



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Studio e simulazione del processo di fabbricazione additiva Laser Powder Bed
Fusion per la realizzazione di strutture reticolari**

**Study and simulation of the Laser Powder Bed Fusion additive manufacturing
process for the creation of lattice structures**

Relatore:

Prof. Eleonora Santecchia

Tesi di Laurea di:

Michele Santecchia

Correlatore:

Dott. Alberto Santoni

A.A. 2023 / 2024

"Non finirà mai l'università."

E invece siamo qua.

*Grazie a Diletta, che mi ha aperto gli occhi quando non riuscivo a vedere,
grazie alla mia famiglia, che ha saputo sopportarmi con pazienza e amore.*

A Carla, a Paolo, ai miei amici per essere stati la mia forza quando la mia vacillava.

INDICE

INDICE	I
INTRODUZIONE	III
ELENCO DELLE FIGURE	V
ELENCO DELLE TABELLE	VII
1. ADDITIVE MANUFACTURING	1
1.1 STORIA DELL'AM	1
1.2 PRINCIPALI APPLICAZIONI DELL'AM	2
1.3 VANTAGGI E SVANTAGGI	4
1.4 METAL ADDITIVE MANUFACTURING	5
1.4.1 Workflow	6
1.4.2 Processi MAM	7
1.4.2.1 Tecnologia Binder Jetting	8
1.4.2.2 Tecnologia Directed Energy Deposition	9
1.4.2.3 Tecnologia Powder Bed Fusion	10
1.5 PRINCIPALI PARAMETRI DI PROCESSO DEL L-PBF	14
1.6 DIFETTI NELLA STAMPA L-PBF	15
1.6.1 Porosità	15
1.6.2 Lack of fusion	16
1.6.3 Balling	17
1.6.4 Tensioni residue e crepe	17
1.7 CONTROLLO DEL PROCESSO L-PBF E TECNICHE PER L'OTTIMIZZAZIONE	18
1.8 TRATTAMENTI DI POST-LAVORAZIONE	19
1.8.1 Pressatura isostatica a caldo (HIP)	19
1.8.2 Trattamento termico	20
1.8.3 Tecniche di lucidatura	21
1.9 SUPERLEGHE DI NICHEL PROCESSATE TRAMITE L-PBF	21
2. INCONEL 718	22
2.1 PROPRIETÀ MECCANICHE DI COMPONENTI STAMPATI TRAMITE L-PBF	23
3. LE STRUTTURE RETICOLARI	26
3.1 STRUTTURE RETICOLATI BASATE SU BEAM	28
3.2 STRUTTURE RETICOLARI TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE TPMS	31
3.2.1 Caratteristiche geometriche	33
4. SIMULAZIONE DEL PROCESSO DI AM	36
4.1 SIEMENS NX	37
4.1.1 Modulo AM - Workflow	38
4.1.2 Ambiente di simulazione Pre/Post	40
4.2 ANSYS	45
4.2.1 Impostazione del sistema di analisi	46
4.2.2 Workbench Additive Wizard	47
4.3 MICROSCOPIO DIGITALE LEICA DVM6	51
5. RISULTATI E DISCUSSIONE	54

5.1 MODELLO DI SIMULAZIONE L-PBF DEL PROVINO: CONFRONTO TRA ANSYS E SIEMENS NX	54
5.2 MICROSCOPIO DIGITALE	66
5.3 CONFRONTO TRA MODELLO FEM E MODELLO REALE	68
6. CONCLUSIONI	70
7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	71

INTRODUZIONE

Nel presente lavoro di tesi, svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), sono stati realizzati dei provini reticolari in Inconel 718 tramite la tecnologia di additive manufacturing denominata “*Laser Powder Bed Fusion*” (o L-PBF). In virtù dei parametri geometrici ai fini della fabbricabilità, soltanto uno dei provini reticolari stampati è stato oggetto del presente studio. Il provino è caratterizzato da una struttura reticolare del tipo “*Triply Periodic Minimal Surface*” (TPMS) avente cella unitaria del tipo “*Shoer Gyroid*”. Lo scopo dello studio è stato quello di valutare la fabbricabilità di provini reticolari tramite l’ausilio di tecniche di prototipazione virtuale. Nel dettaglio, è stata condotta un’analisi agli elementi finiti del processo L-PBF sia tramite il software Siemens NX che Ansys Workbench 2020 R1, così da indagare quale tra i due simulatori utilizzati fosse il più affidabile in termini di distorsioni e stress stimati e quantificati sul componente durante e al termine del processo di stampa e successiva rimozione dalla piattaforma di costruzione. Attraverso osservazioni e misurazioni effettuate tramite uno stereomicroscopio, sono state indagate le caratteristiche di deformazione dei provini reticolari e confrontate con il modello simulato

La prima parte della tesi si concentra sul mondo dell’Additive Manufacturing AM. Nello specifico, è stato approfondito lo stato dell’arte relativo all’AM in ambito dei materiali metallici, rivolgendo particolare attenzione al processo di L-PBF. Sono stati riportati, quindi, i principali parametri di processo, i difetti di stampa, le ottimizzazioni possibili e i trattamenti di post-lavorazione. Successivamente è stato analizzato il materiale con cui è stato realizzato il provino, l’Inconel 718, e la sua stampabilità tramite l’utilizzo della tecnologia SLM. Infine, è stata riportata una panoramica riguardo le strutture reticolari, rivolgendo particolare attenzione alle TPMS con cella unitaria del tipo Gyroid, riportando le caratteristiche geometriche ed il processo di realizzazione tramite L-PBF.

Nella seconda parte dello studio ci si è focalizzati sulla comprensione e sull’utilizzo dei software Siemens NX e Ansys Workbench 2020 R1, tramite i quali è stato possibile realizzare le simulazioni del processo di stampa L-PBF. In particolar modo, riguardo Siemens NX, si è approfondita la conoscenza del modulo di “*Additive Manufacturing*” dedicato a queste tecnologie e all’ambiente di simulazione “*Pre/Post*”. Per Ansys è stata

riportata la procedura di impostazione del sistema di analisi ed è stato descritto l'ambiente "*Workbench Additive Wizard*". Successivamente è stata riportata una piccola descrizione del microscopio digitale Leica DVM6 utilizzato per misurare le deformazioni del piatto superiore del provino. Infine, nel capitolo riguardante i risultati, sono stati eseguiti dei confronti, tra i singoli software e tra i software e lo strumento, per ciò che concerne i risultati ottenuti in termini di deformazioni e stress residui misurati durante ogni step del processo produttivo.

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 Schema di funzionamento Stereolitografia	2
Figura 2 Classificazione delle tecnologie MAM	6
Figura 3 Schema workflow MAM	6
Figura 4 Schema di funzionamento BJ: a) base di costruzione; b) testina di stampa	8
Figura 5 Schema di infiltrazione gocce di legante	8
Figura 6 Schema di funzionamento DED: a) base di costruzione; b) sorgente di calore	9
Figura 7 Schema di funzionamento SLM	11
Figura 8 Schema di funzionamento EBM	13
Figura 9 Schema di funzionamento SLS	14
Figura 10 Parametri di processo L-PBF	14
Figura 11 Porosità nei processi SLM: a) pori di grandi dimensioni; b) micro-pori	16
Figura 12 Mancanze di fusione tra layer	16
Figura 13 Balling	17
Figura 14 Tensioni residue	18
Figura 15 Trattamento HIP: a) prima del trattamento; b) dopo il trattamento	19
Figura 16 Curve deformazione-stress campione in Inconel 718: a) realizzato tramite SLM; b) realizzato per colata d'investimento	24
Figura 17 Confronto durezza campione in Inconel 718 realizzato tramite SLM e colata d'investimento	25
Figura 18 Classificazione strutture reticolari	26
Figura 19 Strutture lattice basate su beam: a) BCC; b) BCCZ; c) FCC; d) FCCZ; e) simple cubic; f) ottaedro; g) diamante	28
Figura 20 Unità cellulari topologicamente ottimizzate	28
Figura 21 Equazione di Maxwell	29
Figura 22 I tre casi del criterio di Maxwell	29
Figura 23 Curva deformazione-stress per le strutture reticolari	30
Figura 24 Strutture TPMS presenti in natura: a) ali di farfalla; b) immagine ottica di strutture Gyroid sulla superficie dell'ala; c) vista dall'alto della struttura Gyroid dell'ala; d) sezione trasversale della struttura Gyroid dell'ala; e) microstruttura dell'oro nanoporoso; f) Sezione trasversale di un riccio di mare	32
Figura 25 Celle unitarie TPMS: a) Shoen Gyroid; b) diamante di Schwarz; c) Neovius	32
Figura 26 Equazioni delle celle unitarie TPMS	33
Figura 27 Provino Gyroid: a) realizzato tramite nTopology; b) provino stampato	36
Figura 28 Creazione del nuovo file nel modulo AM	38
Figura 29 Dimensioni piatto di stampa	39
Figura 30 Posizionamento modello CAD nel piatto di stampa	39
Figura 31 Scheda Printer Settings	40
Figura 32 Finestra Global Settings	41
Figura 33 Scheda FEM Preparation	41
Figura 34 Definizione dello slicing termico	42
Figura 35 Definizione dello slicing meccanico	43
Figura 36 Scheda Model Preparation	43

Figura 37 Finestra Meshing Properties e mesh provino	44
Figura 38 Scheda Simulation Process	44
Figura 39 Scheda Post Processing	44
Figura 40 Attivazione dell'Additive Wizard	46
Figura 41 Moduli di simulazione	46
Figura 42 Scheda Engineering Data	47
Figura 43 Scheda di selezione della geometria e impostazione delle dimensioni del piatto di stampa	48
Figura 44 Scheda di impostazione dei parametri di mesh e mesh del provino	49
Figura 45 Scheda di impostazione del materiale	49
Figura 46 Scheda di impostazione dei parametri di processo	50
Figura 47 Scheda di impostazione delle condizioni al contorno	50
Figura 48 Comando Solve per avviare la simulazione	51
Figura 49 Microscopio digitale (modello DVM6)	52
Figura 50 Deformazioni totali al termine della stampa: a) Ansys; b) NX	55
Figura 51 Deformazioni direzionali al termine della stampa: a) Ansys; b) NX	55
Figura 52 Deformazioni totali al termine del cooldown: a) Ansys; b) NX	56
Figura 53 Deformazioni direzionali al termine del cooldown: a) Ansys; b) NX	56
Figura 54 Deformazioni totali dopo la rimozione del provino: a) Ansys; b) NX	57
Figura 55 Deformazioni direzionali dopo la rimozione del provino: a) Ansys; b) NX	57
Figura 56 Differenze nel layer dell'interfaccia reticolo-piatto superiore: a) NX; b) Ansys	59
Figura 57 Deformazioni direzionali piatto superiore in Ansys: a) al termine della stampa; b) al termine del cooldown; c) rimosso il provino dal piatto di stampa	61
Figura 58 Deformazioni direzionali piatto superiore in NX: a) al termine della stampa; b) al termine del cooldown; c) rimosso il provino dal piatto di stampa	62
Figura 59 Deformazioni direzionali in Ansys lungo il piano YZ del provino una volta rimosso dal piatto di stampa	63
Figura 60 Deformazioni direzionali in NX lungo il piano YZ del provino una volta rimosso dal piatto di stampa	63
Figura 61 Andamento stress di Von Mises	64
Figura 62 Punto di stress massimo nel provino a) e b)	65
Figura 63 Tensioni all'interfaccia piatto superiore - reticolo	65
Figura 64 Vista laterale del profilo del piatto superiore realizzato tramite microscopio digitale	66
Figura 65 Vista della superficie del piatto superiore realizzato tramite microscopio digitale	66
Figura 66 Valori di deformazione: medio, deviazione standard, minimo, massimo	67
Figura 67 Grafico del profilo del piatto superiore normalizzato rispetto a 109 μm	67
Figura 68 Selezione dei punti sul profilo del piatto superiore	68

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Composizione chimica Inconel 718 in %	22
Tabella 2	Caratteristiche meccaniche e fisiche Inconel 718 [12]	23
Tabella 3	Deformazioni totali e direzionali Ansys	58
Tabella 4	Deformazioni totali e direzionali NX	58
Tabella 5	Deformazioni direzionali piatto superiore Ansys	60
Tabella 6	Deformazioni direzionali piatto superiore NX	60
Tabella 7	Valori normalizzati del piatto superiore rispetto a 0,256 mm	68
Tabella 8	Confronto tra Microscopio digitale, Ansys, NX	69
Tabella 9	Confronto tra i valori massimi di deformazione microscopio digitale, Ansys, NX	69

1. ADDITIVE MANUFACTURING

1.1 Storia dell'AM

L'additive manufacturing (AM), più comunemente nota come stampa 3D, è una tecnologia innovativa che si distingue per la capacità di realizzare componenti attraverso la sovrapposizione di più strati di materiale, a partire da un modello virtuale (CAD). Questa capacità elimina molte delle limitazioni imposte dai tradizionali processi di fabbricazione sottrattivi, come l'utilizzo di utensili e attrezzature specifiche per la lavorazione, l'impossibilità di realizzazione di geometrie complesse, e altre. Grazie al metodo di produzione l'AM garantisce un'elevata libertà di progettazione e complessità della geometria con un ridotto spreco di materiali e tempo di lavorazione. Per queste motivazioni l'AM ha rivoluzionato la produzione in diversi settori industriali, come quello aerospaziale, il medicale, l'automobilistico e l'edile.

Le origini dell'additive manufacturing risalgono agli anni '80, quando la tecnologia era nota come "*Rapid Prototyping*" (prototipazione rapida, RP). Il primo sistema di stampa 3D fu la stereolitografia SLA (schema rappresentato in Figura 1), sviluppato nel 1986 da Charles Hull, fondatore della 3D Systems [1].

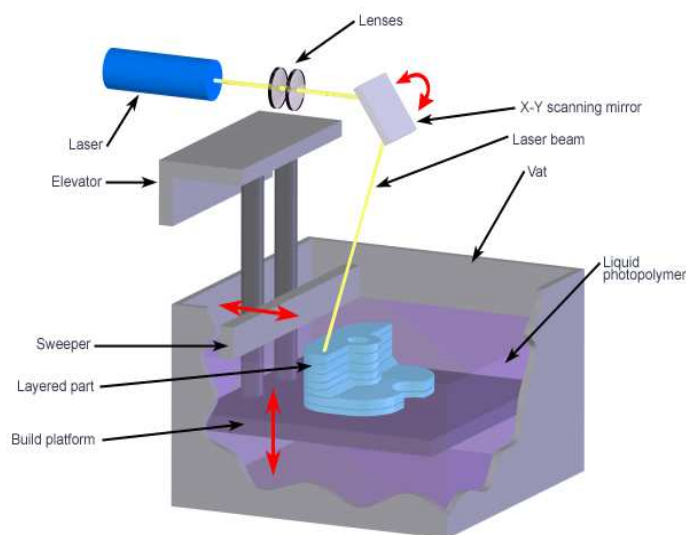


Figura 1 Schema di funzionamento Stereolitografia [2]

Il concetto iniziale era quello di produrre modelli fisici di prototipi per accelerare i processi di progettazione, riducendo quindi, i tempi di sviluppo dei prodotti. Negli anni successivi, l'evoluzione di queste tecnologie, ha ampliato le potenzialità dell'AM, passando dalla sola prototipazione alla vera e propria fabbricazione di parti funzionali con materiali ad alte prestazioni, come metalli, polimeri e ceramiche.

Questa trasformazione ha spinto l'industria a standardizzare i termini e le definizioni. Recentemente, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) e l'International Standards Organisation (ISO) hanno stabilito ufficialmente il termine "*additive manufacturing*" per formalizzare l'insieme di tecnologie che utilizzano la fabbricazione strato su strato [3].

Oggi, l'*additive manufacturing* ha raggiunto livelli di qualità tali da consentire la produzione di componenti altamente complessi, con proprietà meccaniche comparabili a quelle ottenute con metodi di produzione tradizionali. La capacità di fabbricare componenti geometricamente complessi con impieghi ridotti di risorse e tempi di produzione rende l'AM una soluzione ideale per settori altamente specializzati, come quelli visti in precedenza.

1.2 Principali applicazioni dell'AM

Grazie alla caratteristica fondamentale dell'AM, ossia il processo di produzione, la fabbricazione additiva ha trovato applicazioni diversificate nei settori aerospaziale, automobilistico, medico, giocattoli, moda e accessori, arte, architettura, ecc.

- **Applicazioni nel settore aerospaziale.** Per la fabbricazione di componenti aerospaziali, è assolutamente vitale raggiungere le proprietà materiali desiderate, inoltre i componenti aerospaziali presentano spesso geometrie complesse. I materiali utilizzati sono principalmente leghe di titanio, superleghe di nichel, acciai speciali o ceramiche ad altissima temperatura, che sono difficili da manipolare, costosi e richiedono molto tempo per essere prodotti. Pertanto, la fabbricazione additiva è particolarmente adatta per la produzione di questi

componenti. Esempi di utilizzo di queste tecnologie sono produttori come LAI International e Alcoa che, con la stampante Arcam Q20 plus producono componenti aerospaziali come palette di turbine, motori aerospaziali, turbine a gas industriali e altri, con efficienza economica e alta precisione. Un altro esempio è Optomec che è entrata in azione nel settore aerospaziale dal 2011 ed ha iniziato a stampare in 3D elettronica per applicazioni militari aerospaziali. La stampante Aerosol Jet è in grado di stampare sensori, antenne, schermature e altri componenti attivi e passivi utilizzando materiali elettronici comuni, come inchiostri conduttivi, dielettrici, resistori e semiconduttori. Questa innovazione elimina la necessità di schede a circuito stampato separate, cablaggi e fili, riducendo così peso, dimensioni e semplificando il processo di assemblaggio [4].

- **Applicazioni nel settore automobilistico.** Anche nel settore automobilistico le tecnologie di fabbricazione additiva hanno trovato applicazioni, hanno aperto le porte a nuovi design, prodotti più puliti, più leggeri, tempi di consegna più brevi e costi più bassi. Una grande sfida, per la produzione di parti automobilistiche, è il volume di costruzione limitato delle stampanti 3D attuali che limita la produzione di componenti di grandi dimensioni come la carrozzeria. Significativi studi sono in corso per superare questo problema. Un ruolo importante nell'industria automobilistica, lo svolge l'attrezzatura presente sulla linea di montaggio. In questo senso, BMW ha utilizzato la fabbricazione additiva per realizzare gli utensili utili all'assemblaggio a mano [4].
- **Applicazioni nel settore medico.** Negli ultimi 20 anni, si è registrato un grande progresso nelle tecnologie mediche grazie all'introduzione delle tecniche di stampa 3D. Dispositivi medici, impianti ortodontici e ortopedici, protesi e altri strumenti vengono ora fabbricati utilizzando tecniche di fabbricazione additiva. Ad esempio, la combinazione di imaging medico e stampa 3D consente la personalizzazione di protesi e di impianti [5].
- **Applicazioni nel settore delle costruzioni.** Nel design strutturale, l'innovazione della stampa 3D presenta molteplici potenziali applicazioni. La tecnologia consente alle aziende di creare rapidamente e a costi contenuti l'aspetto esterno degli edifici, aiutando, inoltre, a individuare potenziali problemi. Ad esempio, l'unione tra la stampa 3D e il Building Information Modeling (BIM) può portare

a risultati migliori nell'industria delle costruzioni. Il BIM è una rappresentazione computerizzata di un edificio che rappresenta le sue caratteristiche fisiche e funzionali. La stampa 3D può quindi essere utilizzata per creare l'edificio in conformità con il modello BIM, avendo un processo di costruzione più preciso ed efficiente [5].

1.3 Vantaggi e svantaggi

La rapida espansione dell'AM è dovuta ai vantaggi che offre questa nuova tecnologia. I più importanti sono i seguenti [3]:

- Riduzione dei tempi di produzione, dei costi e degli sprechi di materiale. Grazie alla possibilità di modellazione 3D del componente, il file viene direttamente trasferito in macchina e realizzato rapidamente. È stato osservato un risparmio medio dell'80% sia in termini di costo che di tempo rispetto ai metodi tradizionali. Nel settore dei metalli, è stato osservato che lo spreco di materiale grezzo viene ridotto fino al 40% utilizzando processi AM invece dei processi sottrattivi.
- Grazie a questa nuova tecnologia è possibile fabbricare parti dalla forma complessa di quasi qualsiasi geometria.
- Non sono necessari utensili, stampi o punzoni, infatti, l'AM fabbrica parti direttamente dai suoi dati CAD senza alcun utensile e senza intervento umano.

Oltre ai molteplici vantaggi che questa tecnologia possiede si devono tenere in considerazione anche alcune problematiche emerse negli anni. Di seguito vengono elencate [5]:

- Bassa produttività, infatti, le stampanti 3D industriali devono ancora raggiungere la rapidità e l'efficacia delle attrezzature tradizionali di produzione di massa.
- Un'altra difficoltà per il settore della stampa 3D è la scarsità di materiali utilizzabili rispetto ai metodi di produzione tipici.
- Le proprietà meccaniche finali dei prodotti non sono sufficientemente elevate rispetto alla produzione convenzionale.

- Limitazioni di dimensione, infatti, il processo additivo richiede ancora assistenza per la produzione di oggetti grandi e dalle forme uniche.
- Quasi tutti gli articoli prodotti dalle stampanti 3D richiedono una post-elaborazione per rimuovere la polvere in eccesso, rimuovere le strutture di supporto e migliorare le proprietà meccaniche.

1.4 Metal Additive Manufacturing

L'additive manufacturing, come visto nel capitolo precedente, è una tecnologia capace di fabbricare componenti in diverse tipologie di materiale, tra quelli più utilizzati ci sono i polimeri, le ceramiche e i metalli. Per quanto riguarda la produzione di componenti metallici, i processi AM vengono racchiusi in una sottocategoria chiamata Metal Additive Manufacturing MAM. Esistono diverse tipologie di sistemi di questa branca di AM che si dividono in base alla fonte di energia impiegata, alla materia prima utilizzata e alla modalità in cui gli strati vengono sovrapposti. In generale, i processi MAM si dividono in cinque categorie: Material Extrusion (ME), Binder Jetting (BJ), Powder Bed Fusion (PBF), Direct Energy Deposition (DED), Sheet Lamination [6]. L'immagine, Figura 2, successiva mostra le varie tipologie di processo.

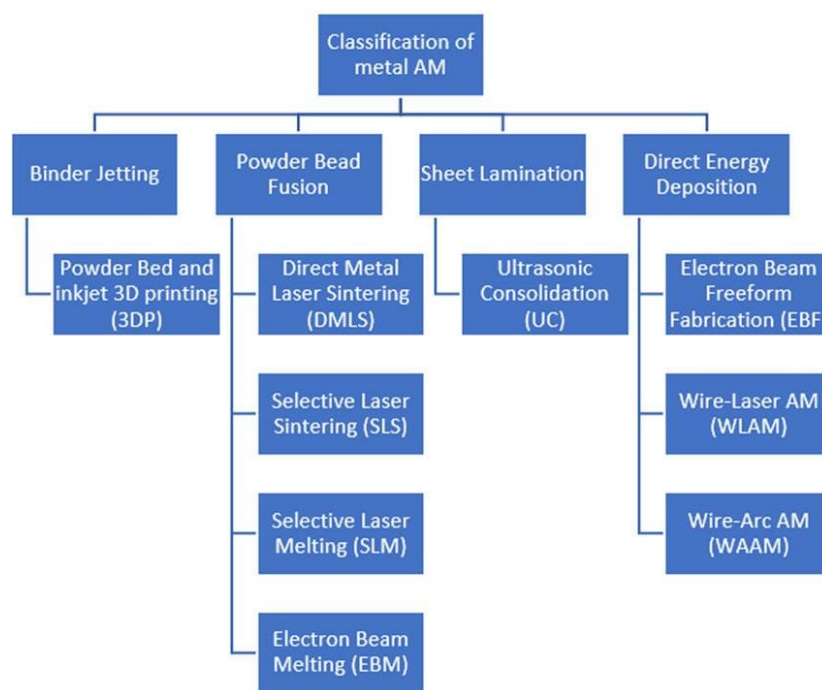


Figura 2 Classificazione delle tecnologie MAM [7]

Sono stati sviluppati una vasta gamma di materiali specifici per la MAM, come leghe di alluminio, acciaio inossidabile, superleghe a base di nichel, e altre che vengono utilizzati sotto forma di lamina, polvere o filo. Il materiale viene lavorato per fusione o per sinterizzazione, seguito da solidificazione. Le fonti di energia utilizzate sono principalmente laser, fasci di elettroni o ugelli riscaldati. In questo studio verrà approfondita la tecnica PBF, in particolare la tecnologia SLM, con l'utilizzo di polvere metallica.

1.4.1 Workflow

La fabbricazione additiva di metalli comporta diverse fasi [6]. In generale questi processi possono essere riassunti dal diagramma di flusso presente nell'immagine successiva, Figura 3.

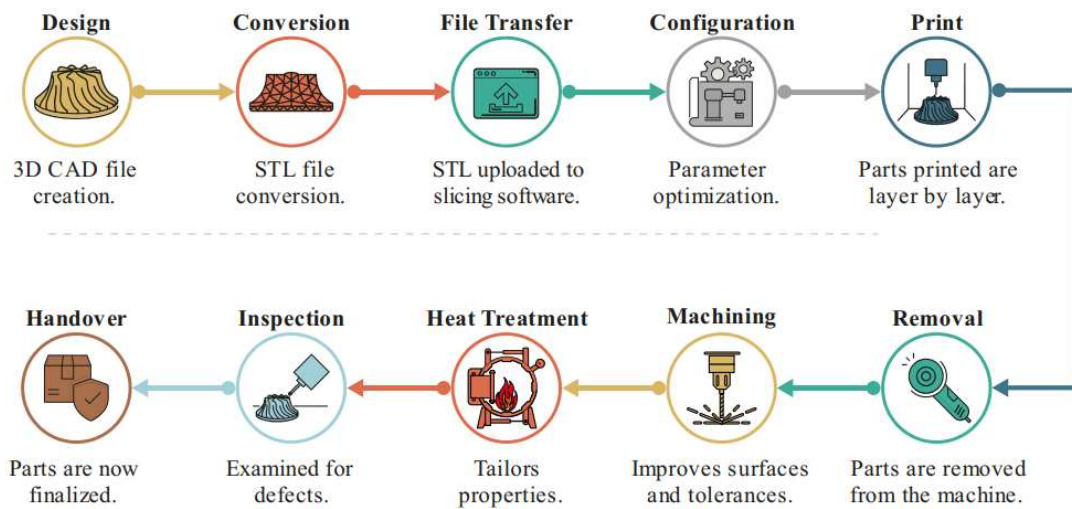


Figura 3 Schema workflow MAM [6]

Le fasi principali sono:

- **Progettazione.** L'origine di tutte le parti è una rappresentazione digitale del prodotto fisico, questa viene realizzata con un modello CAD 3D che contiene tutte le caratteristiche geometriche del componente.
- **Conversione e trasferimento del file.** Dopo che il progetto è stato completato il file deve essere tradotto in dati comprensibili dalla macchina MAM. Il file CAD

viene convertito in formato STL “*Standard Tassellation Language*” e viene trasferito alla macchina.

- **Configurazione.** Prima della stampa, la macchina deve essere configurata correttamente e devono essere impostati i parametri del processo, come l'orientamento delle parti, lo spessore dello strato e l'inclusione di supporti.
- **Stampa.** La fase di stampa può variare a seconda della tecnologia impiegata, a seconda della geometria, delle dimensioni. Questa è l'attività più dispendiosa in termini di tempo, richiede da poche ore a diversi giorni per essere completata. Tuttavia, il processo di stampa è l'attività che richiede pochissimo intervento umano.
- **Rimozione.** Una volta finita la stampa le parti possono essere rimosse dal piatto di costruzione.
- **Post-Lavorazione.** A seconda dell'applicazione, può essere prevista una lavorazione post-stampa per migliorare le tolleranze, le finiture superficiali o per rimuovere le strutture di supporto, se presenti.
- **Trattamento termico.** I complessi cicli termici ai quali sono sottoposte le parti metalliche possono causare accumuli di tensioni interne, quindi, un apposito trattamento termico può alleviare questo problema. Possono essere utilizzati diversi tipi di trattamenti termici come HIP, ricottura e invecchiamento.
- **Ispezione.** Le parti finite possono essere anche sottoposte a test esterni non distruttivi per controllare la presenza di difetti.
- **Consegna.** Dopo il controllo di qualità, le parti sono pronte per essere consegnate al cliente.

1.4.2 Processi MAM

In base a quanto visto nell'immagine precedente, Figura 2, esistono varie tipologie di processi di Metal Additive Manufacturing (MAM), in questo studio approfondiremo le tecnologie:

- Binder Jetting (BJ)
- Direct Energy Deposition (DED)
- Power Bed Fusion (PBF)

1.4.2.1 Tecnologia Binder Jetting

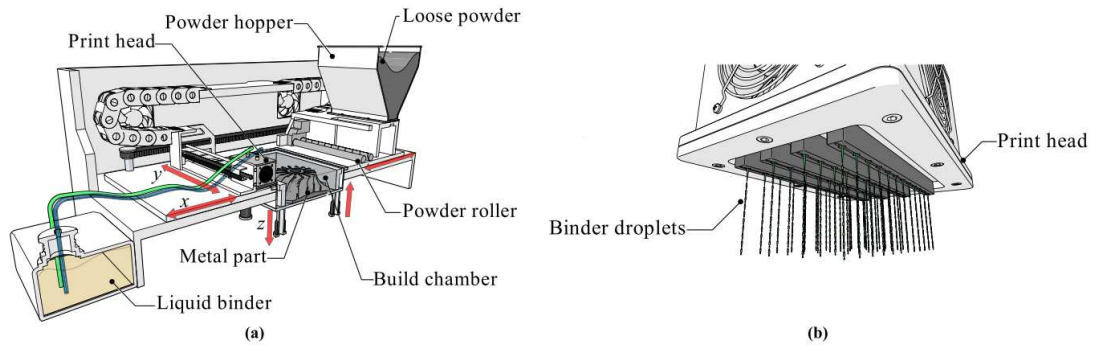


Figura 4 Schema di funzionamento BJ [6]: a) base di costruzione; b) testina di stampa

Il processo di “Binder Jetting” BJ (Figura 4 (a) e (b)) [6] avviene in maniera analoga alla stampa dell'inchiostro su carta, però piuttosto che stampare in due dimensioni (X, Y), il processo sfrutta la terza dimensione (Z) per creare una parte solida. Le particelle di polvere metallica vengono unite l'una all'altra tramite un legante liquido. La stampa avviene tipicamente a temperatura ambiente, il che aiuta ad eliminare difetti indotti termicamente dai processi MAM che dipendono dalla fonte di calore. All'inizio, uno strato sottile di polvere metallica sfusa viene depositato sulla piattaforma di costruzione tramite un ricopritore. Quindi, tramite la testina di stampa a getto illustrata in Figura 4 (b), muovendosi nelle direzioni X e Y, vengono depositate selettivamente delle goccioline di legante liquido sulla polvere (Figura 5 (a)). Le goccioline di legante si infiltrano e fluiscono nei vuoti tra le particelle di polvere metallica (Figura 5 (c)) per ottenere una distribuzione uniforme (Figura 5 (d)).

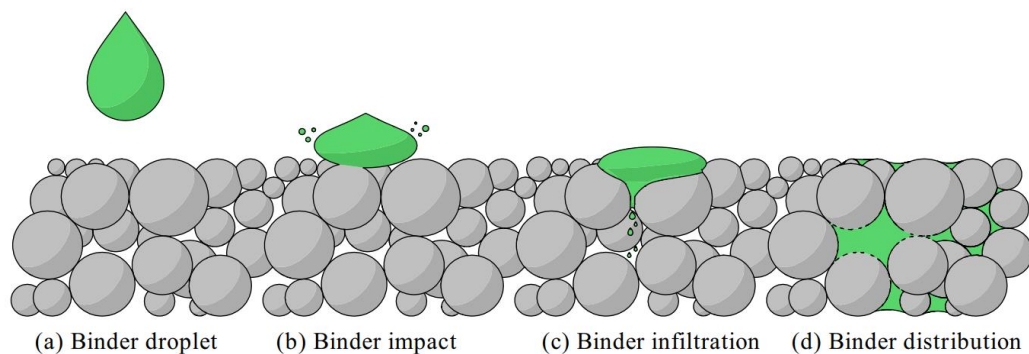


Figura 5 Schema di infiltrazione gocce di legante [6]

Terminata la stampa una lampada riscaldata o ultravioletta passa sull'ultimo strato per asciugare e indurire il legante. Finito il processo la piastra di costruzione si muove verso

il ricopritore che applica lo strato di polvere metallica e il procedimento si ripete. A causa della fragilità della parte, questa viene essiccata all'interno di un forno a temperature che variano a seconda della geometria, della polvere in eccesso e del tipo di legante. Una volta essiccata, viene eliminata la polvere metallica in eccesso, che viene poi riciclata.

Sebbene sia un processo meno dispendioso, in termini di energie, rispetto a quelli che utilizzano laser, i difetti di fabbricazione che si possono ottenere sono il restringimento della parte che causa la presenza di porosità tra i vari strati e il parametro BSL, "*Binder Saturation Level*" che indica la distribuzione del legante, può incidere negativamente sull'omogeneità, sulle proprietà meccaniche e sulla densità della parte finale.

1.4.2.2 Tecnologia Directed Energy Deposition

Il processo "*Directed Energy Deposition*" DED [6] illustrato nella Figura 6 (a), utilizza una sorgente di calore, Figura 6 (b), in grado di fondere completamente il materiale di alimentazione, che sia filo o polvere, in un bagno di fusione. Le sorgenti di energia termica tipicamente utilizzate sono: laser al plasma, fascio di elettroni, arco elettrico e fascio laser. I meccanismi di fusione delle particelle metalliche variano in funzione del materiale di alimentazione. Ad esempio, nei sistemi a polvere, questa arriva all'ugello, si fonde inizialmente per unirsi al bagno di fusione, si raffredda e solidifica. Nei sistemi a filo, questo si ammorbidisce e si lega al layer precedente solidificandosi. L'ugello e il materiale di alimentazione si muovono grazie ad un braccio robotico CNC insieme alla piastra di costruzione che a volte è collegata ad un piatto girevole.

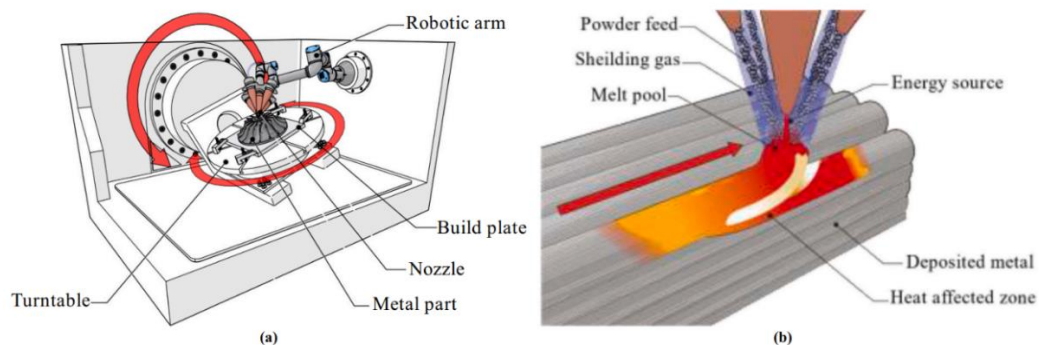


Figura 6 Schema di funzionamento DED [6]: a) base di costruzione; b) sorgente di calore

Il meccanismo di fusione imita i processi di saldatura convenzionali in cui è richiesta una concentrazione significativa di energia per sostenere il bagno di fusione e i successivi strati. La zona del bagno fuso è soggetta a gradienti termici intensi, riscaldamento e raffreddamento veloci generano stress residui elevati che possono sviluppare crepe che influenzano negativamente le prestazioni del componente. Ulteriori limitazioni del DED sono la bassa precisione geometrica delle parti stampate e rugosità superficiale elevata. Pertanto, per trovare un equilibrio tra la produttività e la qualità della parte si devono ottimizzare i parametri di processo. D'altra parte, il DED offre numerosi vantaggi rispetto ad altre tecnologie MAM. Ad esempio, possono utilizzare molti materiali commerciali di saldatura e molte tipologie di polveri. Inoltre, è in grado di creare parti completamente dense con caratteristiche microstrutturali personalizzate.

1.4.2.3 Tecnologia Powder Bed Fusion

La tecnologia PBF “*Powder Bed Fusion*” [6] è una tecnica avanzata dell’AM che per mezzo di una sorgente di calore consente la fusione o la sinterizzazione di particelle metalliche. La caratteristica distintiva dei sistemi PBF è la fonte di energia utilizzata che può essere un laser o un fascio di elettroni. Le tecnologie che utilizzano fasci di elettroni sono chiamate processi EBM “*Electron Beam Melting*” mentre i laser sono la fonte di energia più utilizzata e si dividono in funzione del meccanismo di fusione della polvere metallica. Esistono i processi di sinterizzazione laser SLS “*Selective Laser Sintering*” e fusione laser SLM “*Selective Laser Melting*”.

1.4.2.3.1 Selective Laser Melting

Questo paragrafo si concentra sul funzionamento della tecnologia “*Selective Laser Melting*” SLM, essendo quella utilizzata per la realizzazione del provino oggetto dello studio. La Figura 7 mostra l'interno di una camera di costruzione, questa, tramite l'utilizzo di gas come azoto o argon viene resa inerte. Il processo SLM inizia distribuendo uniformemente, tramite il recoater, sottili strati di polvere metallica su un letto di polvere. Dopo che il primo strato è stato depositato, la fonte di energia laser inizia a muoversi, tramite delle guide, lungo un percorso stabilito dal modello CAD 3D, e fonde o sinterizza

le particelle di polvere selettivamente. Terminato il primo strato, il letto di polvere si muove in direzione z negativa di una quantità equidistante rispetto a quella del precedente strato, e il recoater distribuisce uno altro strato di polvere. Questa sequenza viene ripetuta fino al completamento della parte, una volta terminata viene tolta dal letto e la polvere in eccesso viene rimossa manualmente e riciclata [8].

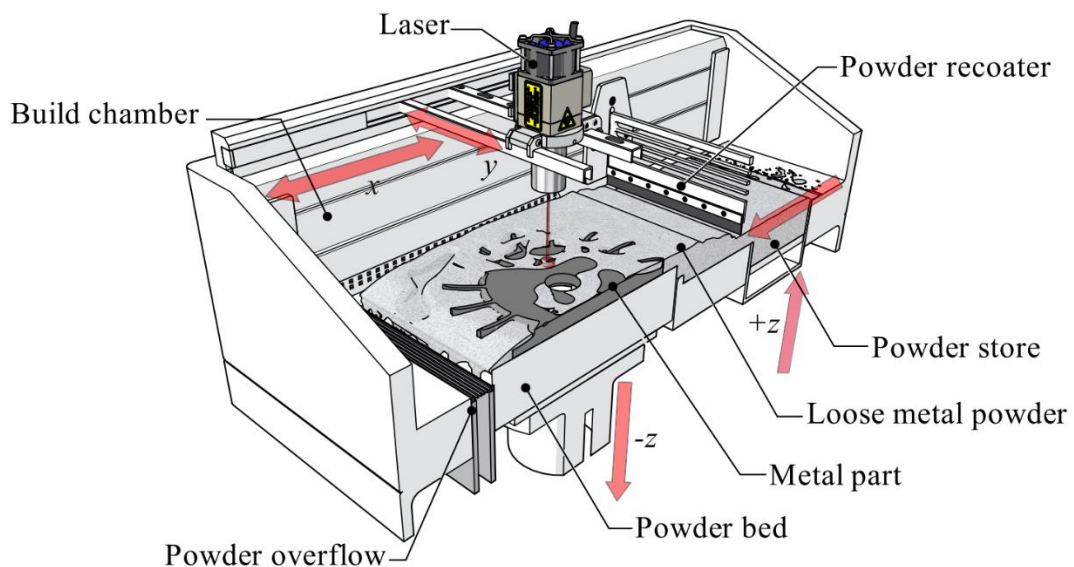


Figura 7 Schema di funzionamento SLM [6]

Nella tecnologia SLM i parametri influenzano notevolmente le caratteristiche meccaniche e fisiche finali della parte. Questi parametri possono essere responsabili di alcuni dei principali difetti di questo processo come la rugosità superficiale, la porosità e gli stress residui.

La rugosità superficiale elevata può influenzare negativamente la resistenza a fatica, l'usura, la resistenza alla corrosione e l'accuratezza geometrica [6]. Per questo motivo la rugosità superficiale è stata accreditata come uno dei fattori più dannosi. Le cause del suo aumento possono essere l'effetto gradino, polveri parzialmente fuse e regioni non fuse della parte. Tuttavia, le cause principali di questi difetti vengono attribuite alla complessa dinamica dei fluidi e al processo di solidificazione. Per ridurre questi effetti si può intervenire su parametri di processo come la potenza del laser e l'angolo di incidenza del laser rispetto alla piattaforma.

Oltre alle scarse finiture superficiali, l'alta porosità è un altro problema significativo del processo [6]. Anche questo può influenzare negativamente la resistenza alla corrosione,

la resistenza a fatica, la rigidità, la resistenza meccanica e la tenacità alla frattura. La presenza di porosità è stata attribuita a potenze del laser inadeguate che portano a pozzetti di fusione che non sono in grado di fondere completamente le particelle di polvere. Per ridurre la porosità, anche in questo caso, si è pensato all'ottimizzazione dei parametri di stampa, e in più, all'impiego di trattamenti di post-elaborazione.

Oltre a questi, anche la rapida solidificazione è considerata un problema significativo [6]. Questa è legata agli elevati gradienti termici e alle rapide velocità di raffreddamento che si hanno durante il processo. Poiché la rapida solidificazione può influenzare significativamente le proprietà meccaniche del componente, sono stati compiuti molti studi per indagare l'effetto dei suoi meccanismi. Le principali variabili identificate responsabili sono state divise in tre gruppi: parametri del laser (velocità di scansione, potenza e input di energia), geometria (spessore dello strato e temperatura della piastra di base) e strategia di scansione (tempo di permanenza tra strati). Sono stati tentati diversi metodi per limitare gli effetti della rapida solidificazione, come il post-processing (trattamenti termici), il controllo termico (preriscaldamento del letto di polvere) ed il controllo della strategia di scansione. È stato notato che l'ottimizzazione dei parametri di processo ha avuto un effetto limitato e la soluzione più efficace sia stata utilizzare tecniche di post-processing come i trattamenti termici tradizionali.

Nonostante la sua popolarità, la SLM rimane una soluzione imperfetta. I limiti menzionati ostacolano la possibilità di elaborare in modo affidabile e ripetibile parti metalliche prodotte in serie. Tuttavia, sono in corso numerosi studi per cercare di mitigare le problematiche.

1.4.2.3.2 Electron Beam Melting

Il processo “*Electron Beam Melting*” EBM, rappresentato in Figura 8, utilizza come fonte di energia per fondere le polveri metalliche un fascio di elettroni. Il processo che realizza gli strati della parte è diviso nelle seguenti fasi: diffusione di un layer di polvere metallica, preriscaldamento, fusione della polvere tramite la fonte di energia (fascio di elettroni) e abbassamento della piattaforma di costruzione dello spessore di uno strato [8]. I materiali prodotti con EBM hanno caratteristiche meccaniche migliori rispetto a quelli prodotti

tradizionalmente perché tramite questo metodo si producono materiali privi di tensioni residue e con microstrutture personalizzate.

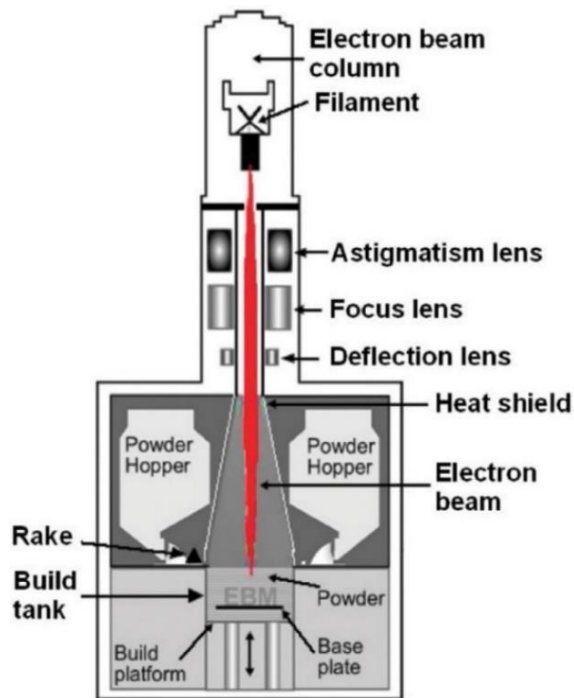


Figura 8 Schema di funzionamento EBM [8]

Alcuni vantaggi del processo EBM sono la richiesta di un tempo minore per la realizzazione di parti, rispetto al processo SLM, meno stress residui e contrazioni e libertà nel design. Gli svantaggi di questo metodo includono una minore resistenza a fatica e superfici con rugosità superficiale elevata rispetto ai campioni SLM.

1.4.2.3.2 Selective Laser Sintering

La tecnica “*Selective Laser Sintering*” SLS è un metodo che fabbrica componenti mediante la sinterizzazione delle polveri utilizzando un raggio laser [8]. Questo metodo è stato sviluppato inizialmente per la fabbricazione additiva di polimeri, solo recentemente, le industrie hanno iniziato ad utilizzarlo ampiamente per i metalli. Le fasi della tecnica sono le seguenti:

- il substrato viene spostato verso il basso in quantità pari allo spessore dello strato;
- uno strato di polvere viene steso sul substrato;

- il laser sinterizza le polveri nell'area determinata. Le fasi vengono ripetute fino a quando il campione progettato è completato. Uno schema di SLS è rappresentato nella Figura 9.

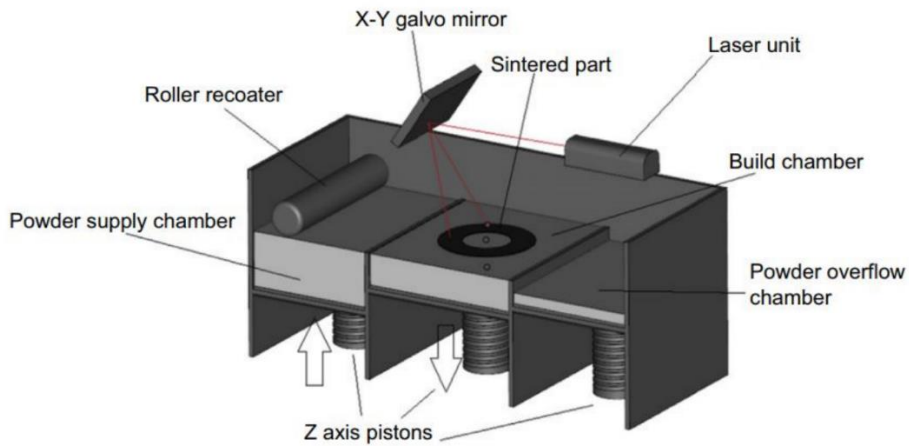


Figura 9 Schema di funzionamento SLS [8]

1.5 Principali parametri di processo del L-PBF

Come scritto nel capitolo precedente, le caratteristiche meccaniche e fisiche dei componenti fabbricati tramite processo L-PBF sono notevolmente influenzate dai parametri di processo [9]. I principali possono essere classificati secondo la seguente immagine, Figura 10.

Proprietà della polvere	Parametri di processo	
Forma delle particelle	Potenza laser	Spessore del layer
Dimensione e distribuzione granulometrica	Velocità di scansione	Strategia di scansione
Composizione chimica	Hatching distance	Orientazione di crescita
Conducibilità termica	Atmosfera protettiva	Flusso del gas
Temperatura di fusione	Raggio del fascio laser	Temperatura del letto di polvere
Assorbività / riflettività	Tipologia laser	

Figura 10 Parametri di processo L-PBF [10]

I parametri presenti nell'immagine vengono calibrati componente per componente per la sua realizzazione ottimale, tra i più importanti troviamo:

- **Potenza del laser:** può variare da 100 W fino a 1000 W;
- **Velocità di scansione:** indica il tempo in cui un punto del componente è esposto allo spot del laser;
- **Spessore del layer (Layer Thickness):** indica l'altezza di uno strato;
- **Parametri della polvere:** sono importanti per garantire determinate caratteristiche meccaniche e fisiche del componente.

La scelta dei parametri è fondamentale per ottenere parti senza difetti, come porosità, mancanze di fusione e altri.

1.6 Difetti nella stampa L-PBF

A causa dei complessi meccanismi che governano il processo L-PBF, si possono generare numerosi difetti. Questi sono strettamente legati sia ai parametri di processo come la potenza del laser e la velocità di scansione ma anche al materiale di alimentazione e alla camera di costruzione. I difetti più comuni sono: porosità, mancanze di fusione, scarsa finitura superficiale, formazione di palline, distorsioni e tensioni residue [11]. La presenza dei difetti in un materiale fabbricato con questa tecnologia ostacola gravemente le proprietà meccaniche del componente.

1.6.1 Porosità

La porosità (le Figure 11 (a) e (b)) è un difetto estremamente comune, questa può agire come sito di innesco di crepe, riducendo la tenacità e la resistenza alla fatica. L'intrappolamento di gas è una delle principali cause della formazione di porosità. Le temperature elevate della pozza di fusione fanno aumentare la solubilità del gas nel metallo, quindi, questo si "scioglie" nel materiale di alimentazione [11]. Quando il componente inizia a solidificare, essendo questo processo molto rapido, la risalita del gas viene inibita, causandone l'intrappolamento all'interno. È stato dimostrato che aumentando la potenza del laser e la velocità di scansione la densità della porosità diminuisce. Proprio per questo motivo i parametri di processo devono essere ottimizzati

correttamente per evitare la presenza di porosità. Oltre al controllo di tali parametri, per ridurre o eliminare il problema si possono utilizzare trattamenti termici post fabbricazione come la pressatura isostatica a caldo HIP.

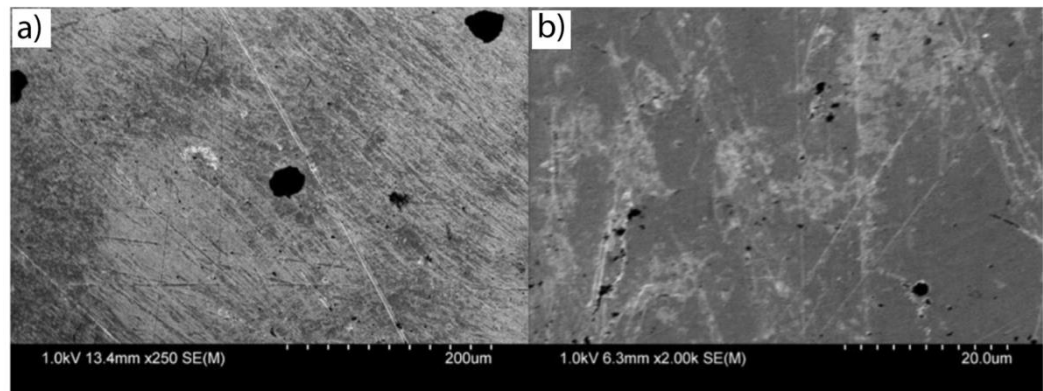


Figura 11 Porosità nei processi L-PBF [11]: a) pori di grandi dimensioni; b) micro-pori

1.6.2 Lack of fusion

Le mancanze di fusione si verificano a causa di carenze di energia durante la fusione del materiale di alimentazione. Queste carenze non permettono la completa fusione delle particelle di polvere sul layer precedentemente depositato [11]. La presenza di lack of fusion influisce negativamente sulle proprietà superficiali e meccaniche della parte. Esempi di difetti di fusione sono mostrati di seguito nella Figura 12.

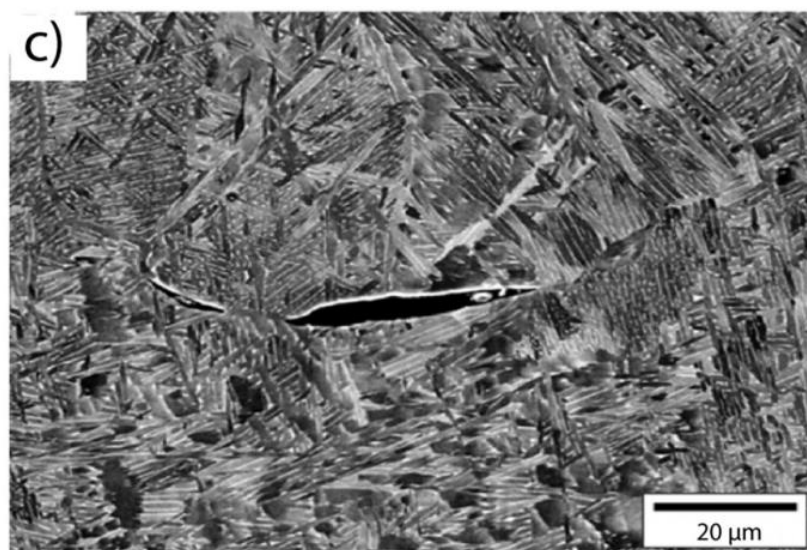


Figura 12 Mancanze di fusione tra layer [11]

1.6.3 Balling

Il "*Balling*" è causato da un'instabilità che si può verificare all'interno della pozza di fusione che porta alla creazione di piccole particelle di metallo fuso [11]. Alte potenze laser e di velocità di scansione alimentano la formazione delle palline, mentre basse velocità di scansione e di potenze del laser la inibiscono. La loro formazione non solo influisce negativamente sulla qualità superficiale della parte, ma può impedire anche la connessione tra i vari layer. Pertanto, i parametri di stampa devono essere ottimizzati per ridurre questo effetto. La Figura 13 illustra la formazione di palline di fusione.



Figura 13 Balling [11]

1.6.4 Tensioni residue e crepe

La formazione di tensioni residue, e successivamente di crepe, è attribuita principalmente agli elevati gradienti termici che si sviluppano durante il processo L-PBF. Il rapido riscaldamento seguito da rapido raffreddamento comporta il ritiro della pozza di fusione e quindi di deformazioni [11]. Le parti prodotte con DED e L-PBF sono suscettibili a questi difetti, le tensioni generate tendono ad essere di compressione nel centro della parte e di trazione lungo i bordi. Parametri di processo come velocità di scansione basse ed elevato input di energia possono produrre alte tensioni termiche residue. Infatti, man mano che l'energia di input aumenta, il metallo fuso si contrae maggiormente, e quindi si

potrebbero formare crepe. Un esempio delle distribuzioni di tensioni residue termiche in una parte lavorata tramite L-PBF è mostrato nella Figura 14 (a), (b), (c) e (d).

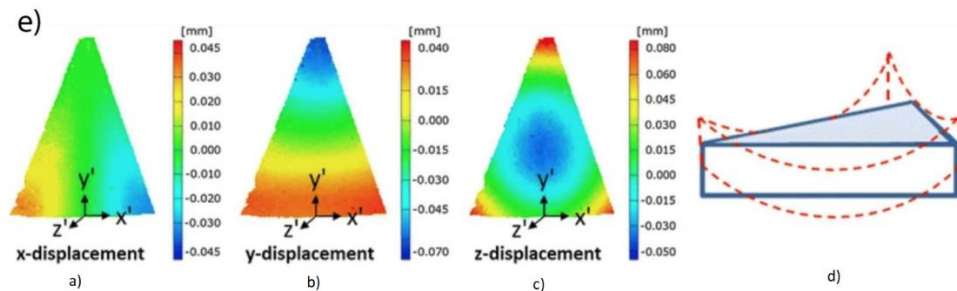


Figura 14 Tensioni residue [11]

1.7 Controllo del processo L-PBF e tecniche per l'ottimizzazione

Come citato nei capitoli precedenti la perfetta riuscita del componente, in termini di fabbricabilità, tramite i processi L-PBF, dipende in gran parte dai parametri di processo impostati durante la stampa. Oltre all'impostazione di questi, è possibile rappresentare la tecnologia L-PBF attraverso software che permettono di eseguire l'analisi FEM (*“Finite Element Method Analysis”*) del processo di stampa. Quest'analisi ci permette di prevedere le problematiche che potrebbero insorgere durante la realizzazione del componente ed andare ad agire tempestivamente per evitare stress residui significativi, distorsioni severe e collassi di materiale.

Oltre all'analisi FEM, essere in grado di monitorare e controllare le proprietà del processo di stampa è importante per produrre parti di alta qualità e ripetibili [11]. Diversi strumenti possono essere utilizzati per monitorare il processo di deposizione come pirometri, telecamere, termocoppie e sensori di spostamento.

1.8 Trattamenti di post-lavorazione

Come discusso in precedenza, diversi difetti possono essere presenti nelle parti stampate tramite L-PBF. Difetti come elevata rugosità superficiale, porosità, sforzi residui e microstrutture indesiderate che sono inaccettabili per la maggior parte delle applicazioni. Per questo motivo si utilizzano metodi di post-processing che possono migliorare notevolmente le proprietà meccaniche e l'estetica delle parti prodotte. Di seguito vengono elencati alcuni dei principali trattamenti impiegati.

1.8.1 Pressatura isostatica a caldo (HIP)

L'HIP è una tecnica severa di post-processing utilizzata per eliminare la porosità all'interno della struttura metallica. Inizialmente viene riscaldata la parte a temperature elevate e contemporaneamente si applicano alte pressioni vicine o uguali al limite di snervamento in un'atmosfera inerte. Queste condizioni fanno sciogliere i gas intrappolati nel metallo fuso, quindi, densificano e omogeneizzano la microstruttura del materiale [11]. Poiché i pori riducono notevolmente la durata a fatica del componente, l'HIP ha confermato un significativo aumento della resistenza a fatica. Esempi di trattamento HIP possono essere visti nelle Figure 15 (a) e (b).

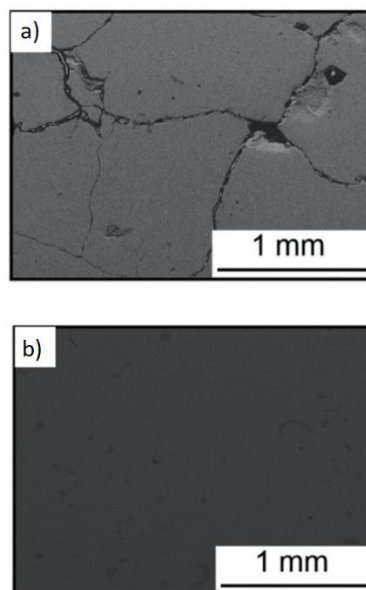


Figura 15 Trattamento HIP [11]: a) prima del trattamento; b) dopo il trattamento

1.8.2 Trattamento termico

Il trattamento termico ha svolto un ruolo importante nella metallurgia per centinaia di anni, poiché le proprietà meccaniche e morfologie dei grani desiderati non sono altrimenti ottenibili. Anche per le parti lavorate tramite L-PBF vengono utilizzati trattamenti termici simili a quelli delle leghe lavorate tramite fonderia. Nonostante la tecnologia L-PBF permetta di impostare vari parametri di processo i trattamenti termici vengono utilizzati per alleviare tensioni residue che si possono generare nella parte, eliminare difetti presenti all'interno o in superficie o per migliorare le proprietà meccaniche [11]. I trattamenti più comuni vengono elencati di seguito:

- **Tempra.** La tempra è uno dei trattamenti maggiormente conosciuti ed impiegati in ambito industriale, consiste nel raffreddare velocemente il componente utilizzando appositi forni, aria, acqua oppure olii. Grazie a questa tecnica è possibile incrementare notevolmente la resistenza meccanica della parte [12].
- **Solubilizzazione (ST).** La solubilizzazione è un trattamento preparatorio all'invecchiamento attraverso il quale si porta il componente ad elevate temperature per indurre una parziale o completa ricristallizzazione del materiale [13]. Questa modifica della struttura aumenta la dimensione dei grani con conseguente variazione delle sue proprietà meccaniche. Ad esempio, per campioni realizzati in Inconel 718 la solubilizzazione può essere fatta:
 - Solubilizzazione a 980°C per 1h;
 - Solubilizzazione a 1065°C per 1h.

Aumentando la temperatura o il tempo del trattamento si ottiene la completa ricristallizzazione del materiale ed i grani diventano grossolani.

- **Invecchiamento (AGE).** L'invecchiamento è un trattamento che permette di omogenizzare la composizione chimica del materiale. Si esegue successivamente alla solubilizzazione nel quale si porta la parte a temperature più basse rispetto a quelle della ST, e solitamente si opera anche un secondo raffreddamento. Questa tecnica permette di attenuare le tensioni residue che si generano nel materiale dopo la fabbricazione. Ad esempio, per componenti in Inconel 718 si esegue un invecchiamento in due fasi della durata di 8h sia per il primo che per il secondo, quindi 8h + 8h [12].

1.8.3 Tecniche di lucidatura

Un'altra tecnica di post-processing è la lucidatura che conferisce alle parti fabbricate tramite L-PBF una finitura superficiale elevata [11]. Un'elevata rugosità superficiale contribuisce notevolmente all'inaccuratezza nelle dimensioni, alla scarsa resistenza a fatica e all'estetica poco attraente. Esistono diversi metodi di lucidatura per le parti lavorate tramite L-PBF tra cui la lucidatura laser, la lucidatura elettrolitica e la sabbiatura.

1.9 Superleghe di Nichel processate tramite L-PBF

Il numero di leghe attualmente disponibili sul mercato per la tecnica L-PBF è molto limitato rispetto al vasto numero utilizzato oggi per i processi tradizionali. Dato il grande potenziale della fabbricazione additiva di metalli, la ricerca da parte delle industrie e accademie sta aumentando piuttosto rapidamente. Tra le più utilizzate troviamo le leghe a base di Nichel come l'Inconel sono superleghe principalmente composte da Ni e Cr e hanno come caratteristiche meccaniche ottime, come resistenza allo snervamento elevata, elevata saldabilità, resistenza alla corrosione e temperature di esercizio elevate. Grazie alle sue proprietà l'Inconel è utilizzato ampiamente nelle industrie marittime, nucleari e aerospaziali ed è un materiale molto studiato per i processi L-PBF. Le leghe di Inconel più utilizzate sono Inconel 625 e Inconel 718 [11].

2. INCONEL 718

Nonostante la tecnologia AM, in particolare la L-PBF, permetta la stampa di varie tipologie di materiali metallici, per tutti i processi di realizzazione di un prodotto la scelta del materiale è fondamentale per garantire il corretto funzionamento della parte. Una delle leghe che suscita un notevole interesse è l'Inconel 718 (IN718). Questa è una superlega a base di nichel indurita per precipitazione che contiene principalmente Niobio, Cromo e Molibdeno. La Tabella 1 mostra la composizione chimica dell'Inconel 718.

Tabella 1 Composizione chimica Inconel 718 in % [10]

Ni	50,00 – 55,00
Cr	17,00 – 21,00
Nb	4,75 – 5,50
Mo	2,80 – 3,30
Co	Max 1,00
Ti	0,65 – 1,15
Mn	Max 0,35
Al	0,20 – 0,80
C	Max 0,08
Fe	Rest

Essa è nota grazie alle notevoli caratteristiche meccaniche e fisiche che possiede (Tabella 2). Tra le più importanti ritroviamo: elevato limite di snervamento, varia tra 1000/1200 MPa, e resistenza a trazione, di circa 1200/1400 MPa [14], buona rigidità, buona resistenza a fatica, buona resistenza a corrosione e buon comportamento nelle applicazioni a temperature medio-alte [15].

Tabella 2 Caratteristiche meccaniche e fisiche Inconel 718 [16]

Densità	8,19 g/cm ³
Punto di fusione	1336 °C
Coefficiente di espansione	13,0 µm/m °C (20 – 100 °C)
Modulo di rigidità	77,2 kN/mm ²
Modulo di elasticità	204,9 kN/mm ²
Temperatura di esercizio	-200 °C – 550 °C

Da queste informazioni si capisce l'interesse dell'industria verso questa superlega. La produzione di parti in Inconel 718 tramite le tecnologie tradizionali non è di facile attuazione a causa dell'elevata resistenza al taglio e alla bassa duttilità del materiale. Per questo motivo l'industria sta investendo sullo studio di nuove tecnologie per la produzione di materiali come l'Inconel 718. Infatti, le tecnologie di produzione additiva basate su laser stanno rapidamente maturando per diventare alternative ai percorsi di produzione convenzionali. L'interesse principale viene da settori come aeronautico, aerospaziale e petrolifero dove i componenti richiesti hanno geometrie complesse che non sono replicabili con processi tradizionali.

Il presente studio si concentra sulla stampa di un provino tramite la tecnologia L-PBF, realizzato in Inconel 718. Per questo motivo, nei paragrafi successivi vengono descritte le principali caratteristiche di una parte realizzata in Inconel 718 tramite L-PBF.

2.1 Proprietà meccaniche di componenti stampati tramite L-PBF

Per analizzare la resistenza meccanica dei campioni realizzati tramite L-PBF, questi vengono confrontati con campioni realizzati tramite colata di investimento. I grafici nelle Figure 16 (a) e (b) rappresentano le curve deformazione-stress dei due casi.

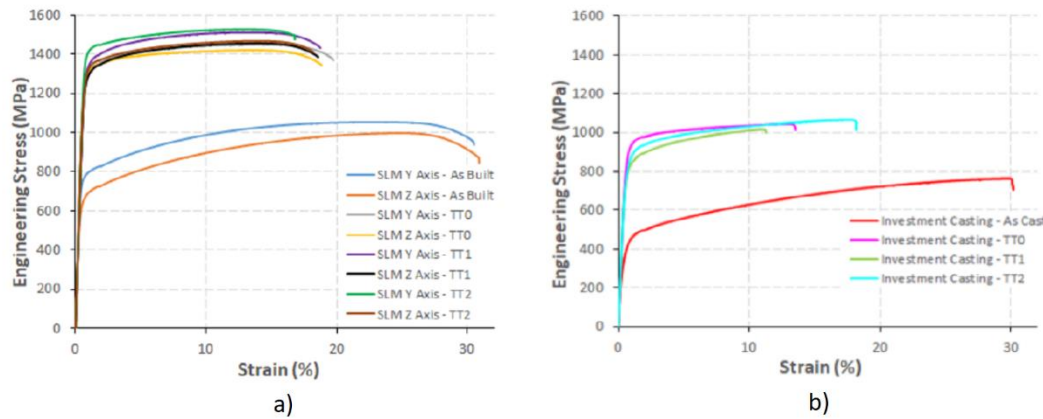


Figura 16 Curve deformazione-stress campione in Inconel 718 [17]: a) realizzato tramite L-PBF; b) realizzato per colata d'investimento

Osservando i grafici, si può notare che i campioni L-PBF hanno resistenza meccanica e duttilità migliori rispetto a quelle ottenute dai campioni di colata di investimento. Lo stesso andamento è possibile notarlo considerando campioni trattati termicamente, infatti, si osserva un aumento del 51,3% nella resistenza massima, con una resistenza a snervamento del 66,2% più alta e anche un leggero aumento nell'allungamento alla rottura dello 0,5% [17]. Queste migliori proprietà meccaniche ottenute da Inconel 718 prodotto tramite L-PBF sono dovute alla microstruttura fine ed omogenea ottenuta tramite il processo L-PBF e sicuramente anche i trattamenti termici post-produzione possono migliorarle.

Per quanto riguarda la durezza ottenuta dai due processi, confrontando i valori riportati, si osserva una tendenza simile a quella vista nella valutazione delle proprietà meccaniche con i test di trazione. Il grafico a barre nella Figura 17 mostra il confronto tra i campioni IN718 ottenuti mediante L-PBF e i campioni di colata di investimento [17]. Si può concludere che in tutti i casi, sia as-built che as-cast, i campioni L-PBF raggiungono valori di durezza più alti rispetto a quelli della colata di investimento.

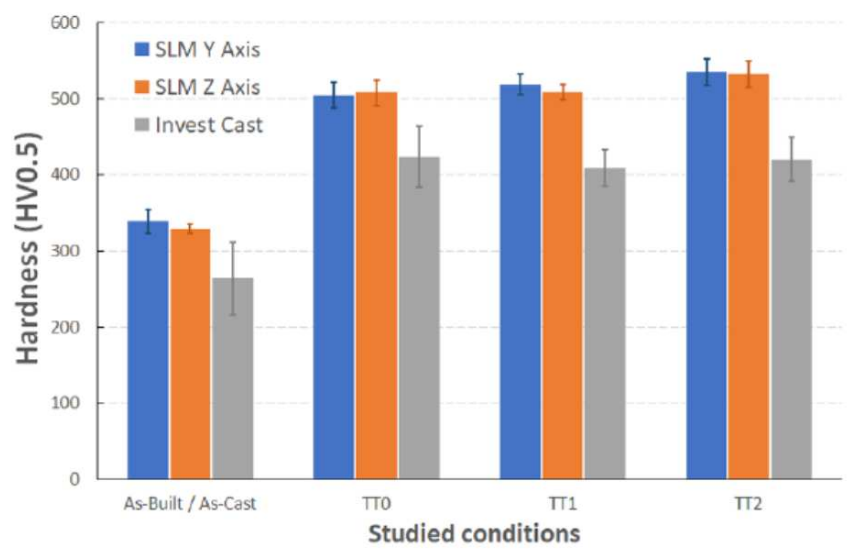


Figura 17 Confronto durezza campione in Inconel 718 realizzato tramite L-PBF e colata d'investimento [17]

3. LE STRUTTURE RETICOLARI

La fabbricazione additiva, in base a quanto visto nei capitoli precedenti, consente la produzione di componenti con geometrie che non sono raggiungibili mediante i metodi di produzione tradizionali. Questa capacità è stata sfruttata per l'ideazione e successiva realizzazione di strutture reticolari complesse (note anche con il termine “*Lattice structure*”). Le strutture reticolari, o cellulari, sono diventate un'opzione di scelta per molti design, in particolare per il “*Lightweighting*” (alleggerimento) grazie alle ottime proprietà meccaniche ottenibili, al buon assorbimento di energia, alle eccellenti capacità di isolamento termico e soprattutto grazie ad un peso notevolmente ridotto dei componenti [18]. Grazie a queste notevoli caratteristiche, le strutture reticolari hanno trovato impiego in molti settori come nelle aziende automobilistiche, aerospaziali e biomediche per la realizzazione di strutture leggere pur mantenendo le proprietà meccaniche richieste. In ambito industriale esistono varie tipologie di strutture cellulari, la classificazione delle quali viene riportata nella Figura 18 [18].

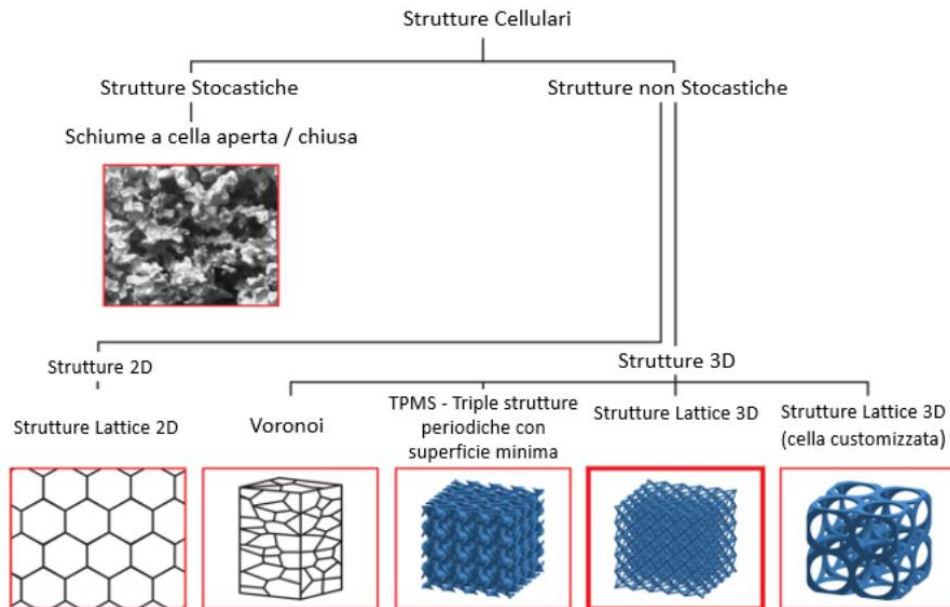


Figura 18 Classificazione strutture reticolari [19]

La prima suddivisione di queste strutture riguarda la disposizione spaziale delle celle che possiamo dividere in due tipologie di strutture, quelle stocastiche e quelle non stocastiche.

Le strutture stocastiche sono principalmente le schiume metalliche, queste sono prodotte iniettando un gas o mescolando un agente schiumogeno nel metallo fuso e molti studi ne hanno investigato l'uso per applicazioni tecniche come l'assorbimento di energia e la riduzione di peso [20]. Come si può vedere dall'immagine le schiume si dividono in funzione della cella che può essere aperta o chiusa. Quelle a cella aperta hanno un'ottima capacità di assorbimento dell'energia, mentre quelle a cella chiusa hanno una buona resistenza e rigidità [18]. Le schiume non vengono molto utilizzate dato che presentano una struttura randomica, questo comporta variazioni non controllate della distribuzione di temperatura e degli sforzi, favorendo la rottura locale della parte.

Le strutture non stocastiche, ovvero quelle reticolari ("lattice"), si differenziano dalle schiume per via dell'organizzazione controllata delle celle nello spazio. A loro volta possono essere suddivise in altre due categorie: strutture 2D e 3D. Le seconde, che sono quelle di nostro interesse, si suddividono in ulteriori quattro sottocategorie:

- **Voronoi.** I Voronoi sono strutture che presentano moduli geometrici non uniformi in modo tale che la struttura presenti un comportamento meccanico rigido;
- **Triply Periodic Minimal Surface (TPMS).** Le TPMS sono strutture che vengono impiegate per la creazione di strutture alleggerite;
- **Strutture Lattice 3D.** Le strutture in lattice 3D presentano travi e nodi per cui le proprietà meccaniche variano in funzione della geometria della cella;
- **Strutture Lattice 3D customizzate.** Le strutture in lattice 3D customizzate sono generate dalla manipolazione booleana di figure geometriche.

In generale, la classificazione può essere ridotta considerando le strutture basate su puntoni/travi o "*Beam based*" o su "*Triply Periodic Minimal Surface, TPMS*". Le strutture reticolari vengono studiate e selezionate in base alla loro risposta meccanica, ovvero, se sono dominate dalla flessione (*bending-dominated*) o dall'allungamento (*stretch-dominated*). Le prime sono caratterizzate da un minor numero di "*Beam*" (a parità di dimensioni della cella), sono più flessibili e perciò dimostrano un'elevata capacità di assorbimento di energia. Le seconde sono formate da un maggior numero di elementi e quindi presentano proprietà meccaniche migliori delle strutture dominate dalla flessione [21]. La topologia cellulare di una struttura reticolare determina se sarà dominata dalla flessione o dall'allungamento.

3.1 Strutture reticolati basate su beam

Le strutture cellulari basate su travi più comuni sono la “*Body Centered Cubic*” BCC e la “*Face Centered Cubic*” FCC, o varianti di queste che includono travi lungo la direzione z chiamate BCCZ e FCCZ ed altre come il cubo, il traliccio ad otto e il diamante (Figura 19) [21].

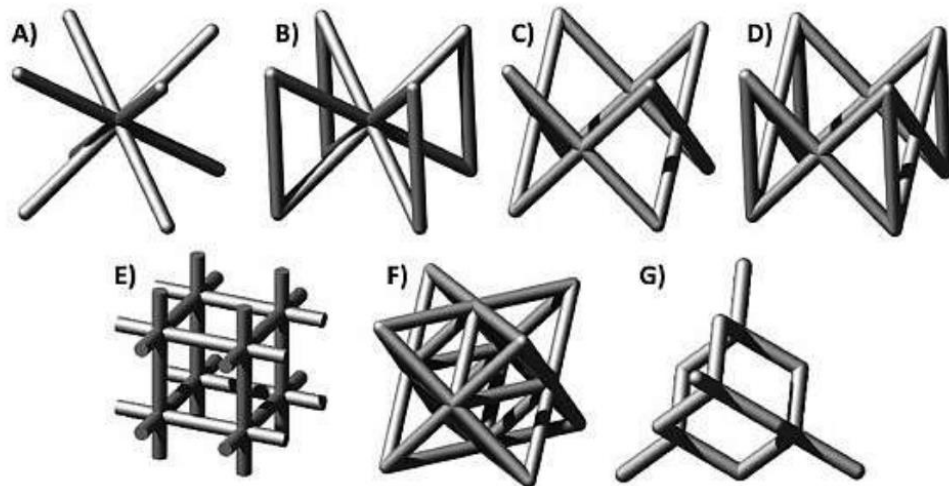


Figura 19 Strutture lattice basate su beam [21]: a) BCC; b) BCCZ; c) FCC; d) FCCZ; e) simple cubic; f) otetto; g) diamante

Queste topologie vengono spesso scelte sia per la loro semplicità di progettazione ma anche per massimizzare la distribuzione del materiale all'interno della struttura e per sfruttare appieno le opportunità offerte dall'AM (Figura 20).

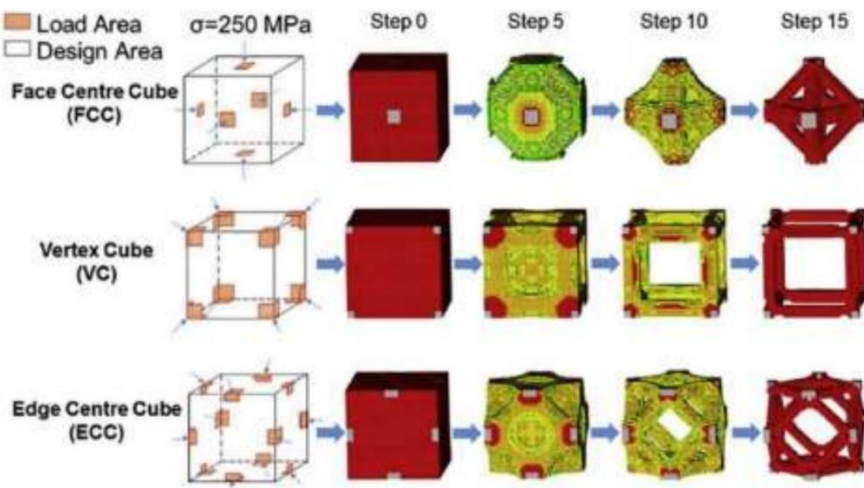


Figura 20 Unità cellulari topologicamente ottimizzate [21]

Le strutture basate su travi sono caratterizzate dal numero di Maxwell, M , che dipende dal numero di “Beam” (s) e nodi (n), secondo l’equazione rappresentata nella Figura 21 [21]:

$$M = s - 3n + 6$$

Figura 21 Equazione di Maxwell [21]

Da questa equazione è possibile individuare tre situazioni differenti (Figura 22) che comportano tre comportamenti diversi della struttura:

- $M < 0$, in questo caso ci sono poche travi che equilibrano le forze esterne causando lo sviluppo di sollecitazioni di flessione ai nodi delle travi, portando quindi ad un comportamento dominato dalla flessione;
- $M = 0$, in questo caso i carichi esterni vengono equilibrati dalla tensione e dalla compressione assiali nelle travi, il che significa che le strutture hanno un comportamento a trazione;
- $M > 0$, in quest’ultimo caso la struttura è troppo vincolata.

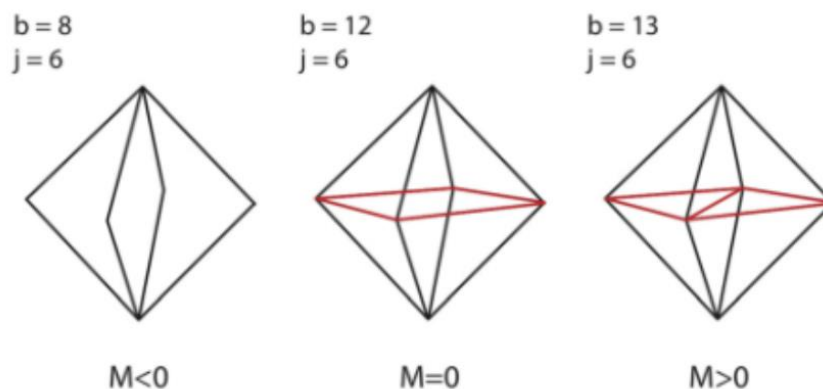


Figura 22 I tre casi del criterio di Maxwell [19]

Le proprietà meccaniche di queste strutture vengono solitamente espresse come frazione di quelle del materiale di origine, queste dipendono da vari fattori, tra i più importanti troviamo la densità relativa della struttura e l'orientamento delle celle rispetto alla direzione di applicazione del carico [21]. Le prove meccaniche delle strutture reticolari vengono eseguite in compressione per maggiore semplicità. Ciò è dovuto al fatto che per eseguire una prova di trazione sarebbe necessario progettare diversamente l'interfaccia

del campione, per cui le prove di compressione possono essere effettuate più semplicemente schiacciando il reticolo tra due piastre [21].

Il comportamento a compressione delle strutture reticolari può essere diviso in tre fasi (Figura 23) [21]:

- **Deformazione elastica lineare.** In questa fase la risposta del materiale è elastica lineare in funzione della sollecitazione applicata. In caso di interruzione dello stress la struttura torna alla condizione di partenza;
- **Deformazione plastica.** Una volta raggiunto il limite di snervamento, inizia la deformazione plastica. In questa fase il comportamento della struttura dipende dalla risposta meccanica, per le strutture dominate dalla flessione la deformazione aumenta con uno sforzo costante, detto “*Sforzo di Plateau*”. Mentre per le strutture dominate dalla trazione lo sforzo richiesto per ulteriori deformazioni oscilla;
- **Densificazione.** Quando le celle entrano in contatto l’una con l’altra lo stress aumenta rapidamente e si raggiunge il collasso della struttura.

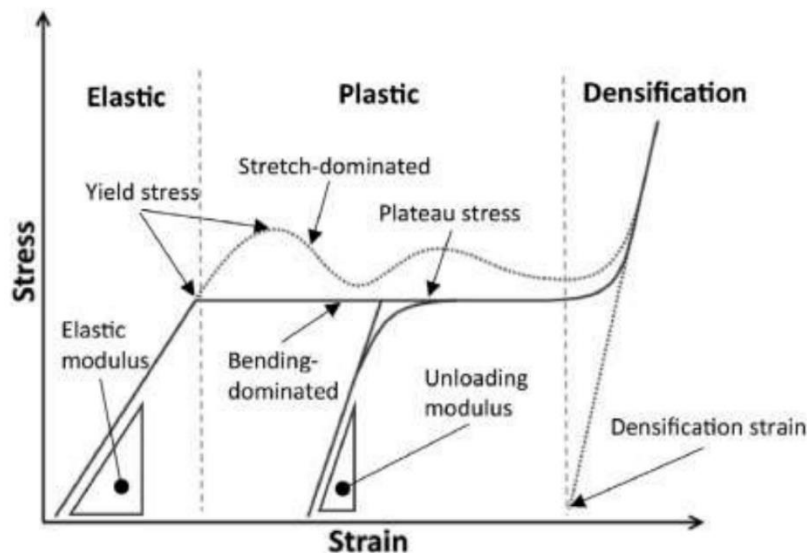


Figura 23 Curva deformazione-stress per le strutture reticolari [21]

In base a quanto scritto e come si può vedere dall’immagine precedente la resistenza a compressione e la rigidità dipendono fortemente dalla risposta meccanica della cella unitaria, infatti, le strutture dominate dalla trazione hanno una maggiore resistenza di quelle dominate dalla flessione.

Un'altra proprietà meccanica da considerare per le strutture reticolari è la resistenza a fatica. Il comportamento a fatica delle strutture cellulari soggette a carico dinamico, anche in questo caso, può essere suddiviso in tre fasi [21]:

- Nella prima fase la deformazione aumenta rapidamente;
- Nella seconda fase la deformazione rimane approssimativamente costante per circa $10^4 - 10^6$ cicli;
- Nella terza fase la deformazione aumenta fino ad arrivare al cedimento del provino.

I fattori che influenzano maggiormente la resistenza a fatica sono: le proprietà meccaniche del materiale grezzo, la densità del reticolo e la topologia della cella. Studi hanno dimostrato che la vita del componente aumenta con l'aumentare della densità, ma è la topologia della cella che influenza significativamente la resistenza a carichi ciclici. È stato notato anche che la diminuzione della resistenza a fatica è imputabile altresì a difetti di fabbricazione. Dunque, ottimizzando i parametri di lavorazione si possono migliorare notevolmente le prestazioni a fatica del reticolo.

3.2 Strutture reticolari Triply Periodic Minimal Surface TPMS

I reticoli "*Triply Periodic Minimal Surface*" TPMS sono strutture formate da superfici che si estendono periodicamente nelle tre le direzioni dello spazio, inoltre, presentano una curvatura media pari a zero in ogni punto, minimizzando localmente l'area superficiale per un dato contorno [22]. A livello locale, quindi, ogni punto di una struttura TPMS è in equilibrio con le forze agenti sulla superficie, ciò le rende particolarmente efficienti nella distribuzione dello stress. Queste superfici sono caratterizzate da peculiarità affascinanti e distintive, ad esempio in natura sono superfici lisce, non hanno spigoli o angoli acuti e dividono lo spazio in due o più domini che non si intersecano, inoltre, sono infinite, in quanto possono essere ripetute periodicamente in tre direzioni perpendicolari. Tali superfici sono state osservate in natura nel sapone, nei copolimeri a blocchi, nelle ali di farfalle e nei ricci di mare per citarne alcuni esempi (Figura 24 (a), (b), (c), (d) e (f)) [22].

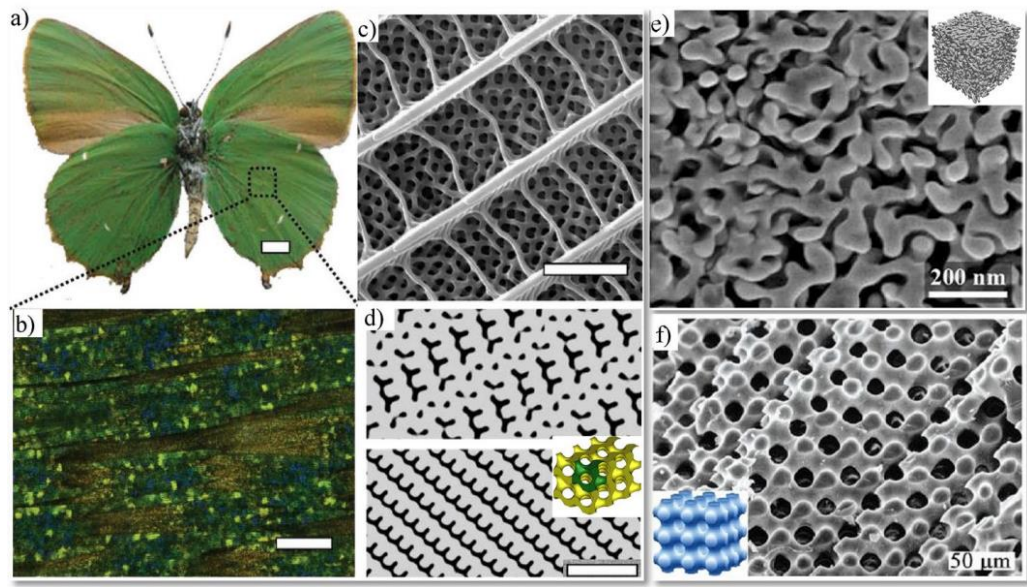


Figura 24 Strutture TPMS presenti in natura [22]: a) ali di farfalla; b) immagine ottica di strutture Gyroid sulla superficie dell'ala; c) vista dall'alto della struttura Gyroid dell'ala; d) sezione trasversale della struttura Gyroid dell'ala; e) microstruttura dell'oro nanoporoso; f) Sezione trasversale di un riccio di mare

La prima menzione di strutture TPMS nella letteratura risale al 1865 quando il tedesco Schwarz introdusse le superfici “Schwarz Primitive” e “Schwarz Diamond” e la superficie “Neovius”. Quasi un secolo dopo, diversi altre TPMS furono introdotte da Alan H. Schoen, una delle strutture più interessanti scoperte da Schoen è la superficie “Gyroid” che è stata studiata in diverse discipline negli ultimi anni sotto ogni suo punto di vista per le sue notevoli proprietà basate sulla topologia. Gli esempi di disegni CAD di strutture TPMS sono mostrati nelle Figure 25 (a), (b) e (c).

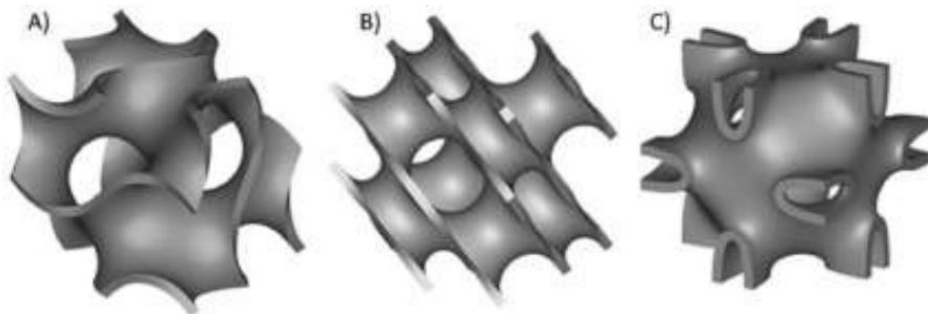


Figura 25 Celle unitarie TPMS [21]: a) Shoen Gyroid; b) diamante di Schwarz; c) Neovius

3.2.1 Caratteristiche geometriche

Le strutture TPMS vengono costruite ripetendo le celle unitarie con l'area minima possibile, ogni tipologia di architettura può essere ricondotta ad un'equazione matematica. Esempi tipici di funzioni che identificano una specifica TPMS sono riportate nella Figura 26 seguente [23].

$$\textbf{Gyroid surface: } F(x, y, z) = \cos(x) \cdot \sin(y) + \cos(y) \cdot \sin(z) + \cos(z) \cdot \sin(x) + a$$

$$\textbf{Schwarz diamond: } F(x, y, z) = \sin(x) \sin(y) \sin(z) + \sin(x) \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) + a$$

$$\textbf{Neovius surface: } F(x, y, z) = 3 \cdot (\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)) + 4 \cdot (\cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z)) + a$$

$$\textbf{D – prime surface: } F(x, y, z) = 0.5 \cdot (\sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z)) - 0.5 \cdot (\cos(2x) \cdot \cos(2y) \cdot \cos(2z) + \cos(2z) \cdot \cos(2x)) + a$$

Figura 26 Equazioni delle celle unitarie TPMS [23]

dove le x , y e z sono le coordinate cartesiane e a è il valore di offset che può essere sia positivo che negativo. Se il valore di offset è positivo, la superficie si costruisce nella regione positiva e viceversa.

In generale, queste strutture possiedono una serie di proprietà geometriche che le rendono uniche e adatte per molte applicazioni ingegneristiche. Tra queste, le caratteristiche principali sono:

- **Curvatura media zero.** Le superfici TPMS hanno una curvatura media pari a zero in ogni punto, ciò le rende minimali in quanto ad area superficiale per un dato volume. Questo aspetto è fondamentale perché ottimizza la distribuzione degli stress applicati riducendo i picchi che potrebbero portare a cedimenti strutturali.
- **Periodicità nelle tre direzioni.** Una caratteristica fondamentale delle TPMS è la loro periodicità nelle tre direzioni. Significa che la stessa cella unitaria si ripete in tutte le direzioni nello spazio, generando strutture continue e autoportanti. Questa

capacità attribuisce alle TPMS proprietà isotrope, uguali in tutte le direzioni, ciò rappresenta un vantaggio in molte applicazioni [24].

- **Rapporto superficie-volume.** Le TPMS possiedono un elevato rapporto superficie-volume rispetto alle strutture tradizionali, per cui sono particolarmente adatte in applicazioni in cui la superficie di scambio è di fondamentale importanza. Un esempio potrebbero essere gli scambiatori di calore, o strutture dove è richiesto un grande volume con quantità di materiale minima, come nelle applicazioni aerospaziali.
- **Customizzazione.** Una delle caratteristiche più interessanti e più utilizzate delle TPMS è la possibilità di modificare la geometria in funzione delle esigenze progettuali. È possibile impostare parametri come la dimensione della cella unitaria, lo spessore delle pareti e il peso.

Il processo L-PBF ha aperto una nuova via per la progettazione e soprattutto la fabbricazione di strutture di questo tipo. Come discusso in precedenza, le tecnologie di produzione additiva permettono di realizzare geometrie altamente complesse e personalizzate che sarebbero impossibili da realizzare con tecniche di produzione tradizionali. Per questo motivo le TPMS hanno trovato innumerevoli applicazioni in ambiti dove sono richiesti:

- **Elevato rapporto resistenza-peso.** Le TPMS permettono di ridurre notevolmente il peso di un componente senza compromettere le sue proprietà meccaniche. In settori come quello aerospaziale e automobilistico questa caratteristica è essenziale.
- **Proprietà meccaniche personalizzabili.** Grazie alla loro geometria, le strutture TPMS consentono di personalizzare il comportamento meccanico del componente. Progettando la struttura si riesce ad ottimizzare la distribuzione degli stress, migliorare la resistenza meccanica e gestire la dissipazione del calore.
- **Integrazione con materiali avanzati.** La combinazione con il processo L-PBF permette l'utilizzo di leghe metalliche avanzate per la realizzazione di componenti aventi resistenza meccanica superiore, una maggiore resistenza a corrosione e a temperature elevate.

Tra le strutture TPMS citate in precedenza questo studio si concentra sulle strutture con cella Gyroid. Queste vengono impiegate specialmente nell'ambito biomedico e aerospaziale, la loro applicazione è dovuta ai seguenti vantaggi [24]:

- **Proprietà quasi isotropiche.** Le strutture Gyroid possiedono proprietà quasi isotropiche, ciò significa che presentano lo stesso comportamento indipendentemente dalla direzione in cui vengono applicati i carichi.
- **Ottima resistenza meccanica.** Le strutture Gyroid hanno uno dei migliori rapporti tra densità e resistenza meccanica di qualsiasi altra struttura fabbricata tramite la fabbricazione additiva.
- **Minor consumo di materiale.** Grazie alle ottime proprietà meccaniche della struttura il materiale necessario per la realizzazione è minore. In questo modo si ha un risparmio sui costi e sui tempi di produzione, inoltre, essendoci meno materiale si producono parti più leggere.

4. SIMULAZIONE DEL PROCESSO DI AM

L'Additive Manufacturing permette di realizzare strutture con geometrie complesse non ottenibili tramite convenzionali tecnologie di manifattura sottrattiva. Queste strutture hanno numerosi vantaggi, tra i più importanti vi sono il mantenimento delle proprietà meccaniche del materiale, la riduzione del peso e dei costi. Il software nTopology si distingue per la sua capacità di progettare e ottimizzare le strutture reticolati in base alle prestazioni richieste, cosa che risulta particolarmente utile in vari settori ingegneristici. La modellazione della struttura è stata eseguita utilizzando i comandi "Lattice" e, successivamente, "Volume Lattice", tramite i quali si accede ad una libreria del software dove si ha la possibilità di selezionare le tipologie di celle TPMS, in questo caso è stata scelta una cella unitaria Shoen Gyroid. I valori assegnati ai parametri geometrici del provino stampato sono stati: Wall Thickness pari a 0,5 mm e Cell Size pari a 2mm. Nella Figura 27 (a) è riportata la rappresentazione del provino tramite nTopology, mentre nella Figura 27 (b) è presente un'immagine del provino stampato.

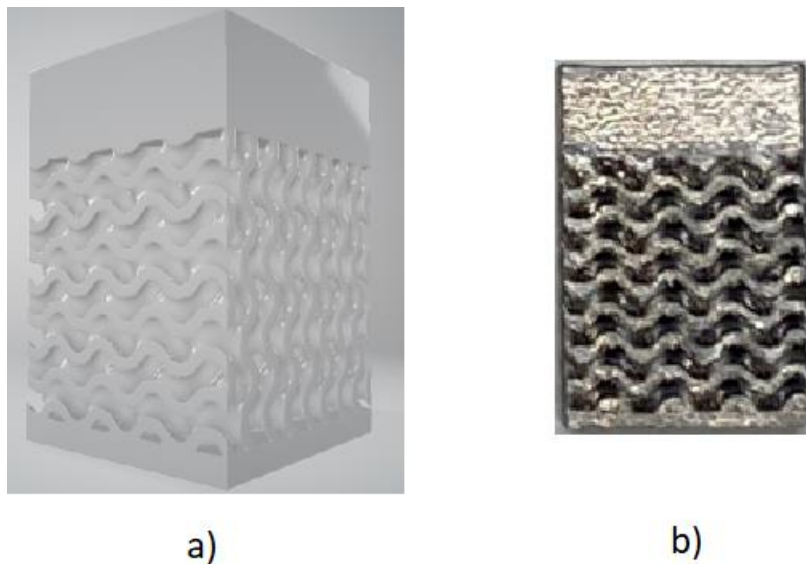


Figura 27 Provino Gyroid: a) realizzato tramite nTopology; b) provino stampato

Terminata la fase di progettazione del provino si è passati alla modellazione agli elementi finiti del processo L-PBF. Si svolgono, quindi, delle simulazioni dei processi termici e meccanici a cui sarà sottoposto il componente in fase di realizzazione, così da avere una previsione dei gradienti termici e delle distorsioni che potrebbero presentarsi alla fine del

ciclo. Le analisi più comuni sono quella termica e meccanica, che possono essere accoppiate sequenzialmente. La modellazione termica del processo L-PBF è molto importante a causa del riscaldamento e raffreddamento non omogenei e rapidi che avvengono quando il laser entra in contatto con il materiale di alimentazione. Affinché l'analisi venga eseguita correttamente, nei software FEM è richiesto all'utente di inserire i parametri di processo, come potenza del laser, velocità di scansione e altre ed anche i parametri del materiale di alimentazione, come tipologia di materiale, dimensioni e altre. L'accuratezza dell'analisi termica è una delle parti più importanti per l'intera simulazione poiché determina le proprietà meccaniche corrispondenti e l'accuratezza dimensionale. L'analisi meccanica viene eseguita successivamente a quella termica, i risultati ricavati da quest'ultima vengono utilizzati come carichi nell'analisi meccanica per calcolare gli sforzi residui durante la fabbricazione [11]. Software come Siemens NX e Ansys Workbench 2020 R1 permettono di replicare virtualmente il processo di stampa L-PBF.

4.1 Siemens NX

Il software Siemens NX, ideato dall'azienda Siemens Digital Industries, utilizza un metodo di analisi chiamato "Inherent Strain Method" (IS), cioè metodo della deformazione intrinseca. Questo metodo procede simulando l'accumulo di stress termico, tramite un tensore di deformazione residua, e poi lo applica alle regioni del modello meccanico strato per strato. Come abbiamo visto, durante un processo L-PBF il rapido riscaldamento seguito da rapido raffreddamento generano, inizialmente, una fase di espansione seguita da una di contrazione. Questi cambiamenti repentini generano degli stati tensionali e deformativi che devono essere noti e corretti. Tramite l'utilizzo di NX riusciamo ad analizzare la storia del processo meccanico e termico che si verifica durante la stampa che ci permette di calcolare la geometria deformata. Il software, inoltre, integra diverse funzionalità, come la possibilità di progettare la geometria CAD del componente, importarla nel modulo AM, impostare i parametri di stampa, simulare il processo di stampa ed analizzare i dati ottenuti. I moduli sui quali ci siamo soffermati sono quelli dedicati alla simulazione del processo additivo, quello denominato AM e quello di Pre/Post.

4.1.1 Modulo AM - Workflow

In questo ambiente si effettua la preparazione per il processo di stampa, si definiscono le dimensioni del piatto di stampa, si importa il modello CAD e lo si posiziona su di esso.

I passaggi necessari al corretto utilizzo di questo modulo sono:

1. Avviato il programma si genera un nuovo file e si seleziona l'ambiente dove si intende lavorare, nel nostro caso "Additive Manufacturing" (Figura 28);

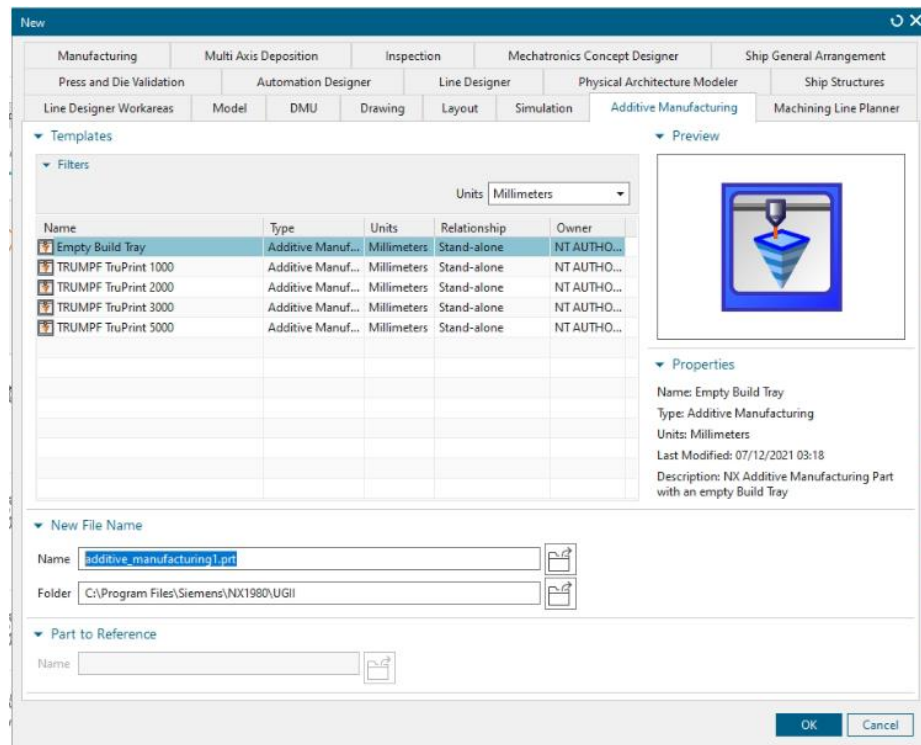


Figura 28 Creazione del nuovo file nel modulo AM

2. Selezionare Empty Build Tray;
3. Si genera il Build Tray e tramite il comando "proprietà" si inseriscono le dimensioni del piatto di stampa, le dimensioni inerite sono riportate in Figura 29;

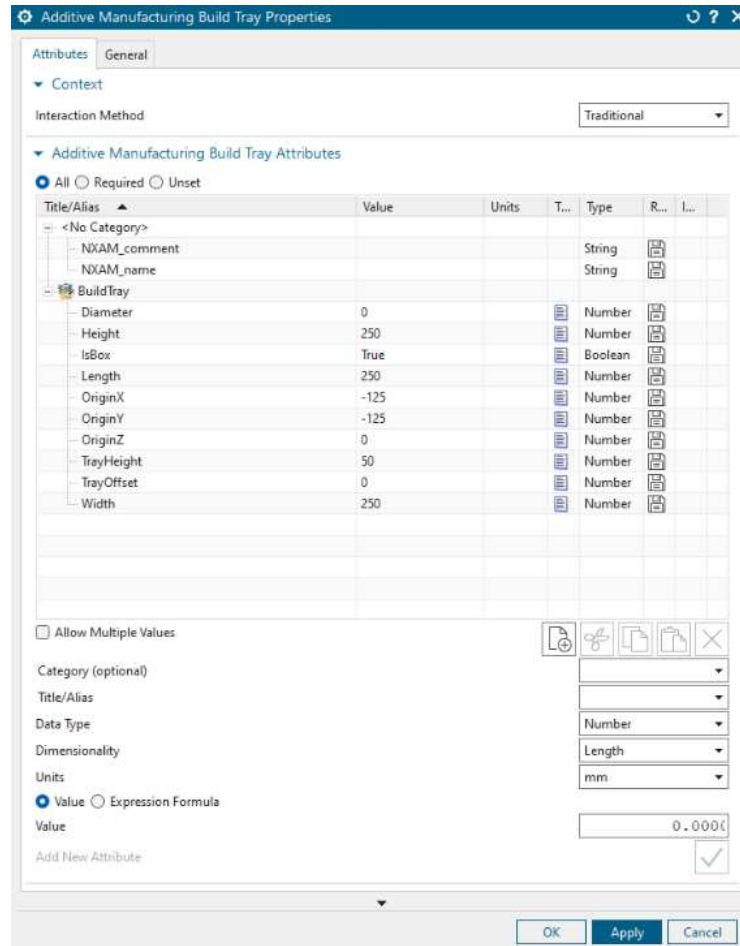


Figura 29 Dimensioni piatto di stampa

- Tramite il comando “*Import STL file*” si importa il modello CAD, nel presente studio è un reticolo TPMS con cella unitaria Shoen Gyroid, e lo si posiziona sulla “working platform” (Figura 30).

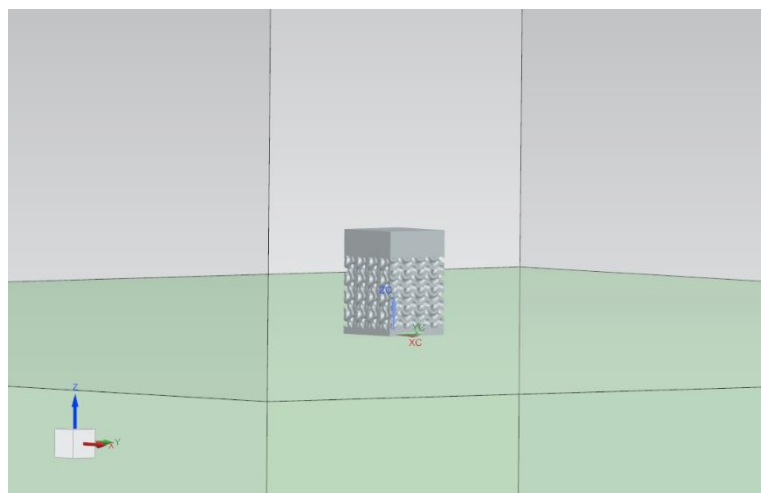


Figura 30 Posizionamento modello CAD nel piatto di stampa

A questo punto, all'interno della tab “*Process Simulation*”, tramite il comando “*Start process simulation*” si seleziona il corpo di cui si vuole eseguire la simulazione e ci si sposta all'ambiente Pre/Post.

4.1.2 Ambiente di simulazione Pre/Post

A questo punto, all'interno della tab “*Additive Manufacturing*”, si passa al fulcro della simulazione, in questo modulo si inseriscono i dati riguardanti i parametri di stampa, lo slicing termico e meccanico, ecc. La sequenza di inserimento viene di seguito illustrata:

1. **Printer Setting.** In questa scheda, mostrata in Figura 31, è possibile impostare i parametri globali della simulazione di stampa, quelli di processo e quelli del materiale impiegato.



Figura 31 Scheda Printer Settings

Con il comando “Global Settings” (Figura 32) si imposta il tipo di simulazione, che può essere di tre tipologie:

- **Solo Termica.** fornisce solo i risultati termici;
- **Solo Meccanica.** fornisce solo i risultati di stress e deformazione;
- **Termica + Meccanica.** fornisce entrambi i risultati.

Nel presente studio la simulazione è stata eseguita sia di tipo termico che meccanico. L'opzione “*Simulate Powder*” ci permette di simulare o meno la polvere nel “*build volume*”. Questa possibilità permette di avere risultati più precisi a discapito di un tempo maggiore di risoluzione della simulazione, per questioni di tempo l'opzione non è stata utilizzata.

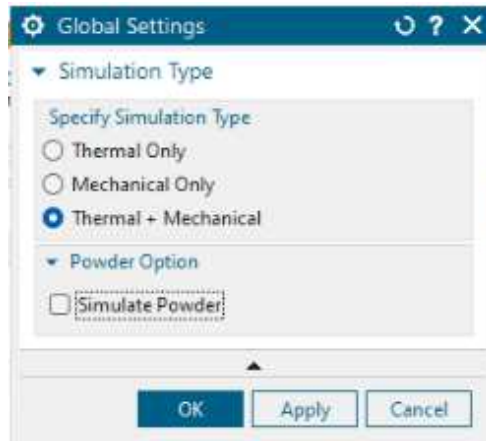


Figura 32 Finestra Global Settings

Tramite il comando “*Process/Material Parameters*” andiamo ad inserire i parametri di processo e del materiale. In questa finestra è possibile:

- Modificare i parametri di stampa;
- Definire le proprietà del materiale;
- Gestire le proprietà del processo.

Nel presente caso studio è stato selezionato “*Typical Inconel 718 (40 micron)*”.

2. FEM Preparation. In questa scheda (Figura 33) si imposta lo slicing termico e meccanico che si richiede al software per eseguire la simulazione.



Figura 33 Scheda FEM Preparation

Tramite il comando “*Define Thermal Slice*” si imposta il numero di sezioni in cui dividere la geometria, sul numero di queste sezioni il programma misura gli incrementi di temperatura. Il sezionamento avviene in tre modalità:

- **Automatica**, il software crea le sezioni in base al numero indicato.
- **Manuale**, consente di importare delle sezioni definite.
- **Computed**, permette di impostare lo spessore della fetta di componente compresa tra due tagli.

Nel presente studio è stata scelta la modalità Automatica impostando 16 layer come riportato in Figura 34.

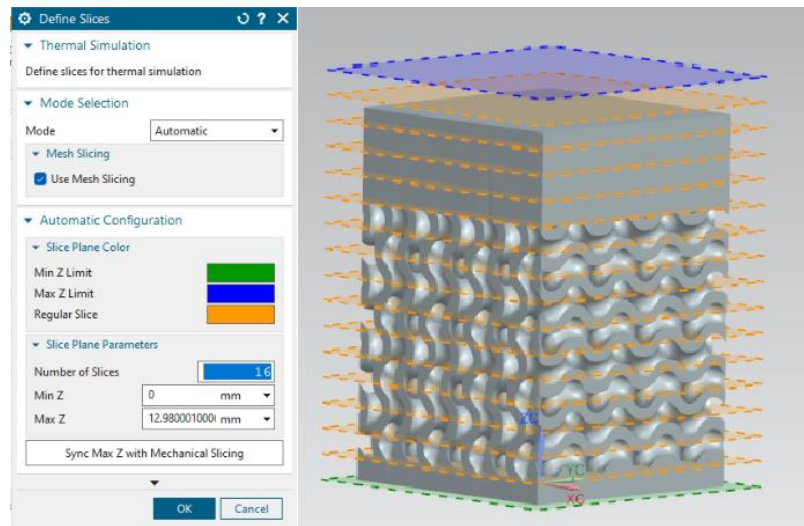


Figura 34 Definizione dello slicing termico

Il comando “*Define Mechanical Slices*”, in maniera analoga, consente di impostare il numero di sezioni meccaniche che determinano il numero di passaggi temporali nella soluzione della distorsione. Anche in questo caso si hanno tre opzioni:

- **Automatico**, il software crea le sezioni in base al numero indicato.
- **Manuale**, consente di importare delle sezioni definite.
- **Solver**, permette di impostare lo spessore per ciascuna fetta. Dopo che il software ha generato le sezioni è possibile passare a Manuale e aggiungere o togliere sezioni.

Nel caso studio (Figura 35) è stata utilizzata la modalità Solver impostando uno “*Slice Thickness*” di 0,74 mm, ricavato tramite il rapporto tra l’altezza della cella di 11,8 mm e il numero di layer utilizzato per lo slicing termico (16 layer).

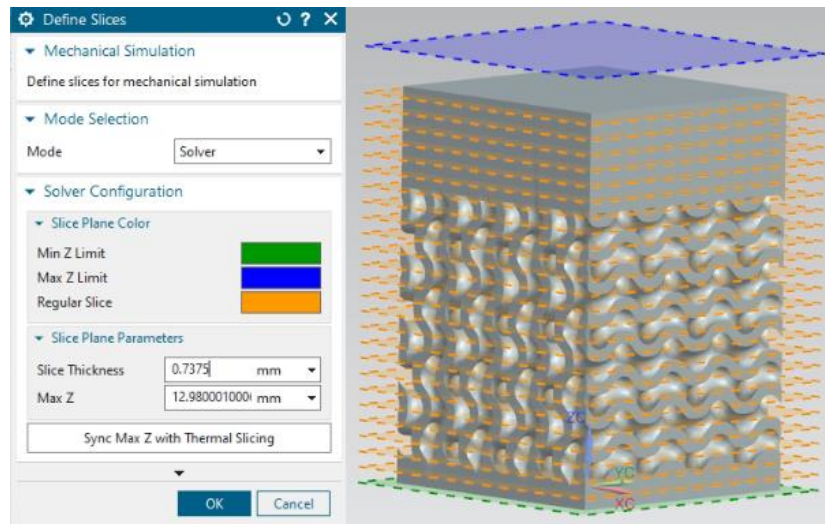


Figura 35 Definizione dello slicing meccanico

- 3. Model Preparation.** Tramite questa scheda, denominata “*Mesh tetr. 3D*” in Figura 36, vengono definiti i parametri di generazione della Mesh del componente.



Figura 36 Scheda Model Preparation

Come visto nei capitoli precedenti, la mesh viene creata tramite la scomposizione della geometria in elementi tetraedrici tridimensionali, con NX il metodo di meshing può essere customizzato scegliendo fondamentalmente tra due opzioni: “*Standard Meshing*” e “*Meshing From Facets*”. La principale differenza tra le due è la rappresentazione delle curve, la seconda opzione riesce a riprodurle più fedelmente rispetto alla prima. Nel presente caso studio è stata utilizzata comunque la prima opzione, “*Standard Meshing*”, dato che le simulazioni avviate con “*Meshing From Facets*” presentavano delle problematiche. Oltre a questa scelta è possibile anche impostare altri parametri di mesh come riportato in Figura 37.

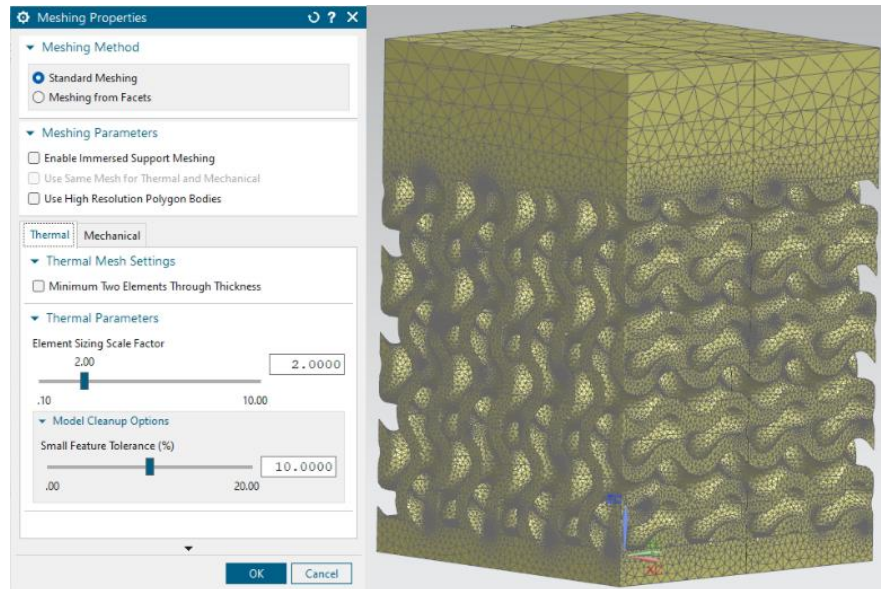


Figura 37 Finestra Meshing Properties e mesh provino

4. **Simulation Process.** In questo gruppo (Figura 38) si vanno ad impostare le opzioni di calcolo della simulazione.



Figura 38 Scheda Simulation Process

Nella finestra “*Computation Options*” si seleziona la destinazione della memoria relativa alla simulazione, la quantità di processori che dovranno simulare il procedimento e gli incrementi dei risultati in output.

A questo punto è possibile dare il comando di inizio simulazione “*Solve Simulation*”.

5. **Post Processing.** Terminato il processo, tramite la scheda in Figura 39 è possibile analizzare i risultati ottenuti dalla simulazione.



Figura 39 Scheda Post Processing

Si pone particolare attenzione sui dati di distorsione totale, localizzata lungo l'asse di stampa (asse Z) e di stress ricavati.

4.2 Ansys

Il secondo programma che è stato utilizzato è Ansys Workbench 2020 R1 che utilizza un approccio diverso rispetto a NX. Il metodo impiegato è denominato “Lumped Layer Approach” che consiste nel raggruppamento di più layer di stampa in uno layer più semplice di elementi. Questo approccio consente di avere una soluzione rapida pur calcolando la tensione globale distribuita nella parte e la distorsione che si verifica durante il processo di stampa. Come visto in precedenza il modello CAD si divide in una rete di triangoli tetraedrici, chiamata mesh, e la tecnica denominata “death and birth” attiva e disattiva gli strati di elementi per simulare la realizzazione del componente. La simulazione della stampa si considera completata quando tutti gli elementi sono aggiunti. I tempi e gli intervalli temporali, dell'analisi, sono guidati dai parametri di processo e sono gestiti dal programma. La simulazione del processo deve seguire il metodo di costruzione del componente, considerando la solidificazione strato per strato. Essendo l'analisi termica e meccanica debolmente accoppiate, il software procede inizialmente con la simulazione termica e successivamente con quella meccanica. Il tempo della simulazione non coincide con quello reale in quanto sono presenti delle semplificazioni che permettono la riuscita dell'analisi, altrimenti il tempo richiesto sarebbe molto più elevato.

Le fasi dell'analisi sono:

- Posizionamento e orientamento delle parti nel “*Build Volume*”;
- Creazione di strutture di supporto (se necessarie);
- Configurazione del modello di simulazione e del materiale;
- Analisi dei risultati.

4.2.1 Impostazione del sistema di analisi

Per impostare il sistema di analisi si procede aprendo il modulo Workbench Additive. Il primo step consiste nell'attivazione di "Additive Wizard" nella tab chiamata "Extension Manager". Selezionato l'Additive Wizard apparirà un'icona chiamata "Additive Manufacturing System" che sarà da selezionare (Figura 40).

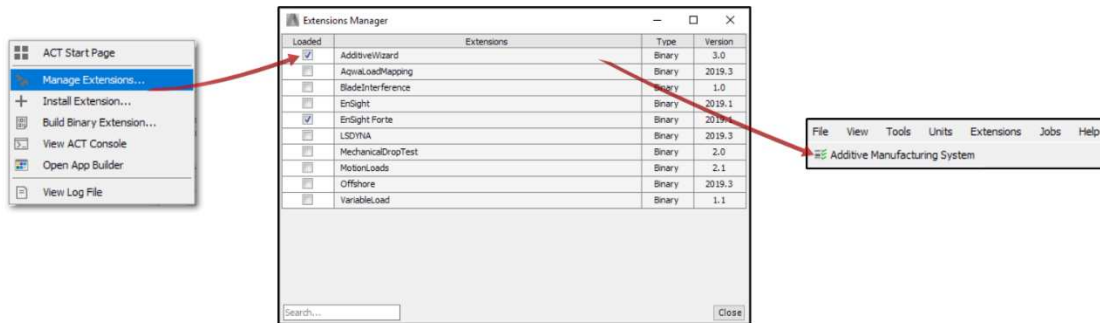


Figura 40 Attivazione dell'Additive Wizard

A questo punto si importa il modello CAD del componente. Dopodiché, nella schermata, si aprono i moduli del modello di simulazione, come mostrato in Figura 41.

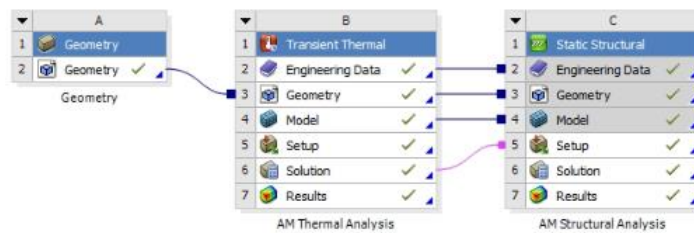


Figura 41 Moduli di simulazione

I moduli di simulazione comprendono:

- La "Geometry", ovvero il modello CAD del componente.
- "AM Thermal Analysis", ovvero l'analisi del transiente termico della fase di stampa. Questa simula il comportamento termico del materiale durante la stampa. Ansys applica energia utilizzando potenza e temperatura, lo svantaggio è che la simulazione non è conforme con il tempo. In questo modulo si devono specificare vari parametri di processo. Tramite la soluzione del transiente termico si può visualizzare la temperatura del componente durante la stampa. Una cosa da tenere in considerazione sono

le proprietà del materiale utilizzato, come: densità, conducibilità termica, capacità termica, modulo di Young, coefficiente di Poisson, coefficiente di dilatazione termica ed il diagramma di tensione-deformazione.

- “*AM Structural Analysis*”, ovvero l’analisi statica strutturale. Il modulo riceve come input i risultati dell’analisi termica e calcola deformazioni e lo stato tensionale del processo di stampa.

Dopodiché tramite la tab “*Engineering Data*” (Figura 42) si apre la libreria dei materiali disponibili e sceglie quello utilizzato, ovvero Inconel 718.

The image shows two screenshots of the Engineering Data software interface. The top screenshot displays a table of materials with columns for Material, Source, and Description. The bottom screenshot shows the detailed properties for Inconel 718, including material field variables, density, thermal expansion coefficients, melting temperature, and elastic properties.

Material	Source	Description
17-4PH Stainless Steel	Add	Sample data representative of 17-4PH Stainless Steel
316 Stainless Steel	Add	Sample data representative of 316 Stainless Steel
ABS12Mg	Add	Sample data representative of ABS12Mg
Inconel 625	Add	Sample data representative of Inconel 625
Inconel 718	Add	Sample data representative of Inconel 718
Structural Steel	Gene	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
Ti-6Al-4V	Add	Sample data representative of Ti-6Al-4V

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	Tabular	
Scale	1	
Offset	0	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Coefficient of Thermal Expansion	Tabular	
Scale	1	
Offset	0	C ⁻¹
Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	20	C
Melting Temperature	1260	C
Isotropic Elasticity	Tabular	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus: Scale	1	
Young's Modulus: Offset	0	Pa
Poisson's Ratio: Scale	1	
Poisson's Ratio: Offset	0	
Bulk Modulus: Scale	1	
Bulk Modulus: Offset	0	Pa
Shear Modulus: Scale	1	
Shear Modulus: Offset	0	Pa
Bilinear Isotropic Hardening	Tabular	
Yield Strength: Scale	1	
Yield Strength: Offset	0	Pa
Tangent Modulus: Scale	1	
Tangent Modulus: Offset	0	Pa
Isotropic Thermal Conductivity	Tabular	

Figura 42 Scheda Engineering Data

A questo punto, con doppio click su “*Model*”, all’interno del modulo “*AM Thermal Analysis*” si passa al Workbench Additive Wizard, ovvero alla simulazione.

4.2.2 Workbench Additive Wizard

Il Wizard permette di regolare tutte le impostazioni di base del modello per il processo di additive manufacturing L-PBF. La procedura da seguire è la seguente:

- Il primo passo consiste nell'indicare la parte, i supporti (se presenti) e la base di costruzione. Nel nostro studio le strutture di supporto non sono presenti, perciò, vengono identificati solo la geometria e la base di costruzione come riportato in Figura 43.

Field	Value	Unit
Part Geometry	Geometry Selection	
Part Selection	1 Body	
Support Geometry	No Supports	
Base Geometry	Create Base	
Length (x)	250	mm
Width (y)	250	mm
Thickness (z)	50	mm
X-Location	0	mm
Y-Location	0	mm
Z-Location	0	mm
Non-build Geometry	No Non-build	
Powder Geometry	No Powder	
Symmetry	No	

Figura 43 Scheda di selezione della geometria e impostazione delle dimensioni del piatto di stampa

- Nel secondo step si imposta la mesh, ovvero, come abbiamo visto nei capitoli precedenti, si suddivide il modello geometrico in tanti piccoli elementi che possono essere studiati più facilmente. Ne esistono di varie tipologie:
 - o “*Cartesian Mesh*”, questa crea una maglia esagonale per suddividere il componente. Questa tipologia, però, potrebbe non essere precisa per superfici curve o per piccole particolarità della parte. Tuttavia, questo metodo è veloce e adeguato a previsioni di distorsione e stress residuo.
 - o “*Layered Tetrahedral Mesh*”, questa crea una struttura tetraedrica capace di rappresentare geometrie complesse con fori o pareti sottili. La regolazione della dimensione della mesh può aumentare la qualità del risultato.
 - o “*Cartesian Mesh with Voxelization*”, questa utilizza elementi cubici chiamati voxel.

In questo studio è stata utilizzata una mesh del tipo “*Layered Tetrahedral Mesh*” con valori di “*Build Element Size*” e “*Mesh Layer Height*” di 0.2 mm e con “*Base Element Size*” pari a 4 mm (Figura 44).

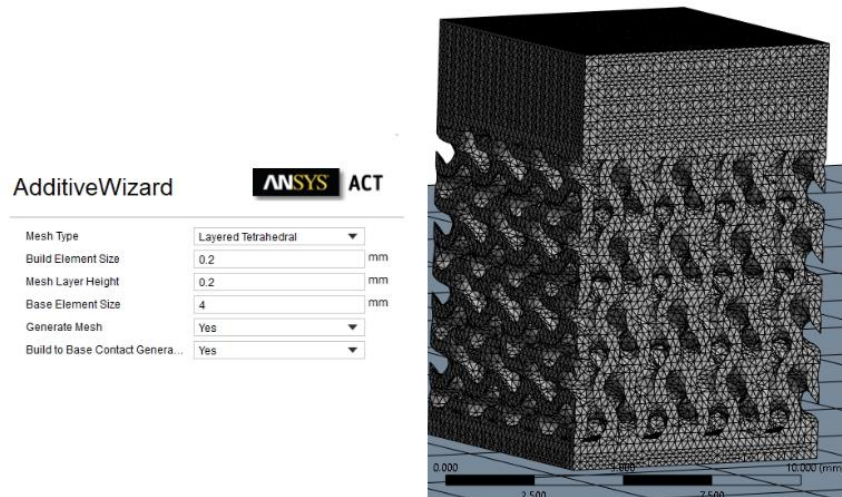


Figura 44 Scheda di impostazione dei parametri di mesh e mesh del provino

- Nel terzo step si imposta il materiale del componente, dei supporti, non presenti nel nostro caso, e del piatto di stampa. In questo caso sono stati selezionati, per la parte Inconel 718, mentre per la base acciaio AISI 316L, come riportato in Figura 45.



Figura 45 Scheda di impostazione del materiale

- Nel quarto step si impostano i parametri di processo e le condizioni al contorno termiche durante il processo di stampa e dopo, ovvero durante il raffreddamento. È possibile impostare anche trattamenti termici ulteriori, il distacco delle parti e l'eventuale rimozione di supporti. In questo caso i parametri di processo impostati sono riportati in Figura 46.

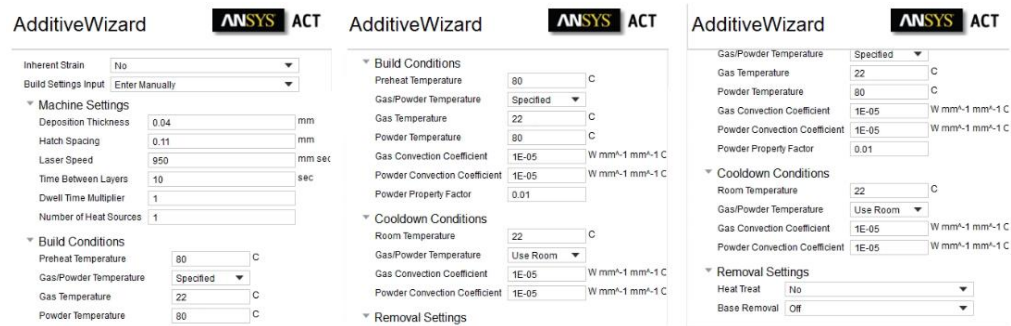


Figura 46 Scheda di impostazione dei parametri di processo

- Gli ultimi passaggi ci permettono di impostare i “Build Step” sulla geometria dal punto di vista meccanico e termico (Figura 47). In questo caso è stata impostata, per la superficie inferiore del piano di stampa, una temperatura di 80°C durante la stampa e raffredderà fino a temperatura ambiente di 22°C. Per l’analisi strutturale la stessa superficie è stata vincolata con condizioni di spostamento pari a zero.

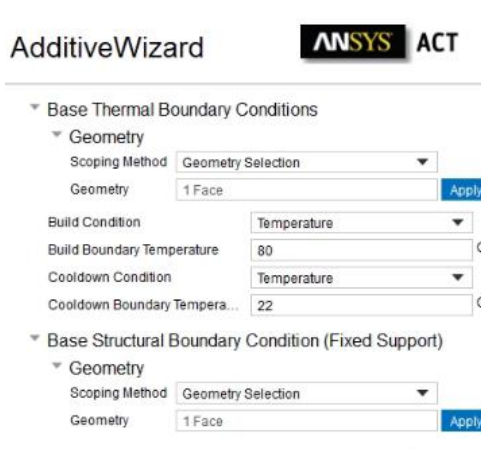


Figura 47 Scheda di impostazione delle condizioni al contorno

- A questo punto click sul tasto “Finish” ed i vari step vengono rappresentati nell’albero delle operazioni. Questi possono essere sempre modificati a seconda delle esigenze.
- Infine, tramite il comando “Solve” (Figura 48) si avvia la simulazione.

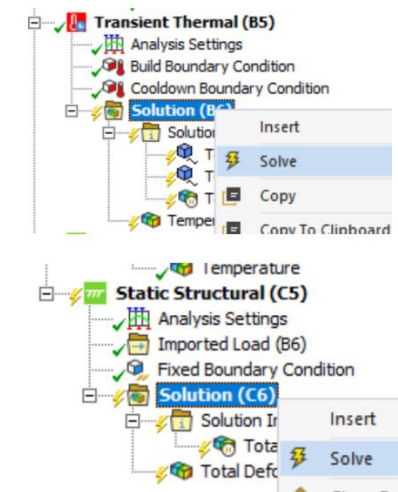


Figura 48 Comando Solve per avviare la simulazione

- L'utente può controllare l'andamento del transiente termico durante la simulazione o quando è completata. Una volta completata la simulazione l'utente può rivedere la storia termica sia durante la fase di stampa che durante il raffreddamento della parte. I risultati dipenderanno dal materiale utilizzato e dai parametri di processo. I risultati dell'analisi strutturale forniscono informazioni riguardanti le tensioni e le distorsioni che si generano durante il processo di stampa, raffreddamento e rimozione del componente dal piatto di costruzione.

4.3 Microscopio digitale Leica DVM6

Il microscopio digitale Leica DVM6 è uno strumento progettato che permette di effettuare imaging e misurazioni ad alta risoluzione. Essendo uno strumento molto versatile è utilizzato per osservare superfici di provini per l'analisi delle strutture dei materiali e l'ispezione di difetti o impurità, ma anche nel settore dell'elettronica per l'ispezione di circuiti stampati, microchip e altri componenti e nel settore medico, utile per osservare tessuti e cellule. Un'immagine del microscopio digitale è presente nella Figura 49.



Figura 49 Microscopio digitale (modello DVM6)

Tra le caratteristiche del DVM6 troviamo:

- **Immagini ad alta risoluzione.** Grazie al sensore di alta qualità, cattura immagini digitali ad elevata risoluzione del campione osservato tramite la fotocamera digitale integrata. Inoltre, supporta risoluzioni elevate, essendo quindi ideale per analisi di dettagli superficiali di strutture e materiali.
- **Zoom ottico e digitale.** Il DVM6 offre una vasta gamma di ingrandimenti, con uno zoom ottico fino a 16X e ulteriore ingrandimento digitale è ideale per raggiungere livelli molto alti di dettaglio. Questa ampia visuale permette di esaminare sia dettagli microscopici che campioni aventi dimensioni più grandi senza dover cambiare l'obiettivo.
- **Facilità d'uso.** Una delle caratteristiche più apprezzate è l'interfaccia utente intuitiva, ciò rende semplice il suo utilizzo. Lo strumento è controllabile tramite un software dedicato che permette l'acquisizione di immagini, fare misurazioni, confrontare dati e creare report.
- **Stativo motorizzato.** Il DVM6 è munito di un sistema di movimento motorizzato che consente lo spostamento in tutte le direzioni (assi X, Y e Z) per l'analisi dei campioni con precisione. Inoltre, è dotato di un tavolino di campionamento, spesso motorizzato anch'esso, che consente il movimento preciso del campione durante l'osservazione. Grazie a quest'ultimo si riesce ad esplorare il campione senza doverlo toccare direttamente, riducendo il rischio di danni o errori di misura.

- **Documentazione automatizzata.** Il microscopio consente di eseguire misurazione di lunghezza, di angoli e aree con elevata precisione. Inoltre, tramite il software di documentazione automaticamente si riescono a immagazzinare le immagini e i dati ricavati, facilitando la realizzazione di report dettagliati. Questo software consente di effettuare misurazioni precise di lunghezza, area, angoli e altre caratteristiche geometriche direttamente dall'immagine catturata. Inoltre, è possibile mappare in 3D il componente per analizzare superfici tridimensionali.
- **Illuminazione flessibile.** Lo strumento include un'illuminazione led regolabile utilizzata per illuminare il campione da varie angolazioni e con diversa intensità, migliorando la visuale di dettagli specifici.

Quindi, tra i vantaggi più importanti del DVM6 troviamo l'alta precisione per avere misurazioni dettagliate e affidabili, notevole risparmio di tempo grazie alla facilità d'uso e alle funzioni automatizzate e tramite il software di analisi si riescono ad ottenere documentazioni e report dettagliati.

Nel presente studio, il microscopio è stato utilizzato per confrontare il componente prodotto con il modello simulato. Sono state effettuate osservazioni del profilo del piatto superiore e misurazioni utilizzando il modello Leica DVM6 per valutare l'andamento e l'entità delle distorsioni lungo la direzione di crescita (direzione Z) causate dal processo di produzione.

5. RISULTATI E DISCUSSIONE

L'analisi dei risultati sarà articolata in due parti. La prima parte sarà dedicata all'esame dei valori di deformazione e stress ottenuti tramite le simulazioni e confrontati con le misurazioni effettuate con il microscopio digitale. La seconda parte consisterà in un confronto approfondito tra i dati ottenuti dalle simulazioni software e quelli rilevati sperimentalmente tramite il microscopio, al fine di valutarne la coerenza e le eventuali discrepanze. Sia per Ansys Workbench 2020 R1 che per Siemens NX, i valori di deformazione verranno valutati in tre fasi distinte del processo di stampa:

- Al termine della stampa;
- Al termine della fase di raffreddamento (“*Cooldown*”)
- Dopo la rimozione del provino dal piatto di stampa.

Verranno analizzate sia le deformazioni totali che direzionali, ossia lungo l'asse Z (direzione di stampa). Lo stress residuo sarà valutato esclusivamente al momento della rimozione del provino dal piatto di stampa.

5.1 Modello di simulazione L-PBF del provino: confronto tra Ansys e Siemens NX

In base a quanto esposto nel paragrafo precedente, l'analisi inizia con lo studio dei dati ottenuti da Ansys Workbench 2020 R1 e Siemens NX, focalizzandosi sulle deformazioni totali e su quelle direzionali, in particolare lungo l'asse Z, che corrisponde alla direzione di crescita del provino, con un'attenzione particolare alle deformazioni delle pareti laterali del componente. Nelle Figure 50 (a) e 51 (a) sono mostrati rispettivamente l'andamento della deformazione totale e quella direzionale (lungo l'asse z) rilevati al termine della fase di stampa utilizzando Ansys. Le Figure 50 (b) e 51 (b), invece, illustrano le deformazioni totali e direzionali ottenute tramite Siemens NX.

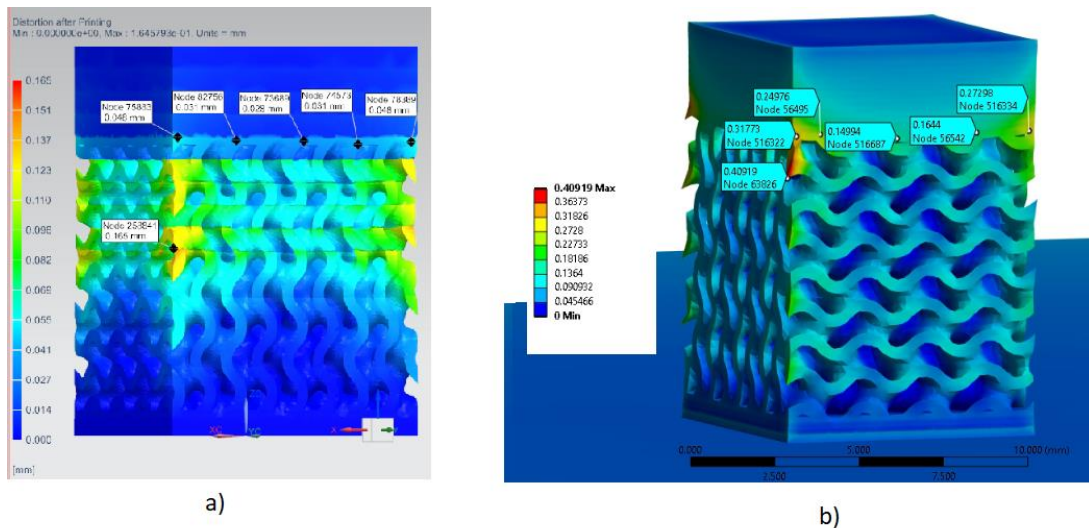


Figura 50 Deformazioni totali al termine della stampa: a) NX; b) Ansys

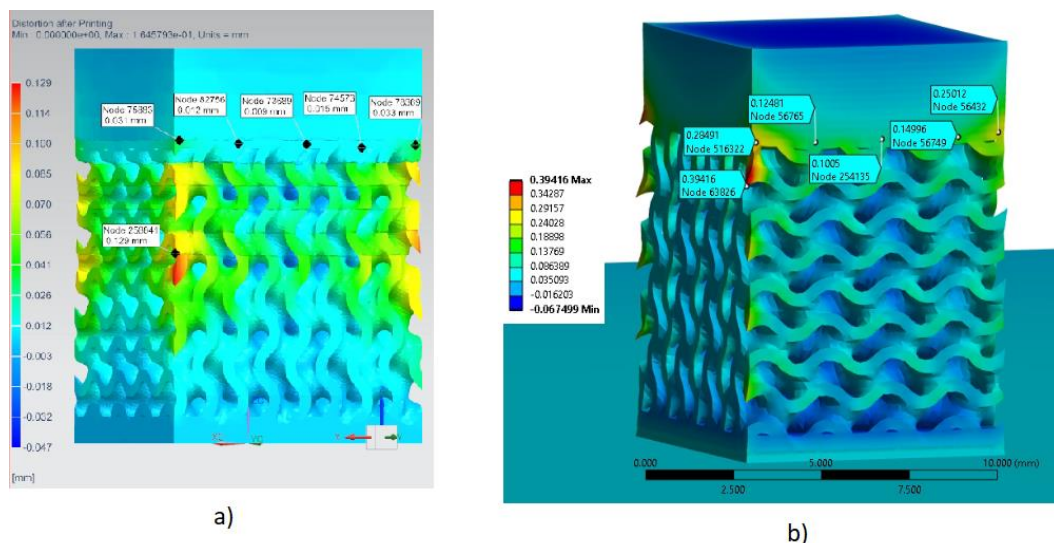


Figura 51 Deformazioni direzionali al termine della stampa: a) NX; b) Ansys

Come si può osservare dalle immagini nelle Figure 50 e 51, per Ansys il valore massimo della deformazione totale è di 0,41 mm, mentre per la deformazione direzionale (lungo l'asse Z) è di 0,39 mm. In Siemens NX, questi valori risultano inferiori: la deformazione totale raggiunge un massimo di 0,17 mm e quella direzionale un massimo di 0,13 mm. Confrontando i valori di deformazione totale e direzionale, possiamo concludere che la maggior parte delle deformazioni si verifica lungo la direzione di crescita del provino, ossia lungo l'asse Z. La massima deformazione si concentra principalmente ai bordi superiori del provino, in particolare all'interfaccia tra il reticolo e il piatto superiore. Nelle Figure 52 (a) e 53 (a) sono riportati rispettivamente l'andamento della deformazione totale

e di quella direzionale (lungo l'asse Z) rilevati al termine della fase di raffreddamento tramite Ansys. Le Figure 52 (b) e 53 (b) mostrano invece le deformazioni totali e direzionali ottenute utilizzando Siemens NX.

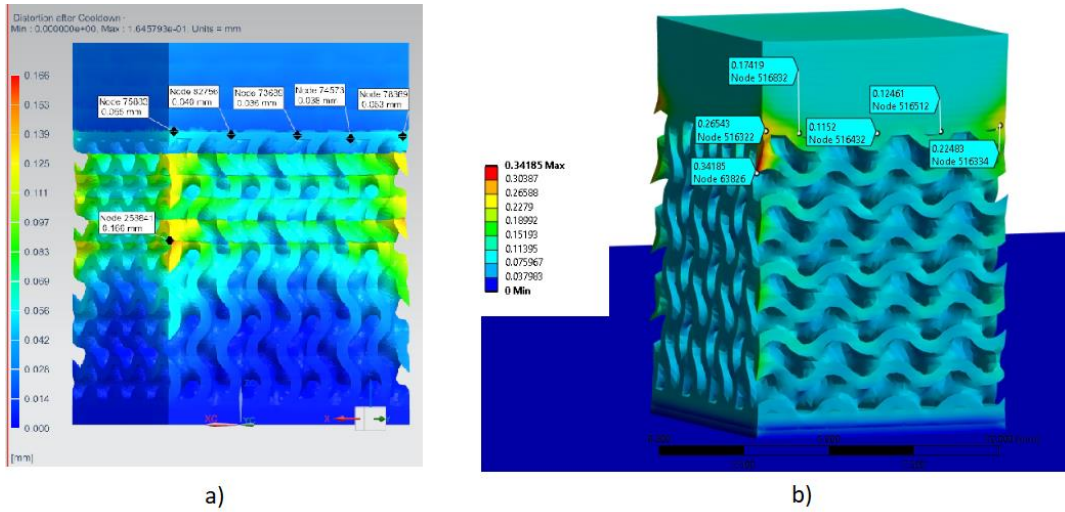


Figura 52 Deformazioni totali al termine del cooldown: a) NX; b) Ansys

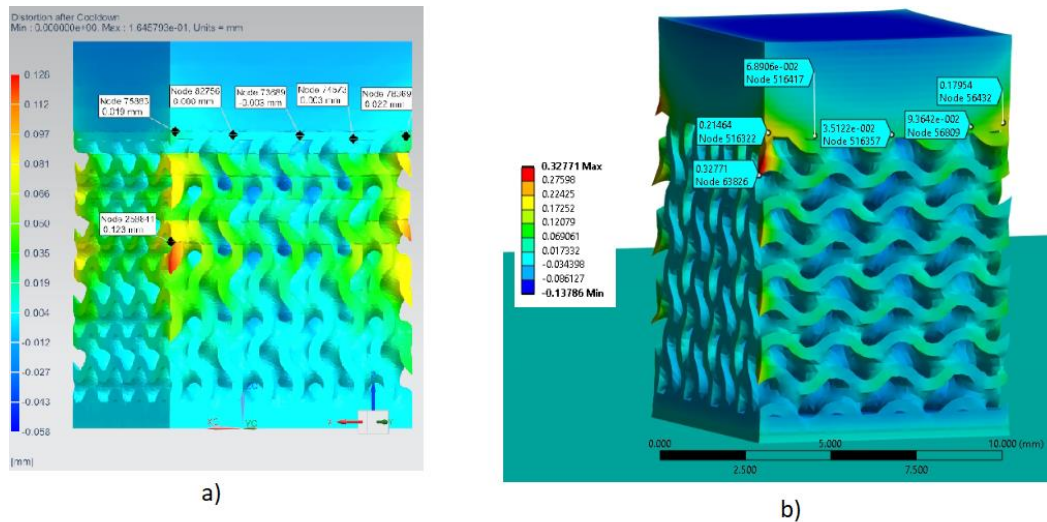


Figura 53 Deformazioni direzionali al termine del cooldown: a) NX; b) Ansys

Dalle immagini, per Ansys, notiamo che il valore massimo della deformazione totale è di 0,34 mm, mentre per quella direzionale è 0,33 mm. In NX possiamo ancora notare che i valori sono più bassi di Ansys, infatti, la deformazione totale raggiunge 0,17 mm, mentre quella direzionale 0,13 mm. In entrambi i software sono più basse rispetto alle precedenti. I valori massimi di deformazione li abbiamo sempre nei bordi citati precedentemente e la direzione principale è sempre lungo l'asse di stampa (asse Z).

Nelle Figure 54 e 55 vengono riportati i valori di deformazione massima totale e direzionale rilevati tramite Ansys e Siemens NX una volta rimosso il componente dalla piattaforma di costruzione.

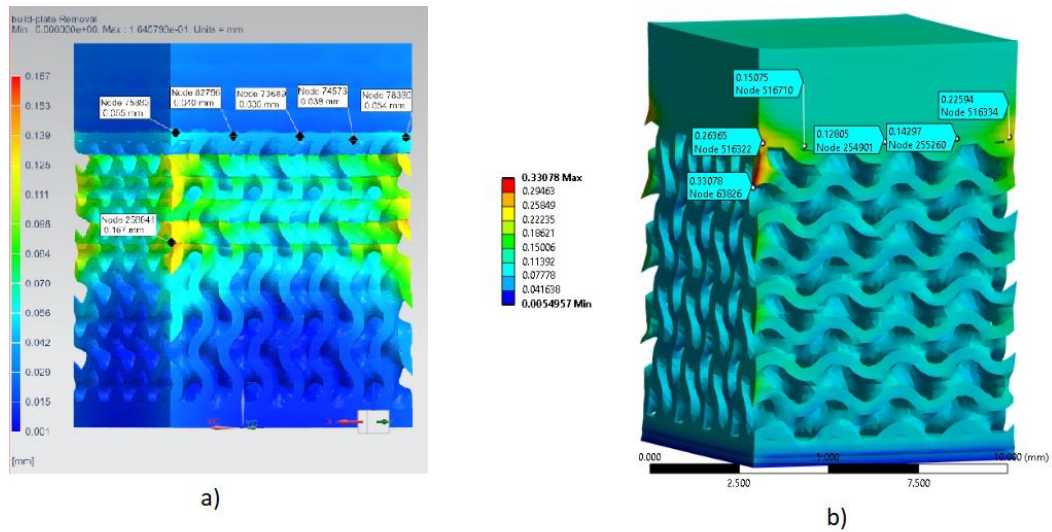


Figura 54 Deformazioni totali dopo la rimozione del provino: a) NX; b) Ansys

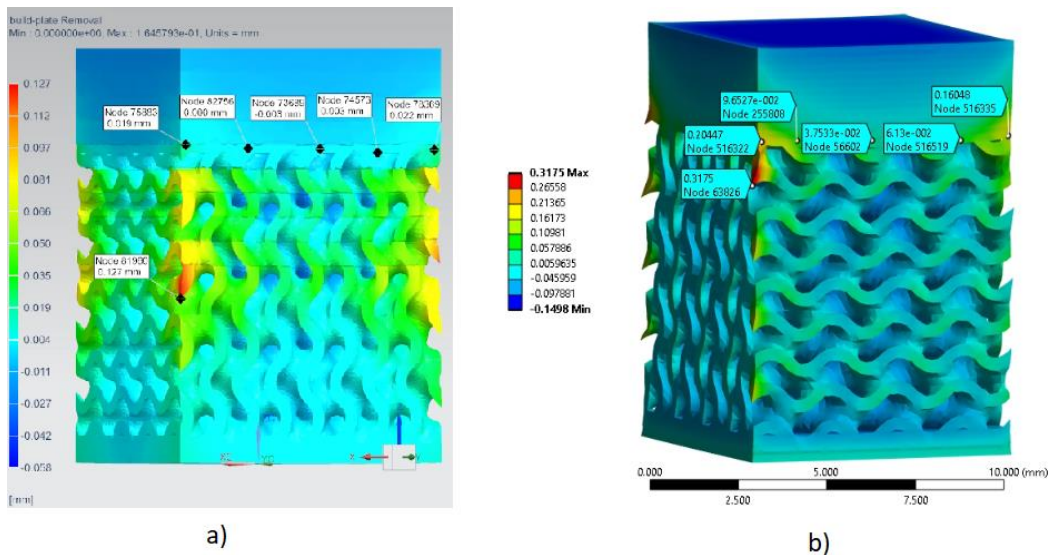


Figura 55 Deformazioni direzionali dopo la rimozione del provino: a) NX; b) Ansys

Anche in questo caso, osserviamo che, utilizzando Ansys, le deformazioni totali e quelle direzionali si riducono ulteriormente: le prime scendono a 0,33 mm, mentre le seconde si abbassano a 0,32 mm. Un comportamento simile si verifica in NX, dove le deformazioni totali raggiungono 0,17 mm, e quelle direzionali arrivano a 0,13 mm. Tuttavia, la riduzione è meno marcata rispetto al passaggio precedente, confermando la persistenza

dell'andamento delle deformazioni descritto in precedenza. Nelle Tabelle 3 e 4 sono presentati i valori massimi di deformazione totale e direzionale, ottenuti rispettivamente con Ansys e Siemens NX, al termine di ciascuna delle tre fasi del processo: stampa, raffreddamento e rimozione dal piatto di stampa.

Tabella 3 Deformazioni totali e direzionali Ansys

<i>Ansys</i>	<i>Stampa terminata</i>	<i>Dopo cooldown</i>	<i>Dopo rimozione</i>
Def. tot. [mm]	0,41	0,34	0,33
Def. lungo Z [mm]	0,39	0,33	0,32

Tabella 4 Deformazioni totali e direzionali NX

<i>NX</i>	<i>Stampa terminata</i>	<i>Dopo cooldown</i>	<i>Dopo rimozione</i>
Def. tot. [mm]	0,17	0,17	0,17
Def. lungo Z [mm]	0,13	0,13	0,13

Le cause di questo fenomeno, ovvero le elevate deformazioni nella zona di interfaccia tra il piatto superiore e il reticolo, sono principalmente due. La prima è legata al peso della piattaforma superiore, mentre la seconda riguarda il brusco cambiamento di sezione trasversale che avviene all'interfaccia tra il piatto e il reticolo durante il processo produttivo. Infatti, poiché il peso del piatto superiore è maggiore rispetto a quello del reticolo, si generano severe distorsioni. Questo effetto è particolarmente evidente ai bordi del provino, dove si trovano punti definiti come non autoportanti. Ad esempio, i punti di massima deformazione presentano un accumulo di deformazioni puntuali. Questo problema può essere facilmente risolto intervenendo sul modello CAD e rimuovendo quelle parti problematiche. Pertanto, poiché i punti non autoportanti possono essere eliminati, le deformazioni più affidabili da considerare sono quelle localizzate nelle restanti zone di interfaccia tra il piatto e il reticolo, Figure 50, 51, 52, 53, 54 e 55.

In generale, dalle simulazioni si notano due sostanziali differenze:

- Una riguarda il trend di deformazione, infatti, in NX l'ultimo layer non presenta deformazioni, mentre in Ansys sono presenti, Figura 56.

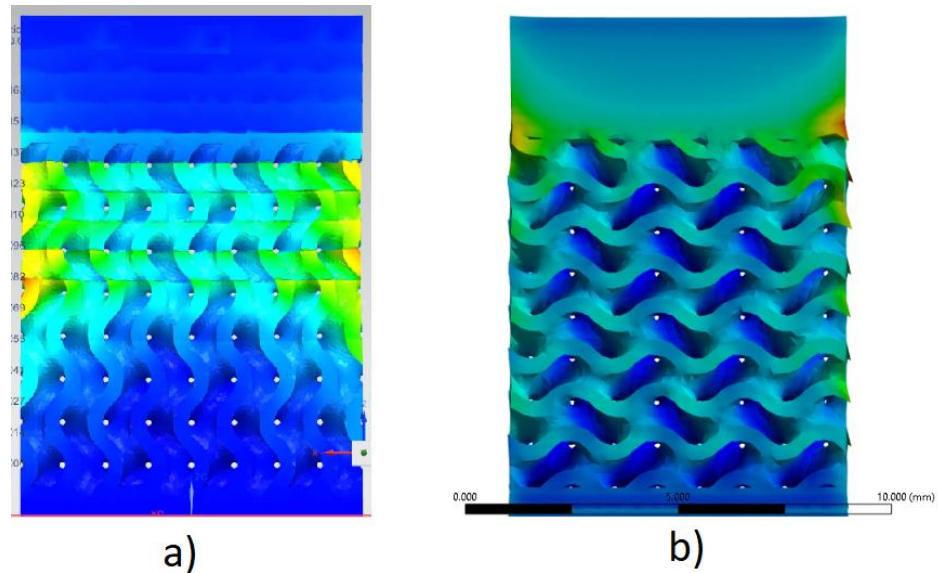


Figura 56 Differenze nel layer dell'interfaccia reticolo-piatto superiore: a) NX; b) Ansys

- La seconda riguarda i valori massimi delle deformazioni, infatti, la simulazione effettuata in NX restituisce valori sottostimati rispetto ad Ansys.

Questi risultati possono essere principalmente dovuti ai parametri di slicing non troppo spinti che sono stati assegnati alla simulazione. Ricordiamo che per NX il numero di layer termici è stato impostato a 16 e, nello slicing meccanico, lo “*Slice Thickness*” corrispondente è pari a 0,74 mm. Nella realtà, e nella simulazione in Ansys, il “*Deposition Thickness*” è pari a 0,04 mm, molto minore rispetto a quello impostato in NX. A causa di queste differenze, presenti in tutte le fasi di processo, la simulazione in NX perde di precisione e sottostima le deformazioni ciò indica che l’andamento di quest’ultime è più accurato in Ansys.

Di seguito (Figure 57 (a), (b) e (c) e 58 (a), (b) e (c)) vengono presentati sia l’andamento sia i valori di deformazione direzionale, misurati lungo l’asse Z con Ansys e Siemens NX, nelle vicinanze del piatto superiore nelle tre fasi del processo produttivo. Queste misurazioni sono state effettuate lungo il piano XY, perpendicolare alla direzione di stampa. Le deformazioni puntuali sono state effettuate in corrispondenza degli stessi punti individuati sulle immagini acquisite tramite il microscopio digitale, il cui confronto verrà riportato nella sezione successiva (capitolo 5.3).

Nelle Tabelle 5 e 6 sono riportati i valori di deformazione direzionale (lungo l'asse Z) ottenuti rispettivamente con Ansys e Siemens NX al termine della stampa, al termine del cooldown e dopo la rimozione del provino dal piatto di stampa.

Tabella 5 Deformazioni direzionali piatto superiore Ansys

<i>Ansys</i>	<i>Stampa terminata</i>	<i>Dopo cooldown</i>	<i>Dopo rimozione</i>
	Def. Z [mm]	Def. Z [mm]	Def. Z [mm]
Punto 1	0,008	- 0,070	- 0,085
Punto 2	- 0,035	- 0,115	- 0,128
Punto 3	- 0,040	- 0,118	- 0,131
Punto 4	- 0,040	- 0,115	- 0,124
Punto 5	0,008	- 0,070	- 0,080

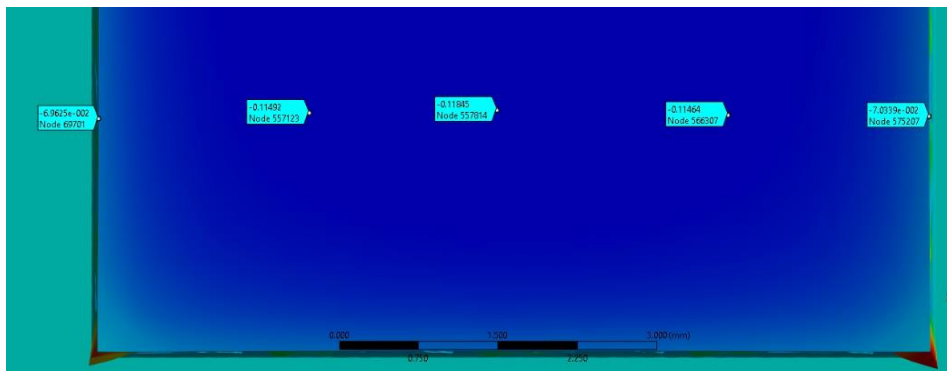
Tabella 6 Deformazioni direzionali piatto superiore NX

<i>NX</i>	<i>Stampa terminata</i>	<i>Dopo cooldown</i>	<i>Dopo rimozione</i>
	Def. Z [mm]	Def. Z [mm]	Def. Z [mm]
Punto 1	0,001	- 0,020	- 0,019
Punto 2	- 0,001	- 0,022	- 0,022
Punto 3	- 0,002	- 0,023	- 0,023
Punto 4	- 0,002	- 0,023	- 0,022
Punto 5	0,000	- 0,020	- 0,020

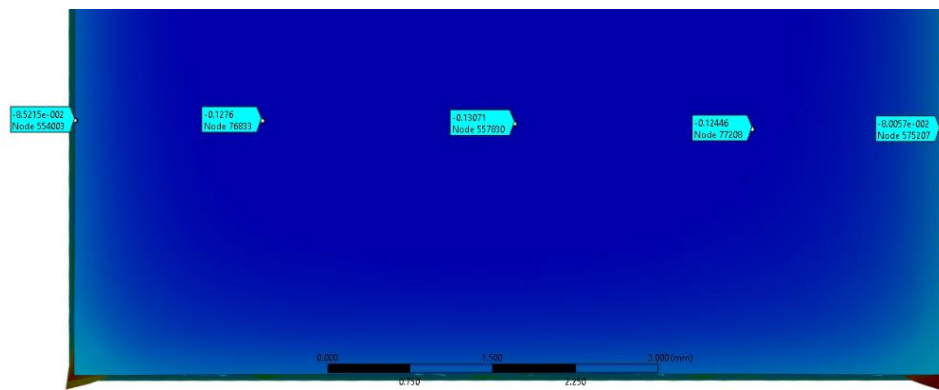
Come si può vedere nelle Figure 57 (a), (b) e (c) e 58 (a), (b) e (c), in tutte le fasi del processo di stampa, ovvero terminata la stampa, terminato il cooldown e rimosso il provino dalla base di costruzione, si osserva una leggera curvatura del piatto verso la direzione Z negativa, risultando in una compressione della superficie superiore. Dall'area centrale verso i bordi del piatto si verifica un'inversione di tendenza nei valori di deformazione. Questo inarcamento, chiamato “*Warping*”, si accentua nel passaggio da una fase all'altra della stampa. Nelle Figure 57 (a), (b) e (c) e 58 (a), (b) e (c) sono riportati i valori di deformazione direzionale misurati sul modello simulato con Ansys e Siemens NX in prossimità del piano XY del piatto superiore durante le tre fasi del processo.



a)

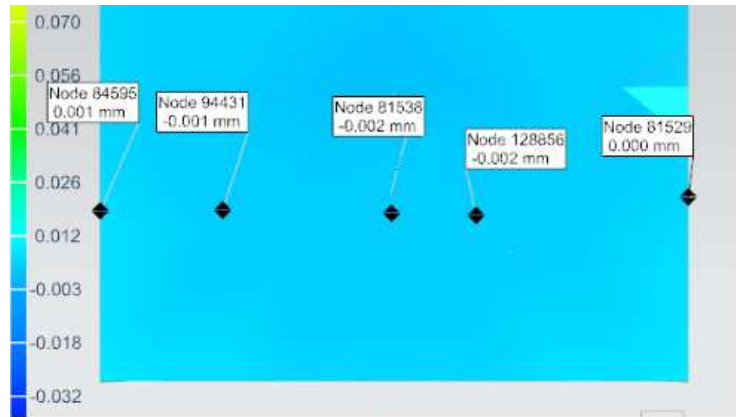


b)

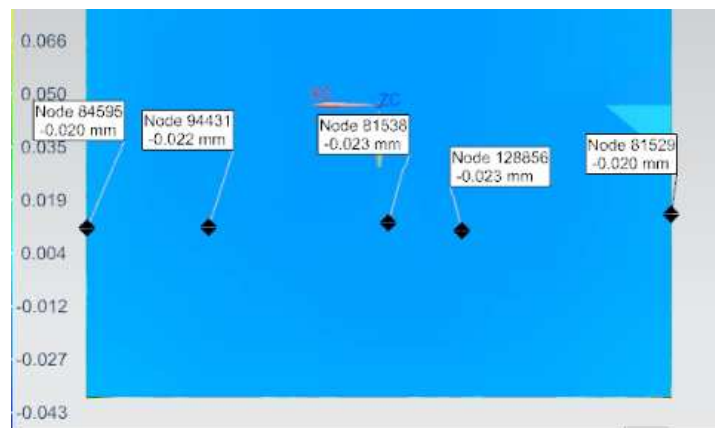


c)

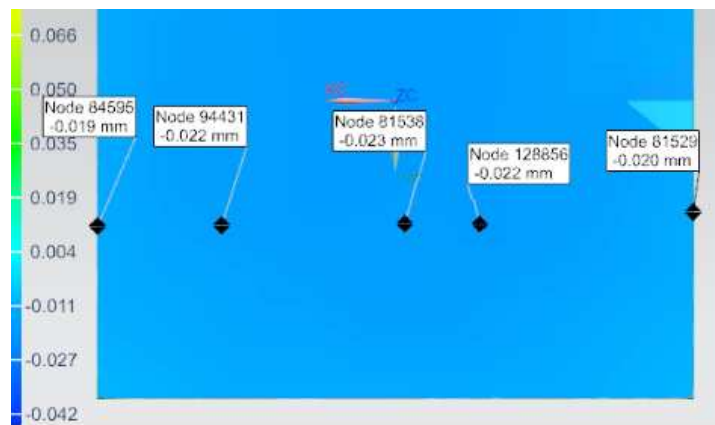
Figura 57 Deformazioni direzionali piatto superiore in Ansys: a) al termine della stampa; b) al termine del cooldown; c) rimosso il provino dal piatto di stampa



a)



b)



c)

Figura 58 Deformazioni direzionali piatto superiore in NX: a) al termine della stampa; b) al termine del cooldown; c) rimosso il provino dal piatto di stampa

Oltre alle immagini precedenti è possibile evidenziare questo andamento nel piano YZ, come riportato nella seguente immagine (Figura 59, 60).

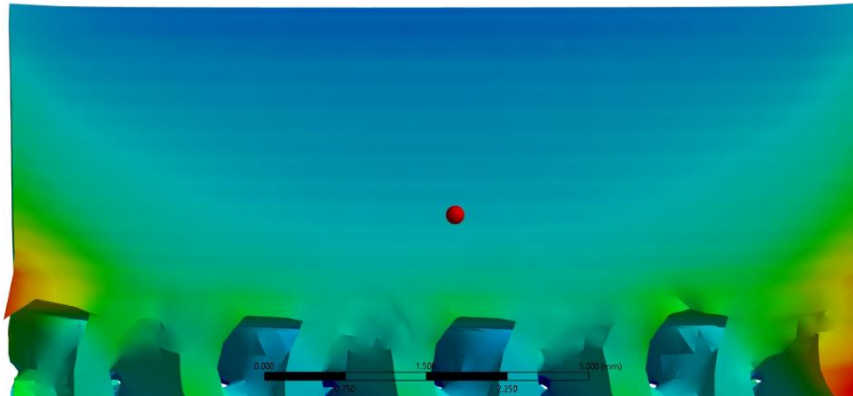


Figura 59 Deformazioni direzionali in Ansys lungo il piano YZ del provino una volta rimosso dal piatto di stampa

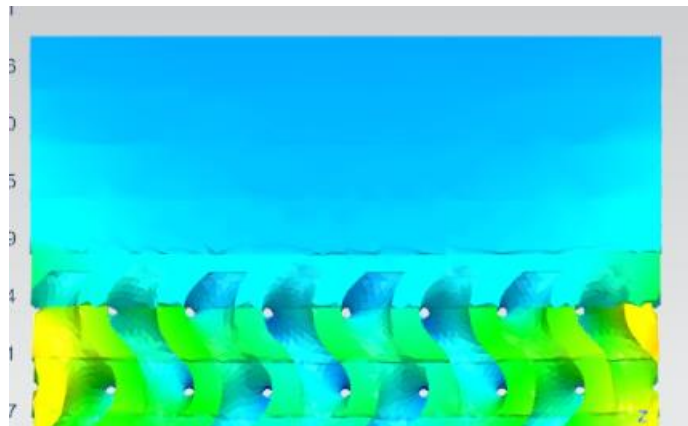


Figura 60 Deformazioni direzionali in NX lungo il piano YZ del provino una volta rimosso dal piatto di stampa

Il valore massimo dello stress raggiunto dopo la rimozione del campione dal piatto di stampa è intorno ai 2000 MPa e si trova nell'area di interfaccia tra la struttura reticolare ed il piatto superiore, identificato dal valore numerico come illustrato nella Figura 61.

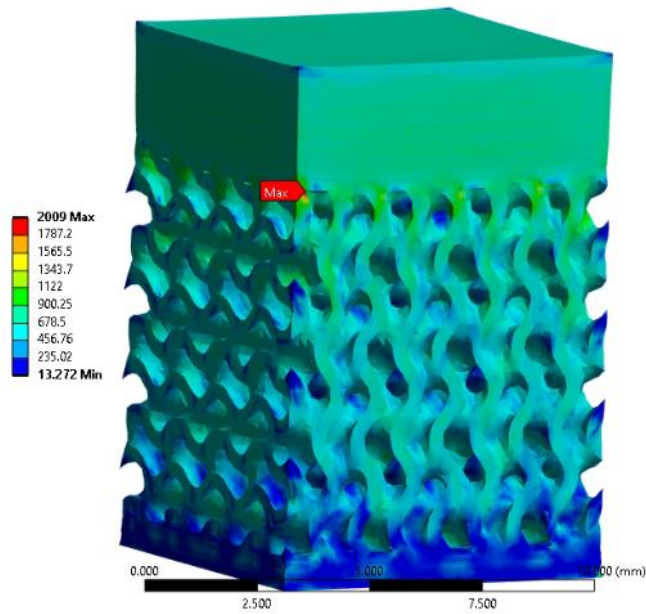
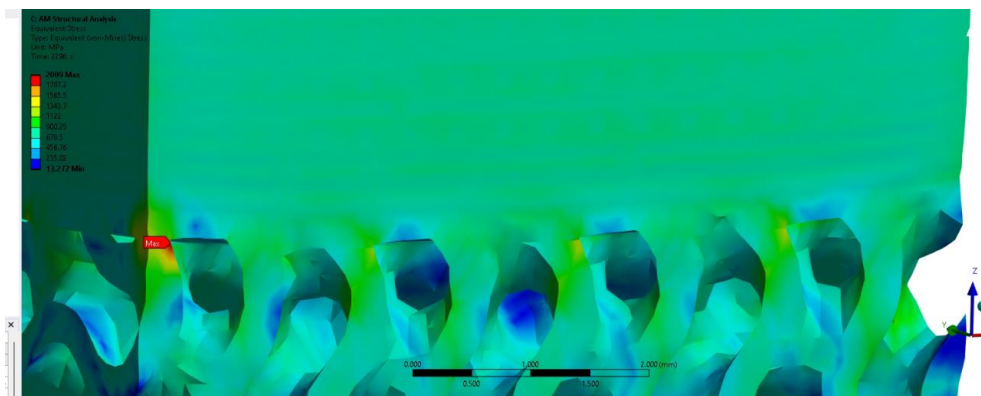
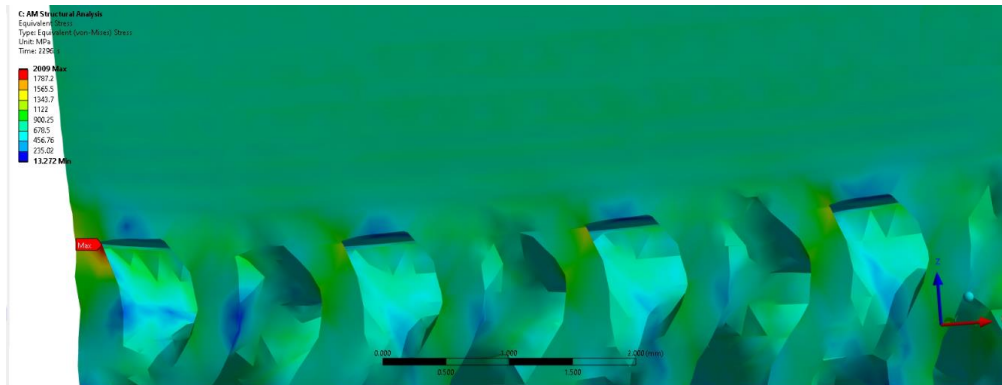


Figura 61 Andamento stress di Von Mises

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti il limite di snervamento dell'Inconel 718 è di circa 1000 MPa, quindi, il valore ricavato dalle simulazioni supera notevolmente il limite del materiale. Questo indicherebbe che, una volta rimosso il provino dal piatto di stampa, si genererebbero delle deformazioni plastiche permanenti, con possibile formazione di cricche. Il valore massimo riportato nel modello simulato in Ansys non è però affidabile, in quanto analizzando il provino reale non sono presenti tali deformazioni, e inoltre, osservando la simulazione è possibile vedere che il picco di stress si genera in un punto in cui è presente uno spigolo vivo all'interfaccia reticolo-piatto superiore, Figure 62 (a) e (b).



a)



b)

Figura 62 Punto di stress massimo nel provino a) e b)

Questi punti sono chiamati “*artefatti*” di simulazione, ovvero sono dei punti che non sono ben rappresentati dalla Mesh. Quest’ultima, infatti, in funzione dei parametri assegnategli, potrebbe avere errori. Quelli principali sono i triangoli mancanti che generano spigoli vivi che non vanno a rappresentare perfettamente l’elemento del provino, come ad esempio le curvature, dove si generano accumuli di tensione che nella realtà non sono presenti.

I punti più affidabili, e quindi da tenere in considerazione, sono quelli all’interfaccia reticolo-piatto superiore, dove si generano le tensioni maggiori (Figura 63).

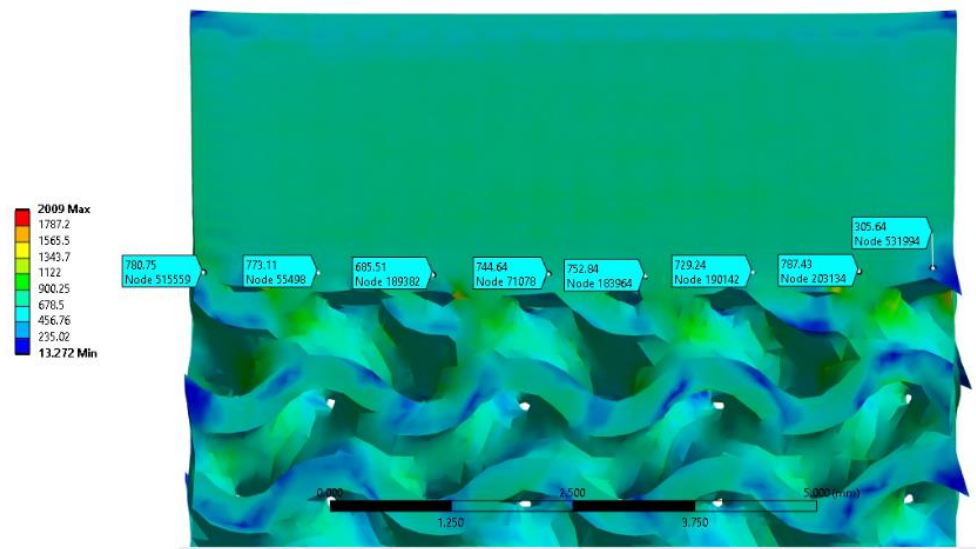


Figura 63 Tensioni all'interfaccia piatto superiore - reticolo

Possiamo osservare che il valore massimo raggiunto, in questi punti, è di circa 800 MPa, che è al di sotto del limite di snervamento del materiale.

Le simulazioni, quindi, risultano fondamentali per prevedere e, successivamente, intervenire sul modello CAD per apportare eventuali modifiche in corrispondenza delle zone che presentano maggiori criticità in termini di distorsioni e stress residui.

5.2 Microscopio digitale

Come noto in letteratura, durante il processo di solidificazione i materiali metallici subiscono l'effetto del ritiro volumetrico, ovvero il materiale tende a contrarsi generando deformazioni residue. Il grado di restringimento dipende da vari fattori, tuttavia uno dei principali è la variazione termica a cui è sottoposto il componente. In generale durante il processo L-PBF, la sorgente di energia (laser), per garantire la fusione completa della polvere metallica, genera un'elevata intensità di calore. Poiché il laser fonde strati sottili di polvere, le sollecitazioni termiche a cui è sottoposto lo strato fuso sono rapido riscaldamento seguito da rapido raffreddamento. Proprio per queste motivazioni, e come descritto nei paragrafi precedenti, le deformazioni non sono presenti unicamente lungo le pareti laterali, ma anche il piatto superiore si deforma a seguito del processo di stampa. Questa contrazione è chiamata "Warping" ed è causata dalle sollecitazioni termiche appena descritte.

In questo studio, tramite l'utilizzo di un microscopio digitale, è stata misurata l'entità della contrazione del piatto superiore del provino (Figure 64, 65, 66). Le misurazioni sono state eseguite dopo la rimozione dal piatto di stampa.

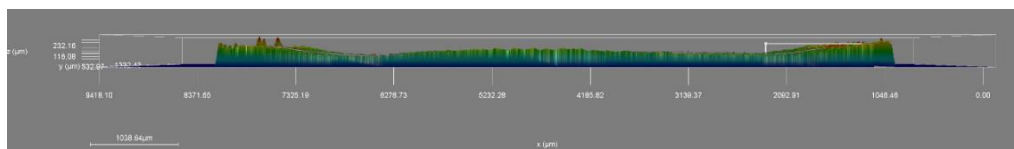
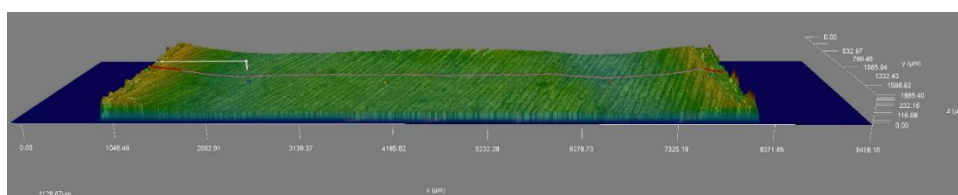


Figura 64 Vista laterale del profilo del piatto superiore realizzato tramite microscopio digitale



Type	Value	Unit	Plot
Medio	148,82	μm	<input checked="" type="checkbox"/>
Dev standard	19,30	μm	<input type="checkbox"/>
Minimo	109,17	μm	<input type="checkbox"/>
Massimo	222,22	μm	<input type="checkbox"/>
Angolo	0,02	$^{\circ}$	<input type="checkbox"/>
Raggio	26.384,43	μm	<input type="checkbox"/>
Avvio	397,71	μm	<input type="checkbox"/>
Fine	6.865,85	μm	<input type="checkbox"/>

Figura 66 Valori di deformazione: medio, deviazione standard, minimo, massimo

Come si nota dalle immagini, il piatto superiore tende ad inarcarsi a causa delle problematiche descritte precedentemente. L'andamento del profilo evidenzia la presenza di deformazioni negative, quindi compressione, al centro del piatto ed un'inversione di tendenza, quindi trazione, ai bordi. Oltre al grafico presente nelle immagini, le altezze dei punti del piatto sono state normalizzate rispetto al valore minimo, ossia 0,11 mm. Questo è stato fatto per ottenere un grafico (Figura 67) in cui l'origine degli assi, ovvero lo zero, fosse l'altezza minima misurata rappresentativa dell'andamento del profilo.

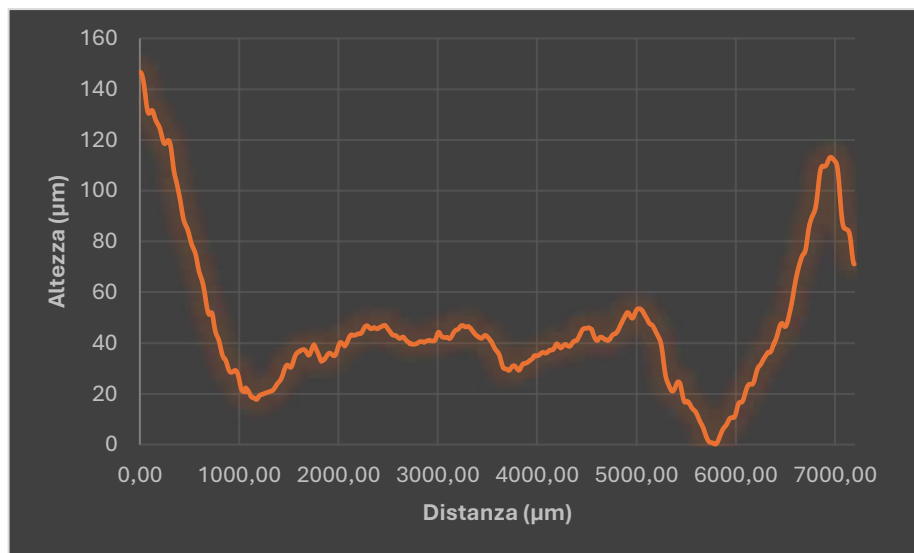


Figura 67 Grafico del profilo del piatto superiore normalizzato rispetto a 109 μm

Successivamente sono state identificate le altezze di cinque punti del piatto (in prossimità del piano XY) con il fine di confrontare le misurazioni effettuate tramite il microscopio digitale e i software di simulazione, come si può osservare nella Figura 68.

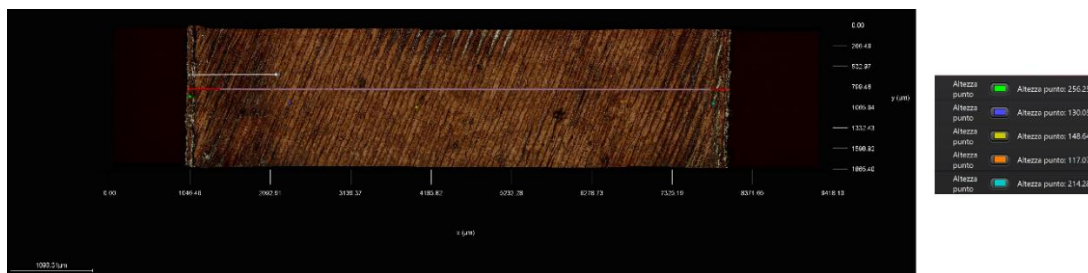


Figura 68 Selezione dei punti sul profilo del piatto superiore

5.3 Confronto tra modello FEM e modello reale

L'ultimo confronto da eseguire riguarda il piatto superiore del provino. In questo caso si mettono a paragone i valori di deformazione dei due software con quelli ricavati tramite il microscopio digitale. Rispetto a quanto fatto con il precedente confronto, in questo caso la comparazione dei dati viene eseguita considerando solo le deformazioni direzionali e rimosso il provino dal piatto di stampa.

Per il confronto si deve utilizzare un approccio diverso rispetto a quanto visto nell'analisi con il microscopio digitale, in quanto, tramite i software si riescono a misurare solo le deformazioni puntuali del piatto superiore. Per questo motivo, tramite lo strumento, sono state misurate le altezze di cinque punti del piatto (Figura 68) e fissando un'altezza di riferimento si individua lo scostamento presente tra il riferimento e il punto scelto. Come punto zero è stata scelta l'altezza più elevata ricavata dal microscopio digitale, ovvero 0,256 mm. Nella Tabella 7 si riportano i valori calcolati.

Tabella 7 Valori normalizzati del piatto superiore rispetto a 0,256 mm

	<i>Valori normalizzati [mm]</i>
Punto 1	0
Punto 2	-0,13
Punto 3	-0,11
Punto 4	-0,14
Punto 5	-0,04

Normalizzati i dati, è possibile fare un confronto tra il microscopio digitale, Ansys e NX. Nella Tabella 8 vengono riportati i valori di deformazione.

Tabella 8 Confronto tra Microscopio digitale, Ansys, NX

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Microscopio	0	-0,13	-0,11	-0,14	-0,04
Ansys	- 0,09	- 0,13	- 0,13	- 0,12	- 0,08
NX	- 0,02	- 0,02	- 0,02	- 0,02	- 0,02

Come si può notare dalla tabella entrambi i software rappresentano il “*Warping*” del piatto superiore. La differenza sostanziale tra Ansys e NX sta nei valori ricavati, in quanto, Ansys riproduce più fedelmente rispetto a NX la compressione del piatto. Quindi, come visto in precedenza, anche in questo caso NX sottostima le deformazioni presenti. Anche in questo caso la causa principale di queste differenze la si può trovare nello scarso grado di risoluzione ottenuto in seguito alla fase di meshing della geometria e allo slicing termico e meccanico. Come descritto nei capitoli precedenti, in Ansys, i parametri di simulazione (mesh e slicing) sono più dettagliati rispetto a NX, per questo motivo le simulazioni sono più precise. L’ottenimento di soluzioni più accurate, però, si scontra con la richiesta di tempo di risoluzione della simulazione, che in Ansys è più elevata rispetto a NX.

Un’ulteriore considerazione da fare riguarda il valore massimo di compressione raggiunto. L’altezza minima misurata dal microscopio digitale è pari a 0,11 mm, che normalizzata rispetto al punto zero fissato precedentemente fornisce un valore di deformazione pari a -0,15 mm. Confrontandolo con Ansys e NX si nota che entrambi i software restituiscono valori sottostimati rispetto a quello reale, come riportato nella Tabella 9.

Tabella 9 Confronto tra i valori massimi di deformazione microscopio digitale, Ansys, NX

	Valori massimi
Microscopio digitale	- 0,15
Ansys	- 0,13
NX	- 0,02

6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state effettuate simulazioni tramite i software Siemens NX e Ansys Workbench 2020 R1 per prevedere le deformazioni e gli stress che potrebbero insorgere durante la stampa di una struttura reticolare TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) con cella di tipo Gyroid, utilizzando il processo di Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Le simulazioni sono state confrontate con misurazioni reali delle deformazioni del provino ottenute tramite un microscopio digitale, con l'obiettivo di confrontare il modello virtuale con la geometria effettivamente stampata. Sono state analizzate le distorsioni riscontrate al termine del processo di stampa, dopo la rimozione del componente dalla piattaforma di costruzione.

Nonostante i risultati ottenuti con Ansys siano affidabili in termini di distorsioni rispetto ai valori misurati sul provino reale, i tempi di simulazione per componenti complessi, specialmente di grandi dimensioni e con geometrie intricate come le strutture reticolari, risultano essere estremamente lunghi. Per garantire una simulazione accurata, è necessario generare una mesh molto dettagliata, in grado di adattarsi perfettamente alla geometria di parti sottili come le strut reticolari, evitando difetti che potrebbero compromettere la validità dei risultati. Tuttavia, questo comporta la creazione di un numero elevato di nodi ed elementi di mesh, il che prolunga notevolmente i tempi di calcolo. In alcuni casi, il livello di dettaglio richiesto è così elevato da rendere difficile la convergenza della simulazione, richiedendo l'uso di workstation molto potenti, risorse di cui anche molte aziende spesso non dispongono. Il confronto viene effettuato anche per il modello simulato in Siemens NX. In questo caso, i valori di deformazione lungo l'asse Z misurati in alcuni punti del piatto nel modello virtuale non coincidono con quelli della geometria reale, poiché il software tende a sottostimare l'entità delle deformazioni. Tuttavia, considerando che Siemens NX utilizza un metodo di simulazione basato sull'analisi IS, meno complesso rispetto all'analisi termo-meccanica impiegata in Ansys, i tempi di calcolo risultano significativamente ridotti. Nonostante ciò, questo approccio produce risultati meno accurati rispetto ad Ansys, soprattutto quando non si ottimizzano adeguatamente i parametri di slicing e meshing per soddisfare le esigenze progettuali.

7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] B. Laxmikant e B. Pragathi, «Additive manufacturing technology in mechanical engineering,» 2023.
- [2] M. Miky, «Stampa 3D–Tecniche di additive manufacturing,» *Maker Miky*, 2020.
- [3] N. Sushant, D. Suresh e K. S. Rajesh, «Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: a review,» *Journal of manufacturing technology research*, 2013.
- [4] B. Insaf, R. Mickael, R. Ahmed, S. Ali e E. Abdelilah, «Additive manufacturing technology: the status, applications and prospects,» *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2018.
- [5] I. H. Md., S. K. Md., K. K. Imrul, R. H. Khan, H. Yanzhao e W. Xiaolong, «Technology of additive manufacturing: a comprehensive review,» *Kufa journal of engineering*, 2023.
- [6] A. Mark, M. Hamid e N. Nida, «An overview of modern metal additive manufacturing technology,» *Journal of manufacturing process*, 2022.
- [7] A. Hussein e F. Peter, «Using finite element analysis in the 3D printing of metals,» *Hungarian journal of industry and chemistry*, 2021.
- [8] T. Mohaddeseh, A. Sara, S. R. J. Nazanin, R. E. H. Seyed, B. P. Antonio, A. O. F. Fabio, F. Mojtataba, C. Chao e H. Yuanming, «A review of the metal additive manufacturing process,» *Materials*, 2023.
- [9] B. Admit e B. Susmita, *Additive Manufacturing*, 2016.
- [10] S. Nicola, «Studio e simulazione di strutture reticolari da impiegare come supporti in processi di fusione a letto di polvere,» 2022.
- [11] C. Shaun, A. Keivan, W. Stephanie e H. Rodney, «Metal additive manufacturing: technology, metallurgy and modelling,» *Journal of manufacturing process*, 2020.
- [12] L. Angelo, «Trattamenti termici di una superlega Ni-Fe: Inconel 718,» *Close-up engineering*, 2021.
- [13] M. Roberto, «Riduzione degli stress residui per Inconel 718 prodotto mediante selective laser melting: relazione tra la temperatura del trattamento termico, la microstruttura e la riduzione degli stress residui,» 2020.
- [14] G. M., G. E., N. S., P. F. e Z. G., «Sensibilità all'intaglio- prove meccaniche in Inconel 718,» 2000.

- [15] P. Bruno, «Inconel 718: proprietà, applicazioni e lavorazione del super materiale,» *Pauletta Bruno blog*, 2024.
- [16] L. D. M. Riccrdi, «Simulazione del processo di L-PBF attraverso siemens NX,» 2021.
- [17] C. P. Juan, A. Jon, C. T. Mari, R. Noelia e P. R. Pedro, «Analysis of microstructures and mechanical properties in as-built/as-cast and heat-treated conditions for IN718 alloy obtained by selective laser melting and investment casting process,» *Crystals*, 2021.
- [18] S. Stefano, «Caratterizzazione di strutture cellulari in matrice polimerica per processi additivi,» 2019.
- [19] C. Edoardo, «Caratterizzazione di strutture reticolari in Inconel 718 realizzate tramite additive manufacturing,» 2021.
- [20] M. Tobias, L. Martin, L. Bill, Z. Xuexhe, Q. Ma, F. OMAR e B. Milan, «Slm lattice structures: properties, performance, applications and challengies,» *Materials and design*, 2019.
- [21] G. Giorgio, «Strutture reticolari realizzate via additive manufacturing per il lightweighting,» 2021.
- [22] A.-K. Oraib e K. A. A.-R. Rashid, «Multifunctional mechanical-metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices: a review,» *Advanced engineering materials*, 2019.
- [23] Y. Li, D. Songlin e W. Cuie, «Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: a review,» *Bioactive materials*, 2019.
- [24] B. Tess, «Understand the gyroid infill in eD printing,» *Wwlover*, 2024.
- [25] R. d. Biblus, «Analisi Fem: cos'è il metodo agli elementi finiti,» *Biblus*, 2023.
- [26] A. A. Popovich, V. S. Sufiarov, I. A. Polozov e E. V. Borisov, «Microstructures and mechanical properties of Inconel 718 produced by slm and subsequent heat treatment,» *Key engineering materials*, 2015.
- [27] S. Tech, «Come funziona l'analisi Fem e a cosa serve,» *Symbio tech blog*.