete solida

Quando si analizzano i dati sperimentali ottenuti, è necessario ricordare che la porosità della parete solida (interfaccia 3) dipenderà dal reticolo che la supporta, e non dal reticolo supportato, infatti quest'ultimo viene realizzato in un momento successivo alla solidificazione della stessa.

Analizzando le sezioni di parete solida è possibile osservare che i pori di dimensioni maggiore, sono concentrati in prossimità delle aste e nelle zone più lontane da queste ultime (ovvero nelle zone in cui la difettosità ha creste e cavità di dimensioni maggiori, come osservato nel capitolo precedente).

Operando una valutazione di carattere statistico sulla base delle zone prese in esame (tab.20), è possibile constatare che il valore di "%poro", valutato per dimensioni di diametro equivalente inferiore di 20 µm, è pressoché costante in ogni porzione di sezione analizzata. Si può ragionevolmente affermare che tale porosità sia pertanto legata al processo produttivo e che l'effetto termico e meccanico dovuto alla alle caratteristiche geometriche della struttura cellulare che sorregge la sezione, sia trascurabile. Nella fattispecie, la porosità con diametro di circonferenza equivalente compreso tra 10 e 20 µm è per le sezioni analizzate, il 48±3% (media 48%, deviazione standard 3%) del totale dei pori individuati.

Il valore percentuale di pori con diametro equivalente maggiore di 20 µm, rispetto a totale dei pori individuato, ha un valore medio calcolato sui valori di tutte le aree analizzate, di 51±3 % del totale.

Inserendo in un grafico cartesiano, in ordinata, il valore di *%pori* calcolato diametri equivalenti del poro maggiori a 20 µm e in ascissa il valore di NSA, si ottiene il grafico in fig.61.

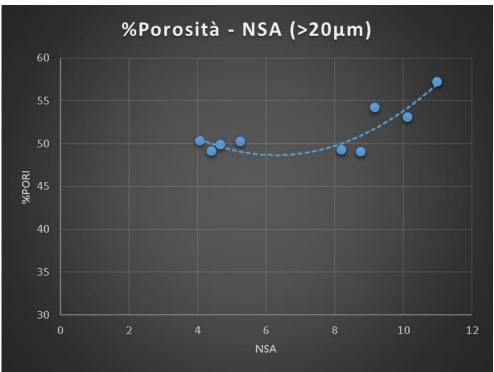


Figura 61. Andamento %pori per dimensione dei pori maggiori di 20µm - NSA

Interpolando i valori dei punti trovati, si osserva che la relazione tra NSA e il valore di %pori maggiore di 20 μ m, è approssimabile attraverso una curva polinomiale di secondo ordine con concavità verso l'alto.

Nella fattispecie è interessante osservare che il minimo di tale curva ricade in un campo di NSA compreso tra 6 e 8 mm², valore da tenere in considerazione all'atto pratico della progettazione.

Dalle considerazioni di cui sopra si può pertanto dedurre che:

la porosità indotta in una parete solida, dalla struttura cellulare reticolare che la sostiene in fase di scansione, è connessa ai parametri geometrici di cella. Nel caso in cui la struttura cellulare reticolare non svolga correttamente la funzione di supporto, evacuando troppo lentamente il calore o non supportando meccanicamente in modo adeguato la parete solida, la porosità indotta nella zona di separazione è elevata a causa di un substrato di scansione affetto da forte difettosità.

Se la parete solida, invece, viene supportata in modo adeguato dal reticolo, la porosità nella parete aumenta con il parametro NSA.

Tale valutazione è particolarmente utile in fase di progettazione poiché:

- Fornisce un'indicazione pratica atta all'ottenimento di una porosità minore possibile in corrispondenza del materiale solido prossimo alla superficie di separazione con la struttura cellulare reticolare.
- In applicazioni in cui è necessario ridurre al minimo la porosità del materiale introdotta nel processo additivo, (come ad esempio in tutte le applicazioni biomediche strutturali in cui si richiede resistenza ad un numero elevato di cicli di carico), si consiglia la progettazione di una zona di transizione tra il reticolo e la parete solida costituita da una struttura cellulare che avente una NSA ridotta: ciò si ottiene generalmente adottando una dimensione di cella inferiore ed aumentando la dimensione dei nodi. La struttura sostituita dovrà avere proprietà meccaniche paragonabili alla struttura cellulare principale per evitare di introdurre zone deboli nel reticolo.
- Quando si compenetra ad un componente pieno, una struttura cellulare reticolare, è frequente che le superfici che separano il solido e il reticolo non siano piane e si possa individuare una regione di contorno della struttura cellulare celle caratterizzata da aperte interrotte (rappresentate schematicamente in fig.2). In questo caso, conoscere NSZ, parametro caratteristico della cella ideale, non è utile a prevedere se il supporto del reticolo sia sufficiente a permettere la crescita, con la minor porosità possibile, della parete solida sostenuta. NSA è un parametro non direttamente connesso ai parametri caratteristici della cella ideale, e dà la possibilità di considerare le possibili interruzioni di cella causate dalla connessione della struttura cellulare reticolare periodica ad una superficie curva. Il calcolo in fase di progetto di tale parametro dovrà tener conto delle differenze tra le dimensioni nominali e reali dei nodi e le aste del reticolo in base a quanto visto nel Cap.4.

Il parametro NSA è ricavato da una misurazione diretta sul reticolo reale e non è quindi correlato alle dimensioni nominali della cella. Può essere considerato in fase di progettazione del reticolo solo se si tiene in considerazione tale aspetto, prevedendo per il reticolo progettato, le modifiche dei diametri di nodo e d'asta che si verificheranno nella fase di realizzazione.

Capitolo 6

Conclusioni

L'obbiettivo principale di questo lavoro di tesi è stato quello di fornire delle indicazioni pratiche per la progettazione di componenti integrati con strutture cellulari reticolari.

È stato proposto un workflow di progettazione che si articola in 3 fasi (di un processo iterativo): il *pre-processo*, in cui si sceglie il tipo di reticolo, le sue caratteristiche geometriche e la zona di materiale pieno da sostituire. La simulazione EF con elementi solidi 3D: unico metodo previsionale che ad oggi permette di prevedere le proprietà meccaniche di un componente integrato con strutture cellulari reticolari, tenendo in considerazione: l'effetto di rafforzamento strutturale svolto dai nodi, una superficie di contorno al reticolo *freeform* e la difettosità introdotta dalla lavorazione. La terza fase del metodo è l'ottimizzazione topologica, nel quale si cambiano le proprietà del reticolo localmente o nell'intera struttura al fine di avvicinarsi all'ottimo di progettazione.

Il metodo di simulazione EF con elementi solidi 3D di una struttura cellulare reticolare richiede una *mesh* estremamente fitta [18] per poter prevedere gli stati tensionali in elementi di piccole dimensioni come le aste e i nodi. Il tempo di simulazione e le risorse computazionali necessaria per i tipici componenti integrati con strutture reticolari sono elevati: per tale motivazione acquistano di importanza le fasi di *preprocesso* e *ottimizzazione topologica*.

Questo lavoro è improntato sulla ricerca di informazioni pratiche necessarie al progettista di componenti integrati con strutture cellulari reticolari nelle fasi di preprocesso e ottimizzazione topologica al fine di avvicinarsi, attraverso un processo iterativo, il più rapidamente possibile all'ottimo di progettazione.

I provini realizzati per questo lavoro di tesi sono stati sottoposti a prove di carattere distruttivo e non distruttivo. Da una prima analisi sui pesi delle strutture cellulari reticolari, è stato possibile dedurre una equazione empirica che permette di prevedere, all'interno del suo dominio di definizione (ovvero per tutti i reticoli in cui il diametro dell'asta è superiore a 0.58mm), il peso finale reale del reticolo, noto il volume e il diametro dell'asta nominali. Questi ultimi sono ricavabili da qualsiasi software di disegno CAD nella fase di disegno della struttura stessa.

L'equazione tiene in considerazione intrinsecamente di tutte le cause che intervengono nel processo additivo e che generano una modifica, rispetto alle matematiche di partenza, della geometria delle aste e dei nodi e di conseguenza del peso della struttura. Le cause che conducono all'aumento del peso sono pertanto connesse alla dimensione delle aste di reticolo. La formula è stata successivamente applicata a strutture cellulari reticolari con superficie di contorno complessa, per le quali ha confermato la sua efficacia previsionale.

In un secondo momento sono state ricercate le motivazioni della relazione matematica ricavata sperimentalmente, attraverso molteplici acquisizioni al microscopio ottico. Da un'osservazione preliminare delle dimensioni reali delle aste e dei nodi costituenti il reticolo è stato possibile confermare quanto suggerito dalla pesatura delle strutture: nella fattispecie è stato evidenziato che, in presenza di diametri d'asta vicini alla risoluzione della macchina, i nodi incrementano notevolmente le loro dimensioni rispetto a quelle di progetto (fino all'80%).

Dall'osservazione di alcune metallografie acquisite da microscopio ottico è stato possibile comprendere come le dimensioni dell'asta influenzano il processo additivo. Le aste di dimensioni ridotte non evacuano adeguatamente il calore depositato dal laser durante la scansione. Il fuso metallico, permanendo per un tempo superiore allo stato liquido, si deforma sotto il proprio peso. Questo fenomeno è ancora più marcato in corrispondenza del layer di congiunzione tra nodo e le aste, in cui il laser deposita una quantità di calore superiore (per motivazioni associate al percorso di scansione): le tracce di scansione in questa zona hanno una forma particolarmente schiacciata.

La concentrazione di calore correlata alla presenza di aste di diametro ridotto, induce forti variazioni del diametro del nodo, che aumenta le sue dimensioni per due cause principali: le tracce, appiattendosi, distribuiscono il fuso metallico in una superficie maggiore generando un aumento delle dimensioni lungo il piano della scansione. Nella direzione normale al piano di scansione, l'accumulo di calore in corrispondenza del layer di congiunzione tra aste e nodo induce una sinterizzazione indesiderata delle polveri in prossimità del nodo nelle zone ad esso superiori e inferiori. I due fenomeni descritti genereranno due modifiche delle dimensioni del nodo che si sviluppano in piani diversi ma sono dimensionalmente simili; il nodo, complessivamente sarà soggetto complessivamente ad un ingrandimento omogeneo.

Le proprietà meccaniche delle strutture reticolari sottoposte a prove di compressione sono state caratterizzate attraverso l'introduzione di parametri di merito. È stato studiato, in particolar modo, l'effetto della maggiorazione del nodo sulle proprietà meccaniche. Questo aspetto (fino ad oggi trascurato dalla comunità scientifica), è basilare nella fase di ottimizzazione topologica. È stato osservato che, per strutture cellulari reticolari, raddoppiare il diametro del nodo per certi parametri geometrici di cella, comporta un aumento del rapporto tra il modulo elastico e peso reale, a parità di densità relativa ideale, superiore del 70%, e del rapporto tra carico di snervamento e il peso, maggiore del 20%. Le prove hanno permesso inoltre di evidenziare che le proprietà meccaniche elastiche delle strutture cellulari reticolari sono intrinsecamente connesse al parametro *snellezza d'asta*.

In una parte conclusiva della ricerca, a partire dall'osservazione dell'estetica dei provini realizzati, è stato possibile comprendere l'importanza che assume il reticolo in fase realizzativa.

Il reticolo svolge una funzione di supporto, durante il processo additivo, per tutte le pareti solide che crescono ad esso superiormente. Quando il supporto fornito dal reticolo non è meccanicamente o termicamente adeguato, la parete solida sorretta è affetta da numerose difettosità. È stato osservato che, per tutte le strutture in cui il parametro NSZ (che definisce la minima distanza non supportata dal reticolo) è

superiore a 2.2 mm, le difettosità introdotte nel provino causano la fuoriuscita dall'intervallo di tolleranza dimensionale ± 0.1 mm (proprio del processo additivo adottato).

La difettosità introdotta si sviluppa come una serie di creste e valli nella superficie supportata: lo spessore della polvere che viene depositato superiormente ad una superficie affetta da difettosità, non è più omogeneo e il laser, mantenendo la sua potenza costante, non garantisce la perfetta fusione di tutte aree scansionate. Laddove non avviene una completa fusione dello spessore di polvere si prevede la presenza di una porosità di dimensione indicativamente maggiore a quella della singola particella di polvere.

Mediante un'analisi microCT su di un provino contenente 27 tipi di reticoli differenti con funzione di supporto di un piano ad essi sovrastante, è stato possibile correlare il valore del parametro sperimentale NSA (area minima rettangolare di parete solida non supportata, valutata sulla superficie di contorno reticolo-solido), con la dimensione e la quantità dei pori interni al materiale delle pareti solide supportate dal reticolo.

In particolare, dall'analisi di immagini 2D estratte dalla microtomografia tridimensionale, è stato evidenziato che il numero di pori con dimensione inferiore a 20µm rappresenta il 48% del totale dei pori individuati in tutte le aree bidimensionali oggetto di studio. Questo valore è pressoché costante per ogni sezione di parete solida analizzata, pertanto tale tipo di porosità è stata associata al processo additivo; la porosità di dimensione maggiore ai 20µm è invece variabile con NSA e di conseguenza, con il tipo di struttura cellulare reticolare che fa da supporto.

La funzione che lega NSA e la quantità di pori con dimensioni maggiori di 20µm ha andamento crescente per valori di NSA superiori a 6mm². Si può ragionevolmente ipotizzare che, indipendentemente dal tipo di cella adottato, se il reticolo evacua in modo adeguato il calore di scansione dalla parete solida che sorregge, un valore di NSA di almeno 6 mm² permette di limitare la difettosità e di conseguenza la porosità del materiale solido in corrispondenza della superficie di contorno del reticolo.

NSA è un parametro ricavato da una misurazione sul reticolo reale, e la sua stima in fase di progettazione si basa su una previsione delle dimensioni reali delle aste e dei nodi.

I risultati di tale trattazione e i valori numerici riportati sono relativi alla tecnologia di processo additivo e ai materiali adottati. Inoltre gli strumenti previsionali forniti in questa trattazione, sono relazionati con la geometria della cella, pertanto, devono essere verificati e corretti se la tipologia di cella che si vuole adottare è diversa da quella trattata. In ambito automotive e aerospaziale il reticolo di tipo diamond oggetto della trattazione, rappresenta un ottimo compromesso tra proprietà meccaniche e leggerezza, per questo motivo è attualmente uno dei tipi di reticolo maggiormente adottato.

I provini analizzati in questa trattazione sono 42, (14 tipologie). Il numero di provini studiati è superiore a quello di buona parte degli studi riguardanti strutture cellulari reticolari presenti in letteratura, tuttavia non ha consentito di operare una correzione dei risultati delle prove sperimentali basata su metodi statistici.

Si riporta infine che la comparazione tra il valore di NSA e la quantità di pori è stata condotta su un provino di dimensioni estremamente ridotte: da un lato questo ha permesso la riduzione dei costi dell'analisi tomografica, tuttavia non è stato possibile avere la sicurezza che i pori individuati in corrispondenza della parete solida sorretta da un reticolo, fossero correlati al solo reticolo sottostante e non influenzati da quello ad esso adiacente. Per questa motivazione, una parte consistente di dati ricavati dalla microCT è stata reputata non significativa.

Uno studio più accurato potrebbe essere realizzato attraverso un'analisi tomografica di provini con dimensioni maggiori. Inoltre, adottando un solo tipo di struttura cellulare a sostegno della parete solida di cui si vuole analizzare la porosità, si potrebbero escludere gli effetti connessi alla discontinuità del supporto in corrispondenza dell'area di separazione tra due tipologie di reticoli diversi.

Bibliografia

- [1] Gibson, L. J., and Ashby, M. F., 1997, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [2] Wang, H., Chen, Y., and Rosen, D. W., 2005, *A Hybrid Geometric ModelingMethod for Large Scale Conformal Cellular Structures*, ASME Paper No.DETC2005-85366.
- [3] Queheillalt, D. T., and Wadley, H. N., 2005, "Cellular Metal Lattices WithHollow Trusses," Acta Mater., 53(2), pp. 303–313.
- [4] Schaedler, T. A., Ro, C. J., Sorensen, A. E., Eckel, Z., Yang, S. S., Carter, W.B., and Jacobsen, A. J., 2014, "Designing Metallic Microlattices for EnergyAbsorber Applications," Adv. Eng. Mater., 16(3), pp. 276–283.
- [5] Lu, T. J., Valdevit, L., and Evans, A. G., 2005, "Active Cooling by MetallicSandwich Structures With Periodic Cores," Prog. Mater. Sci., 50(7), pp.789–815.
- [6] Wadley, H. N., and Queheillalt, D. T., 2007, "Thermal Applications of lar Lattice Structures," Mater. ci. Forum, 539–543, pp. 242–247.
- [7] Valdevit, L., Pantano, A., Stone, H. A., and Evans, A. G., 2006, "OptimalActive Cooling Performance of Metallic Sandwich Panels With PrismaticCores," Int. J. Heat Mass Transfer, 49(21), pp. 3819–3830.
- [8] Mota, C., Puppi, D., Chiellini, F., and Chiellini, E., 2015, "Additive Manufac-turing Techniques for the Production of Tissue Engineering Constructs". Tissue Eng. Regener. Med., 9(3), pp. 174–190.
- [9] 3D-Systems Laserform AlSi10Mg Datasheet
- [10] Song Y.A., 1997, Experimental study of the basic process mechanism for direct selective laser sintering of low-melting metallic powder, *CIRP Annals Manufacturing Technology* 46 (1), 127-130.
- [11] Politi, L.,2015, Proprietà di leghe metalliche ottenute per Additive Manufacturing, Tesi di laurea, Politecnico di Torino
- [12] Gu D, Haagedorn Y-C, Meiners W, Meng G, Joao R, Batista S. et al. Densification behaviour, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed comercially pure titanium. Ata Mater 2012; 60:3849-60.
- [13] Das S. Physical aspects of process control in selective sintering of metals.Adv Eng Mater 2003;5(10):701-11.
- [14] Louvis E, Fox P, Sutcliffe Cj. Selective laser melting of alluminium components. J Mater Process Technol 2011; 211:275-84.
- [15] Suard, M., Lhuissier, P., Dendievel, R., Blandin, J. J., Vignat, F., and Villeneuve,
- F., 2014, "Towards Stiffness Prediction of Cellular Structures Made by
- Electron Beam Melting (EBM)," Powder Metall., 57(3), pp. 190-195.
- [16] de Formanoir, C. C. C., 2016, "Improving the Mechanical Efficiency of Electron

- Beam Melted Titanium Lattice Structures by Chemical Etching," Addit. Manuf., 11, pp. 71–76.
- [17] Hernandez-Nava, E., Smith, C. J., Derguti, F., Tammas-Williams, S., Leonard, F., Withers, P. J., Todd, I., and Goodall, R., 2016, "The Effect of Defects on the Mechanical Response of Ti-6Al-4V Cubic Lattice Structures Fabricated by Electron Beam Melting," Acta Mater., 108, pp. 279–292.
- [18] Peccini, A.,2017, Analysis and optimization of micro-lattice structures obtained by additive manufacturing, Tesi di laurea, Politecnico di Milano
- [19] Bensoussan, A., Lions, J.-L., and Papanicolaou, G., 1978, Asymptotic Analysis for Periodic Structures, American Mathematical Society, Providence, RI.
- [20] Cioranescu, D., and Paulin, J. S. J., 1979, "Homogenization in Open Sets With Holes," J. Math. Anal. Appl., 71(2), pp. 590–607.
- [21] Everhart, W., Sawyer, E., Neidt, T., Dinardo, J., and Brown, B., 2016, "The Effect of Surface Finish on Tensile Behavior of Additively Manufactured Tensile Bars," J. Mater. Sci., 51(8), pp. 3836–3845.
- [22] Carroll, B. E., Palmer, T. A., and Beese, A. M., 2015, "Anisotropic Tensile Behavior of Ti-6Al-4V Components Fabricated With Directed Energy Deposition Additive Manufacturing" Acta Mater., 87, pp. 309–320.
- [23] fabricating and metal working. www.fabricating and metal working.com (consultato il 10/11/2018)
- [24] Norma ASTM E9-09
- [25] Suard, M., Lhuissier, P., Dendievel, R., Blandin, J. J., Vignat, F., and Villeneuve, F., 2014, "Towards Stiffness Prediction of Cellular Structures Made by Electron Beam Melting (EBM)," Powder Metall., 57(3), pp. 190–195.