



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**TECNICHE DI PROTOTIPAZIONE VIRTUALE PER
LA GENERAZIONE E SIMULAZIONE DI
STRUTTURE DI SUPPORTO NELLA
PROGETTAZIONE ADDITIVA**

**VIRTUAL PROTOTYPING TECHNIQUES FOR THE
GENERATION AND SIMULATION OF SUPPORT
STRUCTURES IN ADDITIVE DESIGN**

Relatore:

Prof. Michele Germani

Tesi di laurea di:

Lorenzo Tobia

Correlatori:

Prof. Marco Mandolini

Prof. Paolo Cicconi

Anno accademico 2020-2021

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
1. ADDITIVE MANUFACTURING- STATO DELL'ARTE	2
1.1. Generalità sul ciclo di produzione per AM	2
1.2. Vantaggi della tecnologia AM	3
1.3. Svantaggi AM	4
1.4. Campi di utilizzo delle tecnologie AM	5
1.5. Classificazione dei processi AM.....	6
1.6. Tecnologie per Additive Manufacturing in ambito metallico	7
1.6.1. Powder Bed Fusion	8
1.6.1.1. Selective Laser Melting (SLM).....	8
1.6.1.2. Parametri di processo per la tecnologia SLM	10
1.7. Trattamenti post processing	11
1.8. Materiali utilizzati per la stampa di metalli	13
1.8.1. INCONEL 718: caratteristiche meccaniche e termiche	14
2. SUPPORTI.....	15
2.1. Strutture di supporto nella tecnologia SLM	15
2.2. Strutture reticolari per supporti volumetrici di tipo lattice.....	16
2.2.1. Strut-Based.....	16
2.2.2. TPMS (<i>Triply Periodic Minimal Surfaces</i>).....	18
2.2.2.1. Gyroid	19
2.3. Supporti a superficie	20
2.4. Software per la generazione e l'analisi delle strutture di supporto	22
3. WORKFLOW	24
3.1. nTopology: generazione di supporti volumetrici di tipo TPMS	25
3.1.1. Import della geometria.....	25
3.1.2. Creazione del "Manufacturing Support Volume"	26
3.1.3. Generazione dei supporti TPMS	27
3.1.4. Creazione delle mesh per l'esportazione nel software di simulazione.....	28
3.2 Ansys Space Claim: generazione di supporti a superficie	29
3.2.1. Creazione del Build Volume.....	29
3.2.2. Orientamento della componente sul piatto di stampa	31
3.2.3. Creazione e individuazione delle regioni che necessitano di supporto	33
3.2.4. Generazione dei supporti a superficie	34

3.3. Ansys Additive Print: import e parametri per la simulazione	38
3.3.1. Import delle componenti	39
3.3.2. Parametri di Inputs per la simulazione di stampa	39
3.3.3. Parametri di output della simulazione.....	41
4. CASO STUDIO	43
4.1. Geometria.....	43
4.1.1. Applicazione di supporti Gyroid alla geometria	44
4.1.2. Applicazione di supporti a superficie alla geometria	45
4.2. Parametri di processo utilizzati per la stampa.....	45
4.3. Analisi dei risultati della simulazione di stampa e verifica requisiti di stampabilità.....	46
4.3.1. Analisi delle deformazioni durante il processo di stampa	47
4.3.2. Analisi delle possibili collisioni con il re-coating roller	50
4.3.3. Analisi delle tensioni equivalenti di Von-Mises durante la fase di stampa	52
4.4. Confronto tra i risultati ottenuti per le due tipologie di supporto analizzate.....	55
CONCLUSIONE	58
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	60
RINGRAZIAMENTI.....	61

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo la verifica della stampabilità in additive manufacturing di una girante per compressore centrifugo realizzata in INCONEL718. Nello specifico, il processo utilizzato in questo studio prende il nome di Selective Laser Melting (nota anche come Laser Powder Bed Fusion, L-PBF), che consiste nella microfusione selettiva, tramite un fascio laser, di un letto di polvere metallica a granulometria controllata in modo da realizzare sottili strati di metallo fuso/solidificato sovrapposti.

Le fasi dell'attività svolta comprendono:

- l'individuazione della strategia di supporto (all'interno dei canali della girante) più adatta a ridurre le deformazioni del componente durante e al termine del processo di stampa, in modo da evitare il collasso della superficie superiore del vano della girante;
- lo studio e il confronto di strutture di supporto di tipo lattice ed a superficie;
- l'analisi qualitativa, tramite la valutazione dei risultati forniti delle simulazioni FEM, dell'effettiva stampabilità del componente, assicurandosi che il job non impatti con il recoater durante la fase di stampa.

Il primo passo è stato quello di andare a studiare le varie tecnologie di additive manufacturing, in particolare per il caso studio trattato in questa tesi si è deciso di utilizzare il processo di "Selective Laser Melting".

Il secondo step è stato quello di andare ad analizzare le caratteristiche e la morfologia dei vari supporti presi in considerazione, in particolar modo si sono analizzati:

- supporti volumetrici di tipo *lattice* (generati dalla ripetizione nello spazio di una cella elementare);
- supporti a *superficie*.

Le strutture di supporto risultano di fondamentale importanza nei processi di additive, inoltre l'individuazione della miglior strategia di supporto permette di avere consistenti risparmi sui materiali impiegati.

Lo studio per quanto riguarda i supporti di tipo lattice è stato proseguito e realizzato utilizzando il software "*nTopology*", dove si sono presi in considerazione alcuni tipi di celle elementari e poi applicate al volume del caso studio; mentre per quanto riguarda i supporti a superficie è stato utilizzato il software "*Space Claim*".

Una volta analizzate e applicate al caso studio le varie tipologie di supporti, il lavoro è proseguito sul software di simulazione di stampa "*Ansys Additive*". Tramite i risultati forniti dalla simulazione è stato possibile fare un confronto tra supporti volumetrici *lattice* e supporti a *superficie* e quindi verificare gli obiettivi imposti in precedenza.

1. ADDITIVE MANUFACTURING- STATO DELL'ARTE

1.1. Generalità sul ciclo di produzione per AM

Con Additive Manufacturing (AM) si intende un insieme di diverse tecnologie che permettono di creare oggetti fisici partendo da un modello CAD 3D. La procedura di creazione avviene mediante la stratificazione progressiva di materiale lungo l'asse delle Z. Rispetto alle tecniche tradizionali questa tecnologia consente un minore utilizzo di materiale ed una maggiore libertà nella concezione del pezzo, ampliando indefinitamente la gamma di forme e complessità realizzabili.

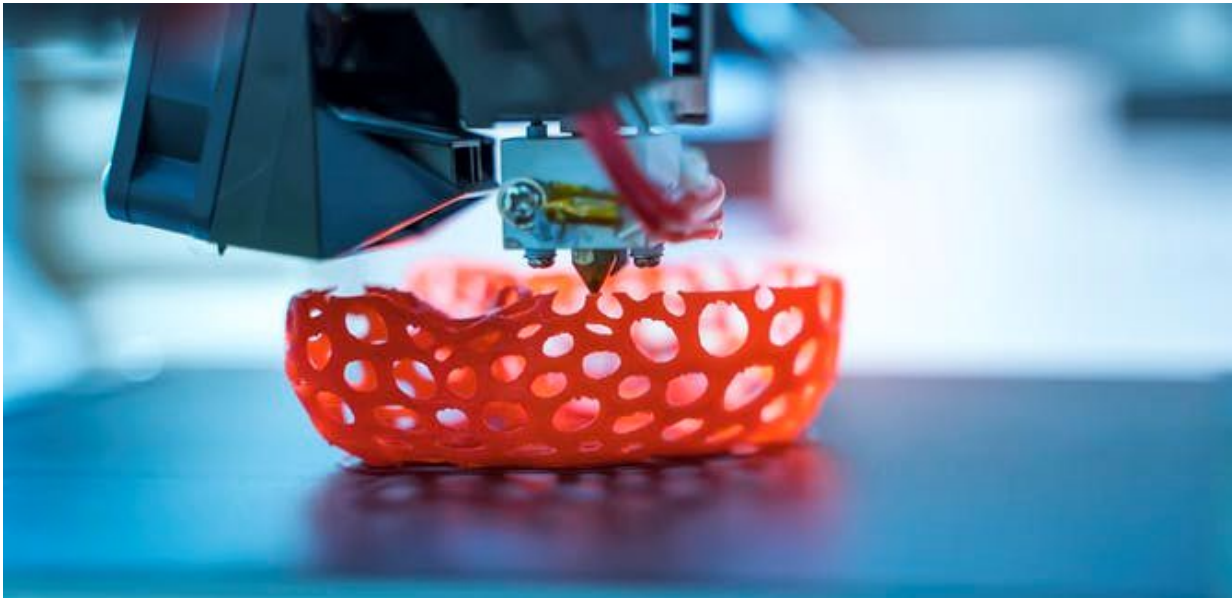


Figura 1: Additive Manufacturing

Il processo che viene seguito per il ciclo di fabbricazione additiva è composto da diversi passaggi:

1. tutte le tecnologie di AM partono dallo sviluppo di un modello CAD 3D;
2. successivamente viene convertito in un file con estensione STL (*Standard Triangulation Language*). Grazie a questo tipo di estensione si ha l'approssimazione della superficie dell'oggetto con elementi triangolari di

diverse dimensioni a seconda della risoluzione voluta; maggiore è la qualità del file STL maggiore sarà la qualità della stampa.

3. Un software dedicato consentirà, mediante l' "affettamento" del file STL (*slicing*), opportunamente "orientato" e "supportato", di produrre il file di macchina necessario per la produzione.

4. Una volta inviate le informazioni alla macchina, inizierà il processo di stampa, che consiste nella stratificazione di materiale layer dopo layer lungo l'asse delle Z.

5. Terminata la stampa, il pezzo viene sottoposto a trattamenti di post processing (rimuovere residui di polvere, finiture superficiali, trattamenti termici per stampe di metalli e rimozione dei supporti).



Figura 2: Workflow Additive Manufacturing

1.2. Vantaggi della tecnologia AM

Mettendo in contrapposizione questa tecnologia, con le classiche tecniche di lavorazione, si possono riscontrare dei benefici e dei limiti per questo tipo di processo. Tra i vantaggi si riscontrano:

- **riduzione degli scarti della lavorazione.**

- ***Possibilità di ottenere geometrie molto complesse:*** si supera un grosso limite delle altre tecnologie di produzione. Ad esempio, con la tecnologia dello stampaggio, con un aumento della complessità della parte da produrre, si ha come conseguenza un aumento delle problematiche legate all'utilizzo di questa tecnica (sotto squadri, progettazione di anime ecc...) con un inevitabile aumento della difficoltà di progettazione del processo produttivo.
- ***Pezzi già assemblati:*** riuscire a produrre in un'unica soluzione componenti che in precedenza venivano prodotti separatamente per poi essere assemblati o saldati, riducendo notevolmente i costi produttivi e aumentando le prestazioni finali dell'oggetto.
- ***Ottimizzazione topologica:*** alle tecniche AM è possibile affiancare un'analisi matematica agli elementi finiti (*topology optimization*) in modo tale da rimuovere il materiale, dove non risulta necessario, con conseguente alleggerimento della parte e senza modificarne le proprietà meccaniche.
- ***I tempi e i costi di realizzazione dipendono solo dalle dimensioni del pezzo e non dalla sua complessità geometrica:*** mentre nelle tradizionali tecniche il costo per ciascuna unità aumenta in maniera esponenziale al crescere della sua complessità geometrica, nelle tecniche additive tale costo in funzione della complessità risulta pressoché costante.
- ***Riduzione della mano d'opera:*** gli interventi da parte dell'operatore sono necessari solo nelle fasi precedenti e successive alla lavorazione.
- ***Libertà nella progettazione.***

1.3. Svantaggi AM

Anche questa innovativa tecnologia ha dei limiti e degli svantaggi dovuti al processo di stampa e alle caratteristiche che assume la componente una volta stampata:

- ***interventi di post processing sempre necessari per:*** il miglioramento della finitura superficiale; eliminare tensioni residue causate da gradienti termici

durante il processo di stampa; la correzione di deformazioni che possono insorgere durante la stampa.

- ***Limite nella qualità di stampa:*** elevata rugosità superficiale che per alcuni componenti non può essere tollerata.
- ***Difficoltà nella realizzazione di vani interni:*** necessità di applicare supporti per mantenere l'integrità strutturale durante il processo di stampa, poiché a causa della geometria del vano si potrebbero riscontrare elevate difficoltà nella rimozione di questi, ultimi una volta terminata la stampa. Inoltre, il materiale di cui sono composti i supporti non può essere riciclato, quindi insorge la necessità di ottimizzare al meglio la morfologia e la densità dei supporti. I supporti risultano di fondamentale importanza per la dissipazione del calore durante lo stampaggio, in modo tale da evitare gradienti termici che porterebbero alla nascita di tensioni residue con conseguente compromissione delle proprietà meccaniche desiderate.
- ***Elevati costi:*** per l'acquisto dei materiali, licenze dei software e acquisto dei macchinari.
- ***Dimensioni del pezzo:*** la grandezza dei pezzi realizzabili è strettamente correlata alla dimensione della macchina, ciò implica delle limitazioni sulle dimensioni.
- ***Diminuzione della produttività.***
- ***Anisotropia della componente stampata.***

1.4. Campi di utilizzo delle tecnologie AM

Questa tecnologia viene sfruttata principalmente per tre campi di utilizzo:

- ***RAPID TOOLING:*** tecnica che permette di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico; risulta avere dei tempi molto rapidi.
- ***RAPID MANUFACTURING:*** si intende la produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente. Grazie ai processi di produzione additiva è possibile produrre oggetti 3D a elevata risoluzione direttamente a partire dai dati CAD.

Contrariamente a quello che avviene nel Rapid Prototyping, con il Rapid Manufacturing non viene realizzato alcun modello, bensì prodotti finali per l'utilizzo in condizioni reali.

- **RAPID PROTOTYPING:** tecniche industriali volte alla realizzazione fisica di un prototipo/modello, in tempi brevi, a partire da un modello CAD 3D. L'obiettivo è ridurre sia i tempi che i costi di costruzione del prototipo stesso.

I numerosi vantaggi apportati dall'utilizzo di questa tecnica, in particolare la libertà nella progettazione e le ottime performance meccaniche a fronte di un peso ridotto, hanno permesso la diffusione di questa tecnologia in diversi settori industriali: aereo spaziale (sistemi di propulsione, parti di turbine, scambiatori di calore), medico (protesi e impianti) e auto motive.

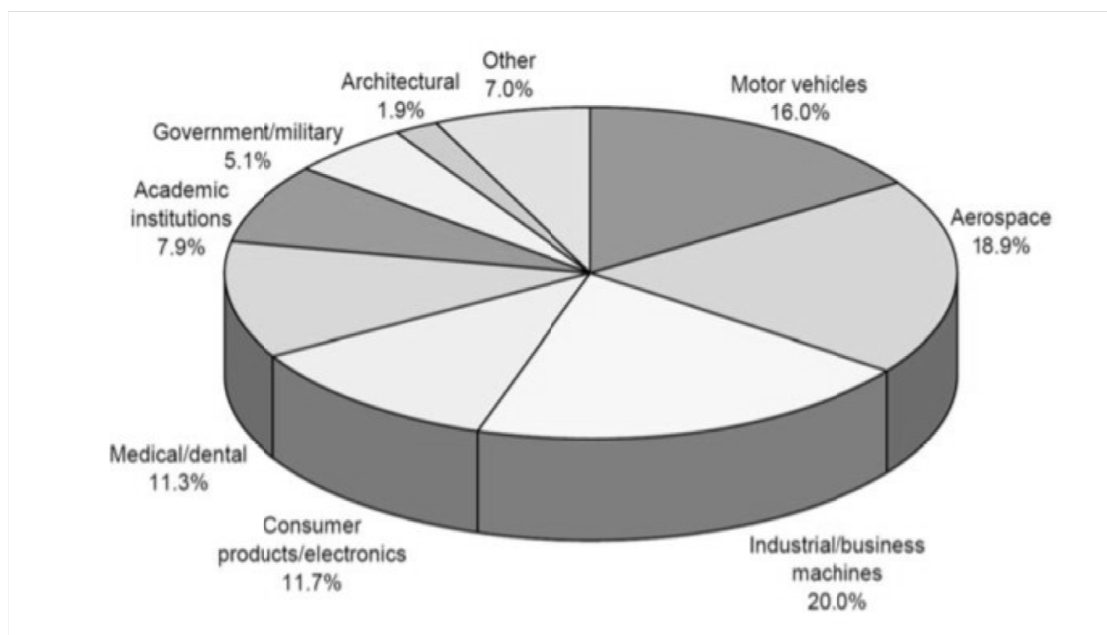


Figura 3: settori in cui viene sfruttata la tecnologia AM

1.5. Classificazione dei processi AM

Con il termine Additive Manufacturing si indica un insieme di tecnologie che possono essere classificate in diversi metodi. Il primo metodo di classificazione è

quello che fa riferimento al tipo di materiale impiegato per il processo di stampa. I materiali che più interessano nel campo industriale sono i polimeri e i metalli. I primi sono delle resine termoindurenti e termoplastiche che garantiscono minor costi ma minori proprietà meccaniche e sono usate principalmente per la produzione di prototipi. I metalli, invece, comportano dei costi più elevati, ma garantiscono delle prestazioni molto più performanti.

Il secondo metodo per la classificazione è quello di considerare lo stato di aggregazione della materia prima, che può essere: polvere, liquido e solido.

La terza ed ultima classificazione si basa sul tipo di tecnologia di base che utilizza la macchina per eseguire la stampa, che può essere: a laser, a fascio di elettroni, ad estrusione, ecc.

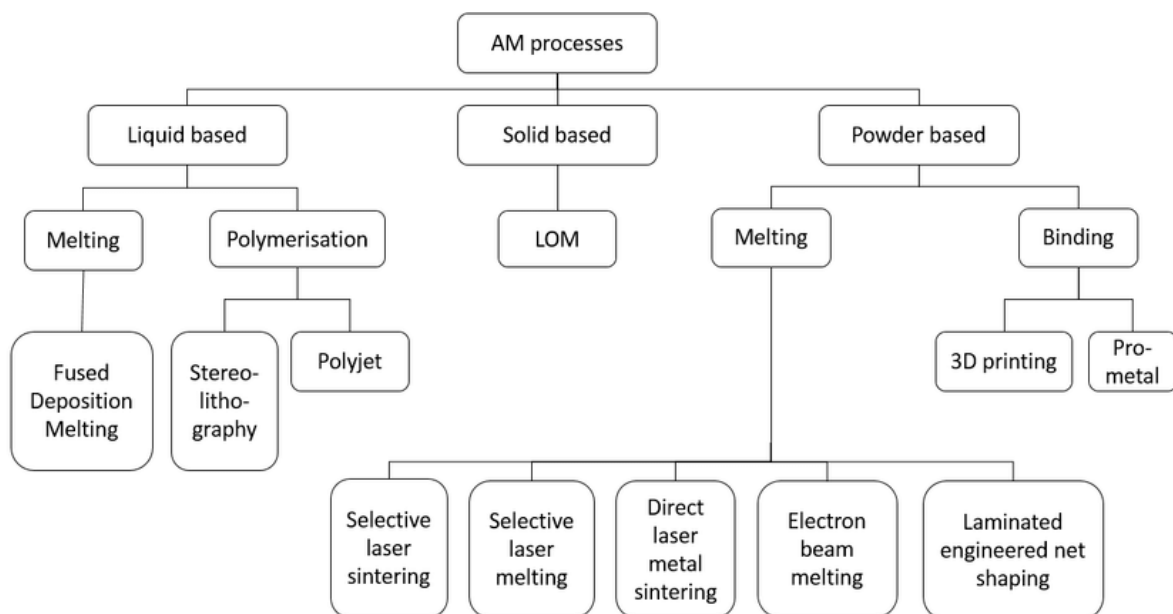


Figura 4: classificazione dei processi AM in base allo stato di aggregazione della materia prima

1.6. Tecnologie per Additive Manufacturing in ambito metallico

Per la realizzazione di oggetti metallici con processi additive, è possibile sfruttare diverse tecnologie. Esse si differenziano: in base allo stato di aggregazione delle

materie prime e alla tecnologia di base che utilizza la macchina per eseguire il processo. Nel caso dei metalli, il materiale di partenza può trovarsi sotto forma di lamina, polvere e filo. Essendo i processi con l'utilizzo di polvere oggetto dei nostri studi, il resto della trattazione proseguirà con l'analisi di quest'ultima tecnologia, in particolare si analizzerà la Powder Bed Fusion.

1.6.1. Powder Bed Fusion

Il Powder Bed Fusion è un processo che sfrutta l'energia termica per fondere e solidificare, strato dopo strato, un'area di un letto di polvere. Sfruttando questo principio di funzionamento si identificano le principali tecniche di stampa:

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

Si precisa che in seguito verrà presa in considerazione solo la tecnologia denominata *Selective Laser Melting* (SLM), oggetto degli studi sperimentali contenuti in questa tesi.

1.6.1.1. Selective Laser Melting (SLM)

La *Selective Laser Melting* (SLM) è una tecnica che utilizza energia termica proveniente da una sorgente laser per fondere polvere metallica. La sinterizzazione non avviene effettivamente, poiché necessiterebbe di un contributo sia di pressione che di temperatura. Con questa tecnica riusciamo ad ottenere grani fini e quindi buone proprietà meccaniche, poiché i tempi di fusione e di solidificazione sono di pochi millisecondi.

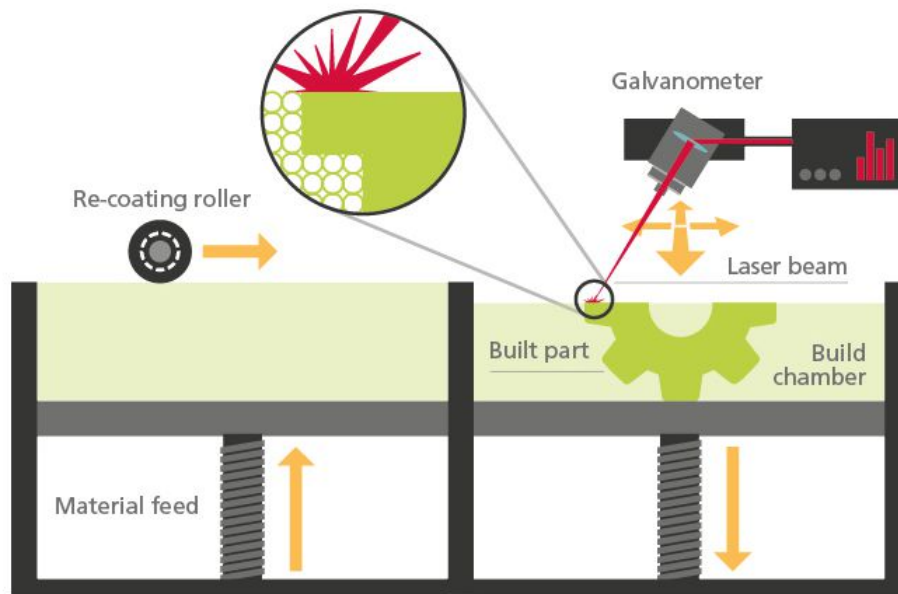


Figura 5: schema processo SLM

La macchina è composta da un elemento centrale detto “elevatore” che trasla lungo l’asse Z e ha la funzione di abbassare la piattaforma di un valore ΔS , ogni volta che viene elaborato uno strato di polvere. Vi sono poi due “contenitori” di polvere da processare e altri due di “overflow” dentro i quali viene contenuta la polvere in eccesso. Successivamente, l’azione di un rullo chiamato “re-coating roller”, che muovendosi da sinistra a destra lungo l’asse delle X, preleva la polvere non ancora processata dal contenitore stendendola in maniera più uniforme possibile lungo la piastra di lavoro, portando l’eccesso nell’overflow. Dopodiché il laser, che è in posizione fissa, viene proiettato attraverso un sistema di specchi sull’area soggetta alla lavorazione.

Gli specchi devono essere posizionati in modo tale che il raggio laser cada sullo strato di polvere in maniera più perpendicolare possibile (cosa che non risulta affatto semplice quando ci si allontana dal centro della piastra). La polvere fondendosi e solidificandosi genera il primo layer e così via.

All’interno della camera di lavoro è necessario avere un ambiente inerte, in modo tale da evitare l’ossidazione del metallo di cui è composta la polvere. Per questa

ragione, si eseguono delle insufflazioni con argon o con elio, a seconda del materiale che si sta processando.

1.6.1.2. Parametri di processo per la tecnologia SLM

L'impostazione corretta dei parametri di stampa della macchina risulta di fondamentale importanza, poiché da queste dipenderanno le caratteristiche meccaniche e fisiche del prodotto finale.

Tra i parametri fondamentali si analizzano in particolar modo:

- ***Laser power***: strettamente legata: al punto di fusione del materiale che si sta elaborando, allo spessore del layer e anche alla velocità con cui si effettua la stampa. Questo parametro deve essere opportunamente regolato in modo tale che il materiale raggiunga esattamente il punto di fusione. Se risultasse avere una potenza troppo elevata, si avrebbe la parziale evaporazione della polvere che comporterebbe una minor densità del pezzo; al contrario, una potenza troppo bassa causerebbe la parziale fusione del letto di polvere aumentando così la porosità della parte e con conseguente modifica alle proprietà meccaniche desiderate.
- ***Layer thickness***: è la misura dello spessore di ogni singolo strato di polvere e definisce la risoluzione della stampa lungo l'asse delle Z.
- ***Velocity***: è la velocità con cui la macchina esegue la stampa; è fortemente legata alla produttività, ma deve essere ben calibrata, poiché una velocità troppo elevata o troppo ridotta comporterebbe una distribuzione non omogenea dell'energia termica sullo strato di polvere, con conseguenze sulle proprietà meccaniche dell'oggetto.
- ***Orientamento della parte sul piatto di stampa***: da questo dipendono il numero di supporti che si devono applicare, la finitura superficiale e il tempo di stampa. Si tende a limitare l'altezza dell'oggetto lungo l'asse delle Z in modo da ridurre il numero di strati e quindi il tempo di stampa.

- **Parametri legati al build volume:** temperatura del piatto, temperatura di alimentazione della polvere, flusso del gas inerte e dimensioni della camera di costruzione.
- **Parametri legati alle caratteristiche della polvere:** dimensioni, densità, distribuzione e materiale.

Parametri	Dimensioni
Velocity [cm ³ /h]	20-35
Massimo volume di costruzione [mm]	500x350x300
Layer thickness [μm]	20-100
Dimensioni della pozza fusa [mm]	0.1-0.5
Laser power [W]	200-1000

Figura 6 : tabella con alcuni dei parametri caratteristici della tecnologia SLM

1.7. Trattamenti post processing

Le tecnologie additive non presentano ancora la possibilità di produrre parti con elevata finitura superficiale, quindi si ha la necessità di eseguire trattamenti di post processing. La risoluzione ottenibile però raggiunge livelli molto alti: si va dai decimi di millimetro fino ai micron della fusione a letti di polvere. Tra i trattamenti più comuni troviamo:

- **Rimozione dei supporti:** molte delle tecnologie additive presentano la necessità dei supporti per prevenire il collasso della struttura durante il processo di stampa. A valle della lavorazione questi supporti vanno eliminati. Si possono eliminare meccanicamente, spesso a mano, semplicemente staccando il manufatto dai supporti oppure chimicamente, ad esempio immergendo il tutto in un liquido dove solo i supporti sono solubili ed estraendo il manufatto soltanto.

- ***Sabbiatura e pallinatura:*** spesso la superficie dei particolari generati con queste tecnologie non è perfettamente uniforme, per questo motivo la pallinatura e la sabbiatura sono dei trattamenti al quale si ricorre spesso. Il manufatto viene colpito con delle sfere di vetro e sabbia scagliate mediante aria compressa, ottenendo quindi una superficie più uniforme eliminando eventuali residui di supporto e i caratteristi gradini derivanti da una lavorazione per strati.
- ***Mass finishing:*** in questa tipologia di trattamento i pezzi vengono inseriti in un sistema vibrante assieme a del materiale abrasivo come la sabbia e del materiale che attua un'azione di lucidatura. Gli impatti e l'attrito generatosi levigheranno quindi la superficie ottenendo gli stessi risultati della sabbiatura. Questo genere di trattamento è utilizzato prettamente per grandi produzioni.
- ***Verniciatura:*** per velocità e convenienza rimane uno dei trattamenti più utilizzati assieme alla sabbiatura, possiede il grande vantaggio che può essere effettuata su ogni manufatto realizzato mediante produzione additiva.
- ***Bonding (assemblaggio):*** i manufatti realizzati mediante produzione additiva sono molto limitati nelle dimensioni dalle macchine che non permettono di realizzare particolari di grosse dimensioni; per ovviare a questo limite si può dividere l'oggetto finale in più parti e unirle dopo averle realizzate. Il genere di unione varia a seconda del materiale che si sta lavorando e alla tecnologia con la quale è stato prodotto: si va dalla saldatura e brasatura, alla saldatura a ultrasuoni e all'utilizzo di resine epossidiche o altri adesivi.
- ***Infiltration:*** manufatti in polimero ottenuti mediante tecnologie additive sono spesso molto fragili, uno dei metodi per migliorarne le proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione è quello del trattamento di infiltration. Questo consiste nel ricoprire la superficie del particolare di una resina epossidica che aiutata con una pompa del vuoto penetrerà nelle cavità della superficie andandole a riempire; una volta solidificata, dopo un trattamento in forno, la resina avrà creato una superficie isolante fra l'esterno e il particolare. Come si può facilmente dedurre questo trattamento funziona molto bene per i materiali porosi.

- ***Elettroerosione a filo:*** è una tipologia di *elettroerosione* che, attraverso l'utilizzo di un filo di ottone o rame caricato elettricamente, lavora il pezzo permettendogli di ottenere la forma desiderata. In questa applicazione è dunque lo stesso filo conduttore teso ad essere utilizzato come elettrodo per erodere e profilare il pezzo da lavorare.

1.8. Materiali utilizzati per la stampa di metalli

Con i materiali metallici si riescono ad ottenere elevate prestazioni in termini di proprietà meccaniche, ma richiedono tecnologie più costose e complesse. I principali metalli e leghe utilizzati sono:

ALLUMINIO: impiegato nei settori dell'automotive, grazie ad un'elevata resistenza termica a fronte di un peso molto contenuto.

COBALTO-CROMO: applicazioni ingegneristiche ad alta temperatura, elevatissime prestazioni.

NICHEL: Le leghe di Nichel resistono a temperature elevatissime e presentano un'ottima resistenza meccanica e all'ossidazione, vengono spesso utilizzate a temperature fino a 1200 °C.

ACCIAIO: esistono numerose tipologie di acciai per additive manufacturing, che ripropongono le medesime caratteristiche dei normali acciai forgiati. Hanno un ottimo rapporto costo/prestazioni e per questo motivo risulta essere una delle leghe più utilizzate.

TITANIO: il titanio è famoso per essere una lega dalla bassa densità con notevoli proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione. Queste caratteristiche lo rendono adatto a molte applicazioni in ambito motorsport e aerospaziale; infine la purezza ottenibile in alcune polveri sommata alle sue proprietà lo rendono ideale per applicazioni biomediche. Il titanio infatti presenta una buonissima biocompatibilità.

1.8.1. INCONEL 718: caratteristiche meccaniche e termiche

L'Inconel 718 è una lega di nichel resistente ad alte temperature e alla corrosione. Presenta un'alta resistenza alla rottura e all'usura, permette di produrre parti finite caratterizzate da un'ottima tolleranza a stress meccanici ed una resistenza termica fino a 980 °C. Il materiale è ideale per applicazioni ad alte temperature come parti di turbine a gas ed impianti industriali.

Può subire diversi tipi di trattamenti alla fine di migliorare le sue proprietà:

- Micropallinatura
- Lucidatura e rivestimento
- Elettroerosione a filo

Se necessario può anche essere sottoposto a trattamenti termici come la tempra per migliorarne le proprietà meccaniche.

Proprietà meccaniche	Senza trattamenti termici	Con trattamenti termici
Resistenza a trazione	980 ± 50 MPa	1250 MPa
Resistenza a snervamento	700 ± 50 MPa	1050 MPa
Allungamento a rottura	28%	10%
Modulo di Young	160 GPa	170 GPa
Durezza	30 HRC	45 HRC
Proprietà termiche	[°C]	
Max. temp operativa	650	
Resistenza all'ossidazione	980	

Figura 7: tabella caratteristiche meccaniche e termiche INCONEL 718

2. SUPPORTI

2.1. Strutture di supporto nella tecnologia SLM

L'applicazione di strutture di supporto nella tecnologia SLM è di fondamentale importanza su numerosi aspetti del processo di stampa:

- ***per l'ancoraggio del pezzo al piatto di stampa:*** il pezzo ha la necessità di essere rialzato con dei supporti dal piatto di stampa, poiché se si costruisse a diretto contatto con la base, se ne impedirebbe il distacco diretto e ciò comporterebbe all'applicazione, lungo tutta l'area di appoggio del componente, di uno strato di sovrametallo.
- ***Per favorire una corretta dissipazione del calore*** in modo tale da evitare dei sovra-riscaldamenti che comportano la nascita di tensioni residue. Le zone più critiche per questo tipo di problema risultano essere le parti a sbalzo della componente, poiché la dissipazione di calore verso il volume centrale è fortemente limitata e inoltre il coefficiente di conduzione della polvere è due ordini di grandezza inferiore rispetto al suo corrispettivo già solidificato.
- ***Per supportare superfici evitandone il collasso:*** i supporti hanno il fondamentale compito di sorreggere, evitandone il collasso, quelle superfici della componente che risultano avere un angolo inferiore ai 45° rispetto al piatto di stampa.

La morfologia e la densità con cui vengono applicati i supporti devono essere ben ottimizzate, poiché la polvere che viene processata per la realizzazione della struttura di supporto risulta non essere più utilizzabile e destinata ad essere smaltita. Inoltre, una densità troppo elevata del reticolo di supporto causerebbe un dispendio di energia maggiore, con un elevato aumento dei tempi di stampa, con conseguente aumento dei costi e riduzione della produttività.

L'applicazione eccessiva di strutture di supporto ha anche effetti diretti sulla finitura superficiale della componente, a causa delle operazioni di rimozione. Per questa ragione l'area di contatto tra oggetto e supporti deve essere minimizzata.

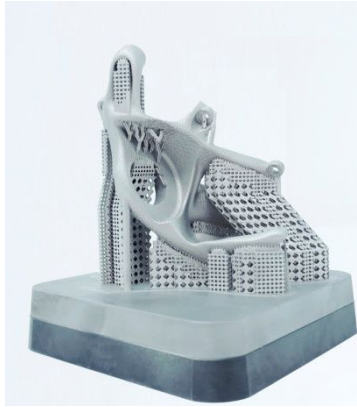


Figura 8: esempio di componente con applicazione di supporti

2.2. Strutture reticolari per supporti volumetrici di tipo lattice

Le strutture reticolari di supporto sono costituite dalla ripetizione di celle elementari ordinate in maniera topologica, che vengono ripetute per un numero definito di volte nello spazio.

Le celle elementari che costituiscono il reticolo vengono classificate in base alla loro geometria e anche in base a come le “struts” sono collegate fra loro.

Andando a variare geometria e collegamenti delle “struts”, le proprietà fisiche e meccaniche della struttura di supporto cambiano in maniera significativa.

Inoltre, sono caratterizzate da un elevato rapporto resistenza-peso e ottime prestazioni dal punto di vista della dissipazione di energia termica.

L’uniformità strutturale, che questa tipologia di reticoli possiede, permette di avere un controllo ottimale sul collasso delle superfici.

Di seguito si analizzeranno alcune tipologie di celle elementari costituenti il reticolo di supporto.

2.2.1. Strut-Based

Sono celle i cui elementi base sono costituiti da travi (struts) e nodi di giunzione. All’interno di questo gruppo è possibile effettuare una sottoclassificazione in base al comportamento meccanico delle varie geometrie:

- *Strutture con comportamento prevalentemente a trazione*: sono caratterizzate da un basso grado di connettività e vengono sfruttate principalmente per applicazioni in cui si richiede un elevato assorbimento energetico.
- *Strutture con comportamento prevalentemente a flessione*: presentano un elevato grado di connettività, quindi saranno caratterizzate da elevate caratteristiche meccaniche; vengono sfruttate per applicazioni strutturali.

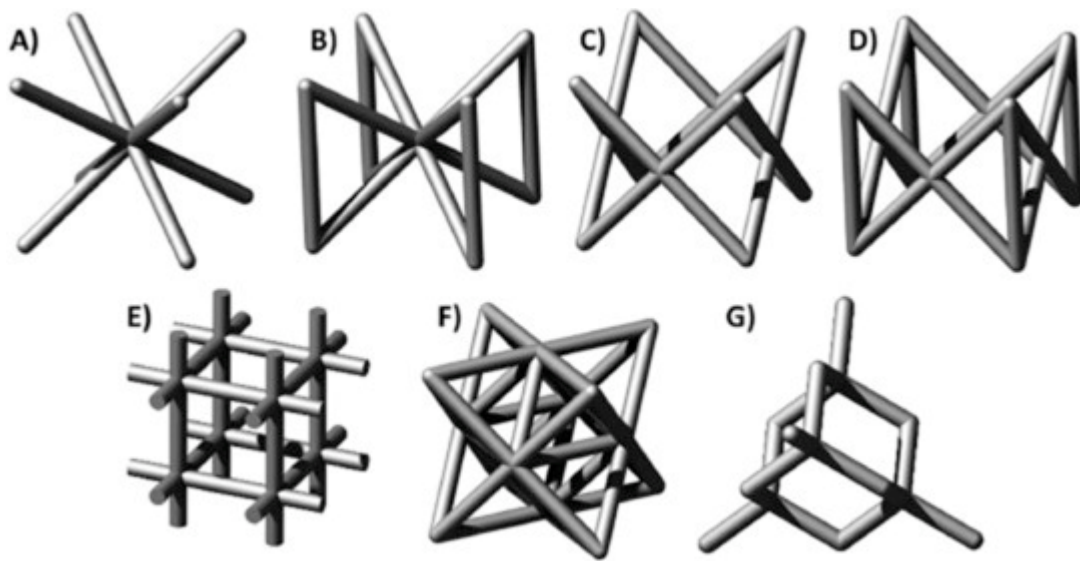


Figura 9: Strut-based lattice structures: BCC (A), BCCZ (B), FCC (C), FCCZ (D), cubic (F), Octet-truss (G), and diamond (H).

Queste celle vengono spesso adottate per: la semplicità di design, l'ottima distribuzione di densità, il peso ridotto e la notevole rigidità e resistenza.

Sulle strutture basate sulle struts (strut-based) sono stati condotti molteplici studi. Le più usuali sono quelle composte da: *body-centered cubic* (BCC), *face-centered cubic* (FCC) e le loro variazioni, come quelle in cui si aggiungono delle struts parallele all'asse Z (BCCZ e FCCZ).

Prendendo in considerazione, ad esempio, le FCCZ si può affermare che grazie all'aggiunta di queste struts parallele all'asse Z, le proprietà meccaniche non sono più simmetriche come accadeva per le FCC, ma si avrà un implemento delle prestazioni

meccaniche lungo l'asse Z che risulta essere a sua volta parallelo alla direzione di stampa.

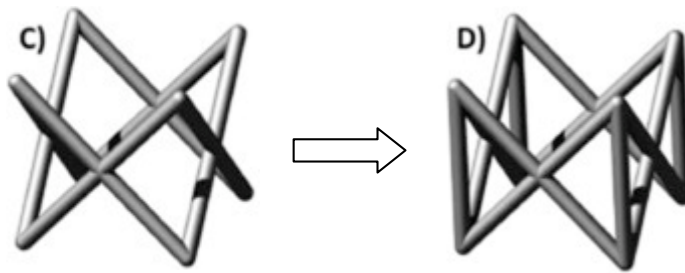


Figura 10: passaggio da FCC a FCCZ, aggiunta di struts parallele all'asse Z

2.2.2. TPMS (*Triply Periodic Minimal Surfaces*)

Le tre principali celle appartenenti a questa categoria sono:

- Gyroid di Schoen
- Diamante di Schwarz
- Neovius

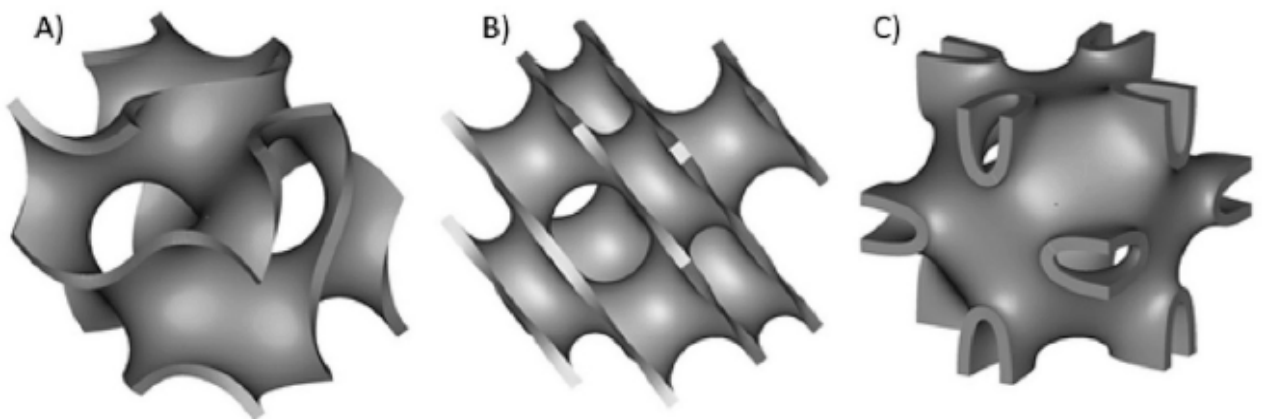


Figura 11: celle di tipo TPMS; (A) giroide di Schoen, (B) diamante di Schwarz e (C) Neovius

Queste celle sono generate da delle funzioni matematiche, andando a modificare le variabili all'interno di queste equazioni, come la periodicità e la densità relativa, si otterranno delle variazioni delle proprietà meccaniche; agendo su questi parametri è quindi possibile adattare la cella per la sua destinazione d'uso.

TOPOLOGIA	Funzione isosuperficie
<i>Gyroid di Schoen</i>	$U_G = \cos(k_x x) \sin(k_y y) + \cos(k_y y) \sin(k_z z) + \cos(k_z z) \sin(k_x x) - t$
<i>Diamante di Schwarz</i>	$U_D = \sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) + \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) - t$
<i>Neovius</i>	$U_N = 3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4 \cos(x) \cos(y) \cos(z)$

Figura 12: equazione strutture TPMS

Il parametro k definisce la periodicità della struttura ed è dato dalla formula:

$$k_i = 2\pi \frac{n_i}{L_i}$$

Dove L_i è una grandezza assoluta della struttura lungo un determinato asse, mentre n_i definisce il numero di ripetizioni della cella lungo i tre assi. Il parametro t all'interno delle equazioni influisce sulla densità.

L'utilizzo di celle TPMS fornisce degli importanti vantaggi:

- il continuo cambiamento della curvatura delle celle di queste strutture favorisce l'auto sostentamento del reticolo durante la fase di stampa.
- Fattore di assorbimento specifico dell'energia tre volte superiore a quello di una struttura BBC.

Questi vantaggi non sono ancora dati per certi, poiché sono in fase di sperimentazione.

2.2.2.1. Gyroid

Una delle celle TPMS più utilizzate è la *gyroid*. Questa cella permette di realizzare: strutture reticolari con un alto fattore di assorbimento specifico dell'energia e elevata robustezza, a fronte di un peso ridotto a causa dell'elevata porosità del reticolo.



Figura 13: struttura composta da Gyroid

Alcuni studi hanno analizzato il comportamento di questo tipo di cella sotto l'effetto di un carico di compressione. Andando ad analizzare i risultati di questo studio si può evincere che il carico risulta essere ben distribuito in tutta la geometria della cella. L'ottima ripartizione del carico è fondamentale per prevenire aree con eccessive sollecitazioni che comporterebbero il rapido collasso della struttura di supporto. Le aree più critiche sono quelle di confine della cella, che presentano sollecitazioni relativamente maggiori.

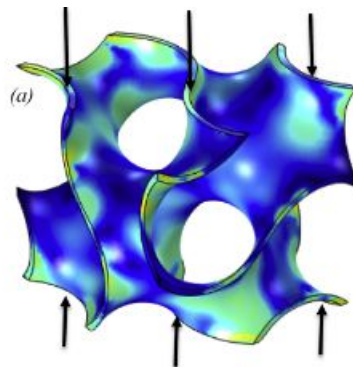


Figura 14: analisi carico di compressione per strutture Gyroid

2.3. Supporti a superficie

Nei precedenti capitoli si è trattato di supporti che vanno a sostenere l'intero volume della cavità, adesso l'analisi proseguirà con lo studio di strutture di supporto che

vanno a sostenere le superfici della geometria che presentano angoli minori di 45° rispetto al piatto di stampa.

Questi supporti hanno il vantaggio di richiedere meno operazioni di post-processing e permettono di ottenere livelli di finitura superficiale maggiori, in compenso però hanno una minor stabilità dimensionale e subiscono maggior distorsione termica.

Rientrano all'interno di questo gruppo:

- **Supporti a blocco:** derivanti da delle reti di linee posizionate lungo X e Y separate fra di loro da una distanza di *hatching*. Sono presenti dei denti che collegano il gruppo di supporto con la geometria e possono essere variate le loro dimensioni in modo tale da aumentare o diminuire l'area di contatto con la componente.

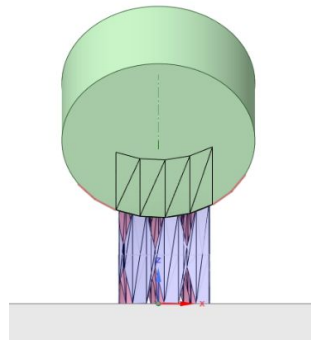


Figura 15: esempio supporti a blocco

- **Supporti ad albero:** i supporti sono a forma di albero. La parte inferiore del supporto dell'albero rappresenta il tronco, mentre la parte superiore rappresenta i rami. I supporti ad albero sono particolarmente utili per sostenere le zone interne delle cavità. Sono disponibili solo per le regioni di supporto della superficie

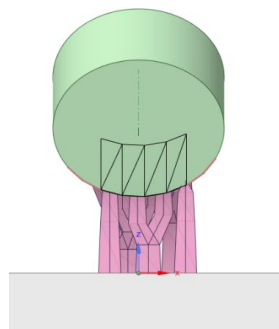


Figura 16: esempio supporti ad albero

- **Supporti ad asta (ROD):** i supporti ad asta sono supporti a forma di barra distribuiti in diversi modi lungo l'area da sostenere, a seconda delle impostazioni. Essi sono disponibili solo per le regioni di supporto a superficie.

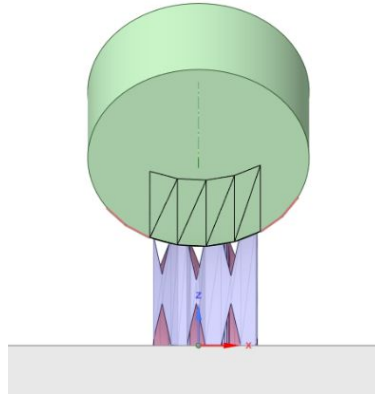


Figura 17: esempio supporti ad asta (ROD)

I parametri di questi supporti saranno analizzati nel paragrafo [3.2.4].

2.4. Software per la generazione e l'analisi delle strutture di supporto

- *nTopology*: software con notevoli funzionalità nel campo dell'additive manufacturing, permette la creazione di supporti di tipo lattice riconoscendo le superfici che necessitano di supporto, inoltre permette di generare reticoli con celle elementari personalizzate. Il programma però risulta avere alcune criticità per quanto riguarda la customizzazione dei reticoli, infatti alcuni tipi di celle elementari non risultano disponibili nella libreria del software, per questo motivo occorre importare la cella, ma questo processo comporta delle deformazioni sulle dimensioni delle celle costituenti il reticolo, poiché il programma segue il volume della geometria selezionata e non le dimensioni lungo X,Y e Z. Inoltre si riscontrano delle difficoltà del software a gestire un numero elevato di superfici, ciò comporta un sovraccaricamento della RAM del computer con conseguente chiusura del programma.

nTopology

Figura 18 : logo nTopology

- *Ansys Spaceclaim*: software che permette di importare la geometria desiderata e generare supporti a superficie su di essa. Il programma permette anche di generare il “build volume” e di impostare i parametri fondamentali di macchina e di volume di camera di stampa, di cui si parlava nel paragrafo precedente [].



Figura 19 : logo Spaceclaim

- *Ansys additive print*: programma che permette di effettuare la simulazione del processo di stampa, importando separatamente geometria e supporti in formato .STL. Il software riesce a fornirci un’analisi dettagliata delle tensioni e deformazioni che si sviluppano durante la stampa, di conseguenza permette di verificare i requisiti di stampabilità imposti.



Figura 20 : logo Ansys

3. WORKFLOW

Nel seguente capitolo si analizzeranno due differenti workflow:

- **Workflow per la generazione di strutture di supporto volumetriche di tipo lattice:** il flusso di lavoro inizia con l'esportazione del modello CAD 3D all'interno del software *nTopology*, il modello deve essere importato utilizzando l'estensione XT (parasolid). Successivamente utilizzando i comandi forniti dal software si vanno ad applicare i supporti di tipo lattice (TPMS) all'interno del volume della geometria che necessita di essere sostenuto durante la fase di stampa. Una volta applicata la struttura di supporto, si passa alla creazione di due "mesh" in formato STL: una per la geometria oggetto di studi e un'altra per la struttura lattice. Questi ultimi saranno poi gli input di *Ansys additive print*, che permette di effettuare la simulazione del processo di stampa.

2. Workflow per la generazione di strutture di supporto a superficie: comincia dal modello CAD del componente da studiare. Esso viene, inizialmente convertito in un file STEP e poi importato in *Space Claim*. Tale tool consente di preparare il pezzo per il processo di stampa e genera alla fine due file in formato STL: il componente in esame e i supporti. Questi ultimi saranno poi gli input di *Ansys additive print*, che permettono di effettuare la simulazione del processo di stampa.

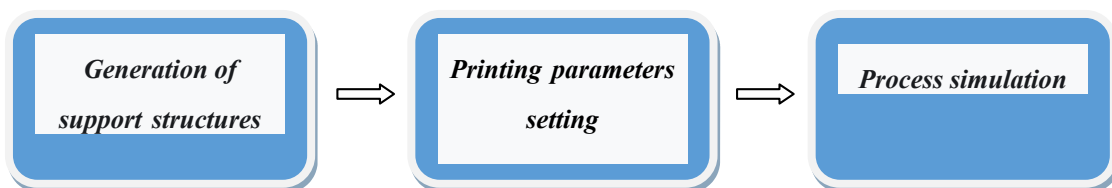


Figura 21 : Workflow

La differenza fra i due workflow risiede nei software di generazione delle strutture di supporto. La fase di simulazione, ad esempio, risulta essere del tutto analoga.

3.1. nTopology: generazione di supporti volumetrici di tipo TPMS

nTopology ci permette di creare delle strutture di supporto di tipo lattice all'interno del volume desiderato e preparare le mesh per l'esportazione nel programma di simulazione.

Si analizza ora qual è il workflow da seguire e l'interfaccia del programma.

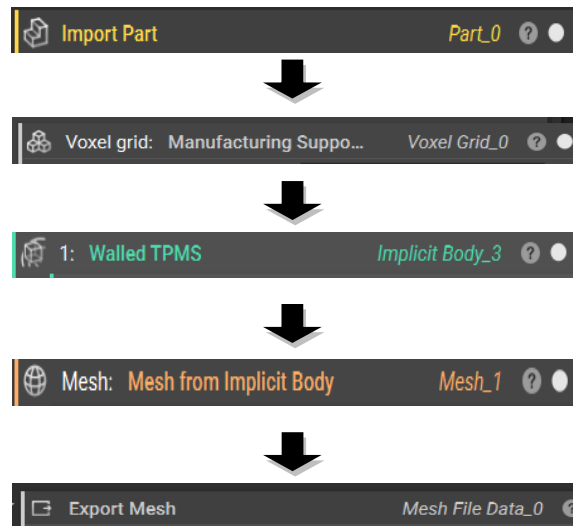


Figura 22 : Workflow nTopology

1. Importare la geometria
2. Individuare il volume che necessita dell'applicazione di supporti
3. Generare un reticolo costituito da celle TPMS
4. Creazione e export delle mesh

3.1.1. Import della geometria

La prima fase che si analizza è l'import della geometria; deve essere eseguita utilizzando la giusta estensione, cioè X_T (parasolid) poiché se si utilizzasse un'altra estensione il programma non assegnerebbe il giusto spessore alla geometria, generando deformazioni e errori nei successivi comandi. Inoltre grazie alla funzione

“Heal CAD” si è in grado di andare a correggere eventuali imprecisioni che possono insorgere sulla geometria nel processo di import.

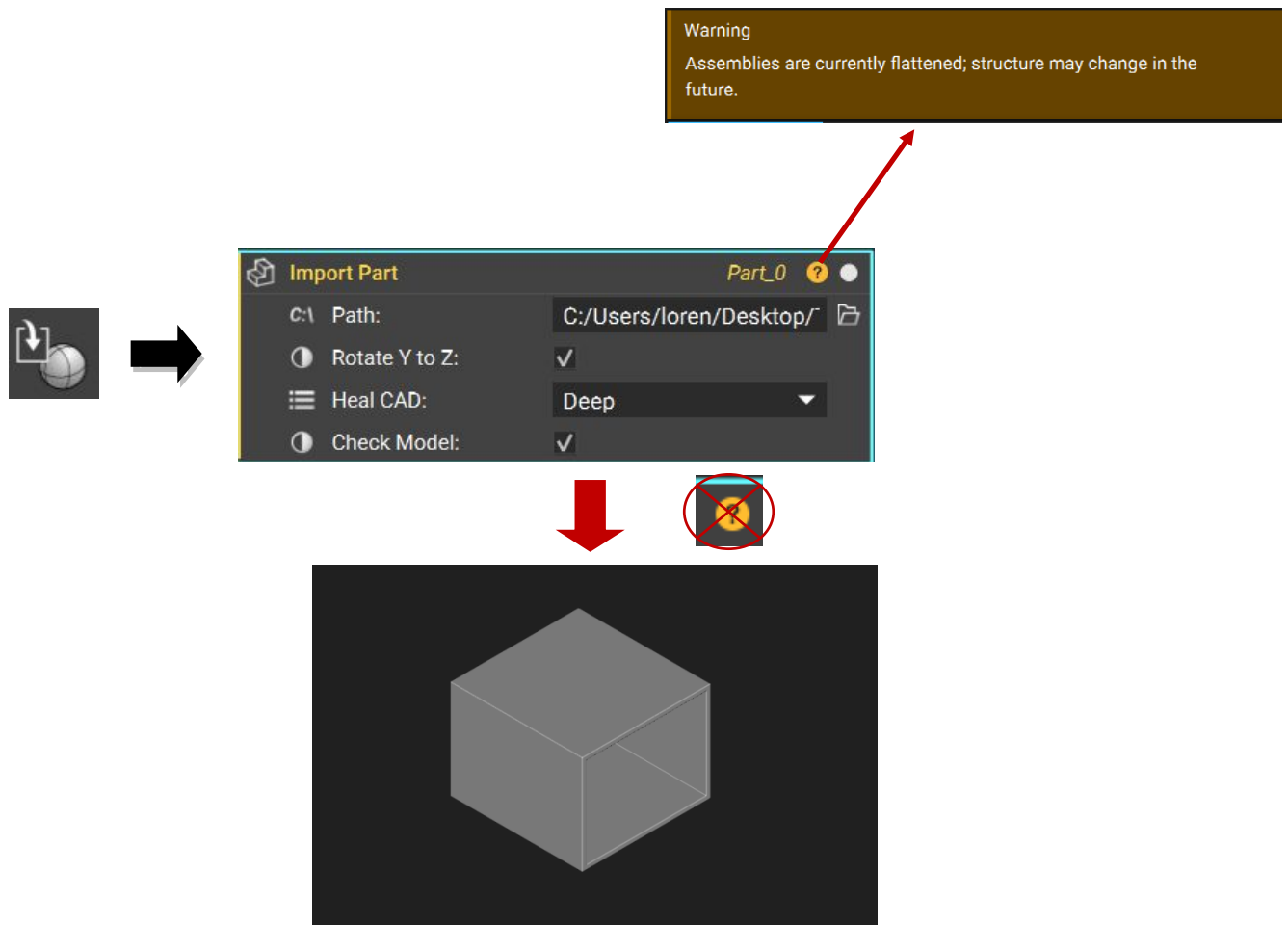


Figura 23 : comando “import part” con evidenziato l’errore di estensione del file e esempio di geometria importata correttamente

La parte importata dovrà essere successivamente convertita in un “*implicit body*”, per essere utilizzabile all’ interno di nTopology.

3.1.2. Creazione del “Manufacturing Support Volume”

Il “*Manufacturing support volume*” è un comando che si trova all’interno del modulo *manufacturing* di nTopology che permette di individuare il volume della parte precedentemente importata, la quale necessita di supporto andando a definire

un piano di riferimento (nel nostro caso il piano X-Y perchè coincide con il piano del piatto di stampa) e un angolo.

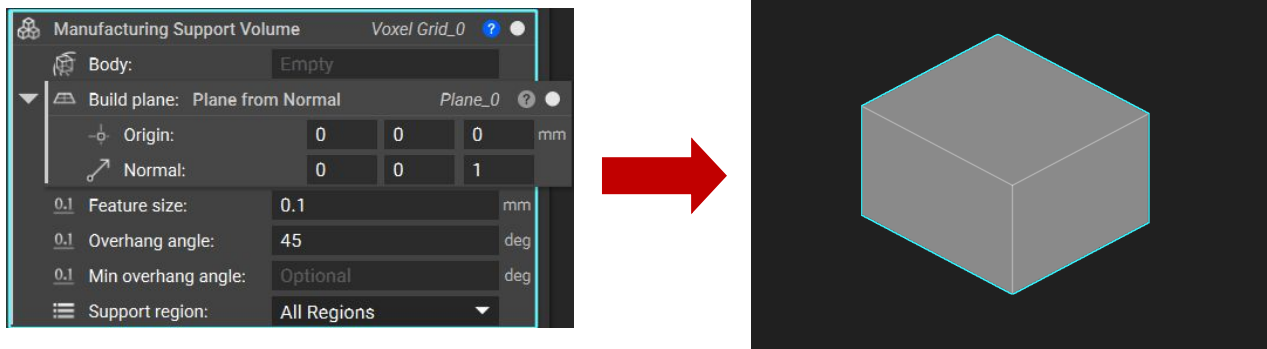


Figura 24: comando “Manufacturing Support Volume” con esempio di voxel grid generata dalla geometria precedente

In sostanza il comando genera, all’interno delle regioni che necessitano di supporto in riferimento al piano e all’angolo indicati, una “Voxel Grid”, questa dovrà essere convertita in un “implicit body” utilizzando il comando “implicit body from voxel grid”. Questa sarà la base su cui si svilupperà il reticolo costituito da celle elementari TPMS.

3.1.3. Generazione dei supporti TPMS

Una volta individuato il volume da supportare, si passa alla generazione del reticolo di supporto costituito da celle elementari di tipo TPMS.

Grazie al comando “Walled TPMS”, presente all’interno del modulo “Lattice” di nTopology, il programma riesce a rielaborare l’ “implicit body from voxel grid” del paragrafo precedente [3.1.2.], generando su di esso un volume costituito dalla ripetizione regolare lungo i 3 assi di una cella elementare di tipo TPMS.

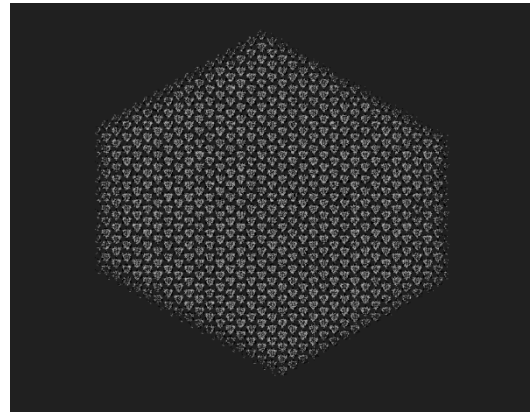
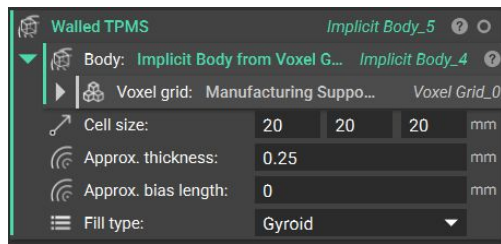


Figura 25: reticolo costituito da celle di tipo Gyroid

Questo comando permette di modificare alcuni parametri caratteristici della cella:

- *Cell size*: determina la dimensione della cella lungo i tre assi (X-Y-Z)
- *Fill type*: libreria di celle elementari di tipo TPMS
- *Approx. thickness*: permette di impostare lo spessore delle geometrie costituenti la cella

Utilizzando questi parametri si modifica la densità del reticolo generato, con conseguente modifica delle proprietà meccaniche e del peso totale della struttura.

3.1.4. Creazione delle mesh per l'esportazione nel software di simulazione

Una volta generato il reticolo, si passa alla creazione delle mesh.

Occorre creare due mesh distinte in formato STL: una per la geometria della componente ed un'altra per il reticolo.

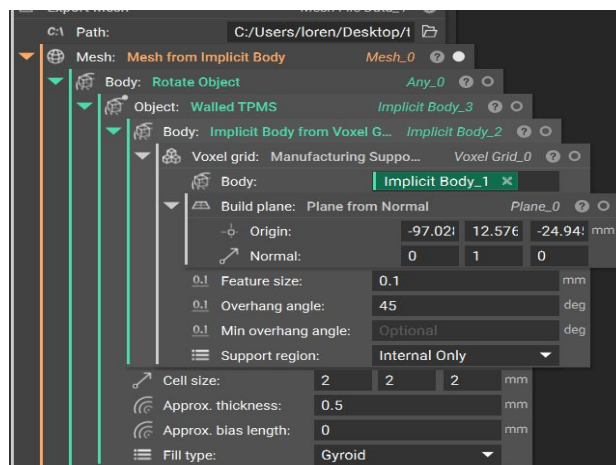


Figura 26: export del reticolo di supporto

Essendo l'unità di misura di nTopology in pollici, occorrerà esportare le mesh all'interno di *Space Claim* per convertirle in *mm*, per evitare di creare incongruenze con il programma di simulazione.

3.2 Ansys Space Claim: generazione di supporti a superficie

Questo software consente di preparare l'intero processo di stampa, oltre all'applicazione dei supporti alla componente, e permette di impostare i principali parametri di stampa.

Si analizza in seguito il workflow per il settaggio dei parametri fondamentali di stampa e per la generazione dei supporti:

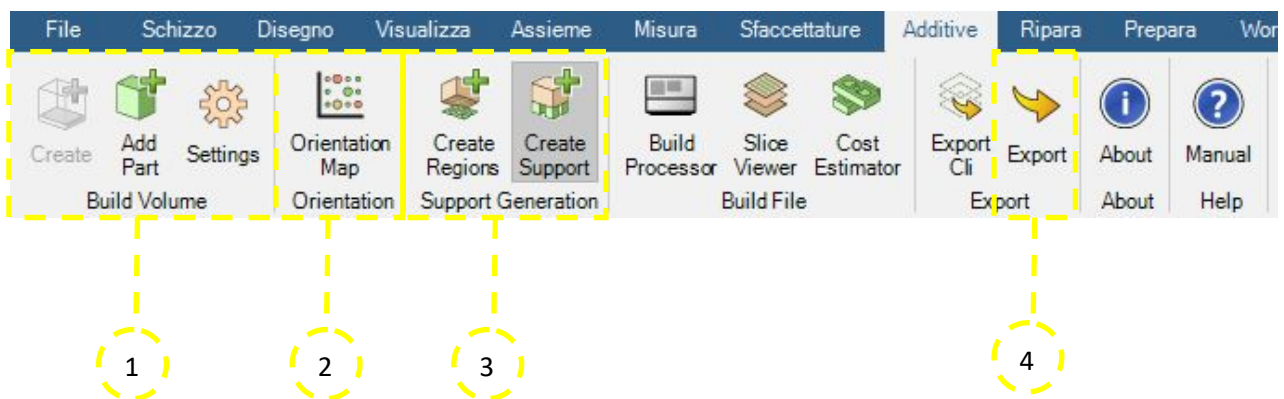


Figura 27 : Workflow Space Claim, (1) creazione del Build Volume, (2) orientamento della parte sul piatto di stampa, (3) generazione dei supporti, (4) export

3.2.1. Creazione del Build Volume

Una volta importata la parte in formato STEP, è possibile creare un *Build Volume*. Grazie al comando “*Settings*” è inoltre possibile andare a regolare i parametri di macchina e le dimensioni della camera di stampa:

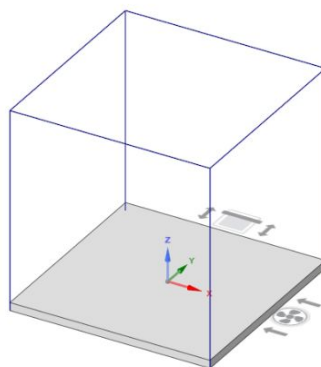


Figura 28: Build Volume con piatto di stampa

- **Settaggio dimensioni del piatto di stampa**

A screenshot of a software interface titled "Platform". It contains two sections: "Size" and "Zero Point". The "Size" section has four input fields: "Length" (125 mm), "Width" (125 mm), "Thickness" (5 mm), and "Build Height" (125 mm). Each field has a numeric input box and a unit label "mm". The "Zero Point" section has two radio button options: "Center" (selected) and "Corner".

Figura 29: interfaccia per il settaggio delle dimensioni del piatto

Questa interfaccia permette di regolare le dimensioni del piatto di stampa, adattandole in base alle dimensioni del pezzo da stampare. Se la componente risultasse non essere interamente contenuta all'interno del piatto, il programma ci darebbe un errore, evidenziando le superfici della componente non contenuta all'interno del piatto.

- **Scelta della macchina**

A screenshot of a software interface titled "Select Machine". It features a dropdown menu currently set to "Default" and a "Manage Machines" button to its right. Below these are three buttons: "Edit Machine", "Save Changes", and "Discard Changes".

Figura 30: interfaccia per la scelta della macchina di stampa

Interfaccia che permette la selezione di una macchina di stampa: selezionando una stampante il programma acquisisce i parametri caratteristici di quel macchinario.

- ***Parametri di stampa***

The image shows a software interface with two main sections. The top section, titled 'Lasers', contains a form for 'Laser 1'. It includes a 'Delete' button in the top right corner. The form has five rows of input fields: 'Power' (value: .400, unit: W), 'Minimum Position X:' (value: 0.00, unit: mm), 'Minimum Position Y:' (value: 0.00, unit: mm), 'Maximum Position X:' (value: 0.00, unit: mm), and 'Maximum Position Y:' (value: 0.00, unit: mm). Below this form is an 'Add Laser' button. The bottom section, titled 'Part Free Areas', has a dropdown menu labeled 'Select Part Free Area:' followed by 'Add' and 'Delete' buttons. Below this are four rows of input fields: 'Location X from Origin:' (value: 0, unit: mm), 'Location Y from Origin:' (value: 0, unit: mm), 'Dimension:' (value: 0, unit: mm), and 'Height:' (value: 0, unit: mm). At the bottom of this section are 'Save Changes' and 'Discard Changes' buttons.

Figura 31: interfaccia per i parametri di processo

Questa interfaccia permette di regolare la potenza e la posizione del laser, inoltre consente di individuare delle aree che non devono essere soggette al processo di stampa.

3.2.2. Orientamento della componente sul piatto di stampa

Il software offre la possibilità di ottimizzare il posizionamento della componente sul piatto di stampa, fornendo delle mappe di orientamento.

Il corretto orientamento della parte permette di:

- Aumentare la produttività
- Avere minore spreco di materiale (minor utilizzo di supporti)
- Ottenere una diminuzione delle deformazioni durante la stampa

Analisi delle mappe di orientamento della componente:

L'asse verticale mostra la rotazione della parte attorno all'asse Z da 0° a 360°, mentre l'asse orizzontale di qualsiasi mappa mostra la rotazione della componente attorno all'asse X da 0° a 180°.

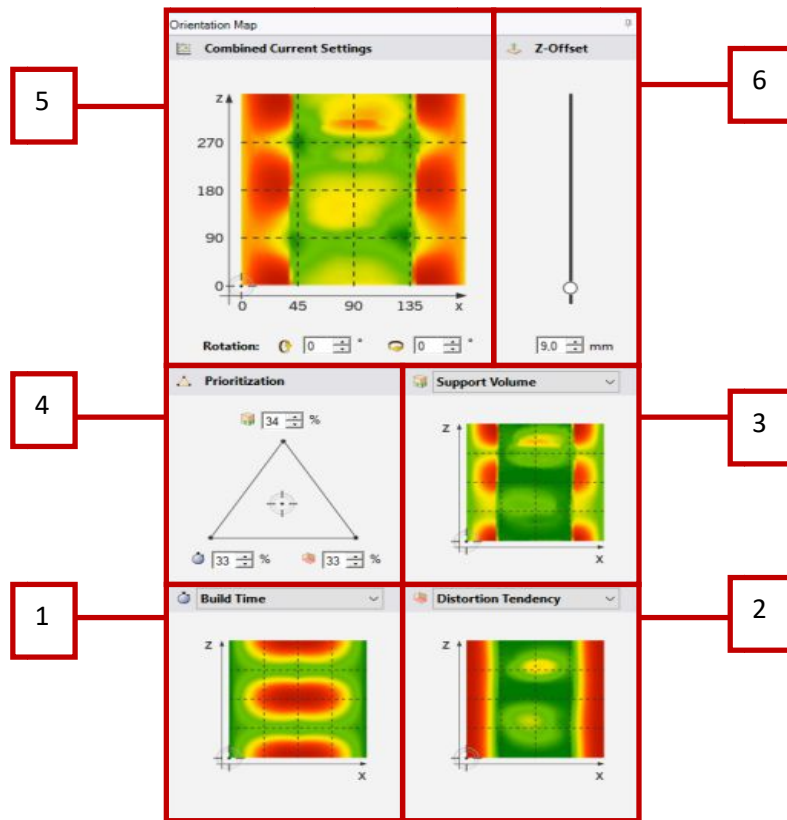


Figura 32: mappe per l'ottimizzazione del processo di stampa

- **Build Time (1):** mappa che usa come variabile il solo tempo di processo. Le zone in verde indicano un tempo minore mentre quelle rosse un tempo maggiore.
- **Distortion Tendency (2):** mappa in funzione della sola tendenza alla distorsione durante il processo di stampa. Le zone in verde indicano una minor tendenza alla distorsione mentre quelle in rosso indicano una maggior tendenza alla distorsione.
- **Support Volume (3):** mappa che tiene conto del volume dei supporti utilizzati. Le zone in verde indicano un minor utilizzo di materiale per la creazione di supporti mentre le zone in rosso indicano un maggior impiego di materiale per la creazione dei supporti.

- **Prioritization (4):** essendo i tre parametri descritti prima dipendenti fra di loro, questo strumento ci permette di dare differente priorità, ad esempio se vogliamo aumentare la produttività e quindi diminuire il *Build Time*, aumenteremmo la percentuale legata a questo parametro.

Una volta impostata la priorità, il tutto si riassume ad una mappa complessiva che regola l'orientamento della parte (5).

- **Z-Offset (6):** permette di alzare e abbassare la componente rispetto al piatto di stampa (per i motivi detti in precedenza).

3.2.3. Creazione e individuazione delle regioni che necessitano di supporto

Il comando “*create region*” permette di selezionare manualmente o automaticamente quelle regioni che necessitano di supporto.

Per la creazione automatica, il programma necessita del settaggio di alcuni valori necessari all'individuazione delle superfici da supportare:

- **Overhang angle:** angolo compreso fra il piano di stampa (0°) e la superficie della componente. Il valore tipico di questo parametro è di 45° , il ciò significa che se si venisse a formare un angolo minore del valore assegnato a questa variabile il software applicherebbe automaticamente dei supporti.

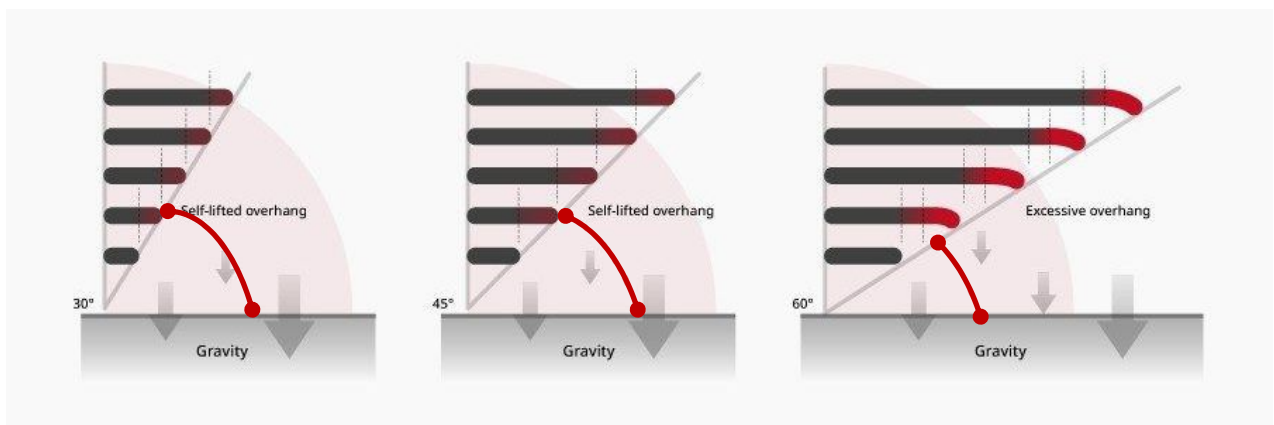


Figura 33: *Overhang angle*

- **Region size:** è la superficie minima che prende in considerazione il software.

Superfici al di sotto del valore impostato per questo parametro non saranno soggette all'applicazione di supporti.

L'interfaccia del programma permette di inserire questi parametri di selezione delle superfici, in più fornisce la possibilità di creare linee di supporto abilitando la funzione “*Line regions*”.



Figura 34: Interfaccia comando “*Create regions*”

3.2.4. Generazione dei supporti a superficie

Utilizzando il comando “*Create Support*”, il software applica alle regioni individuate nel paragrafo precedente delle strutture di supporto.

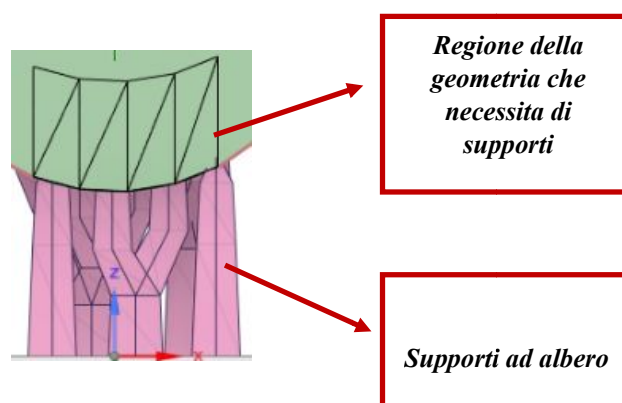


Figura 35: esempio di applicazione di supporti alle regioni selezionate dal software

Il programma permette di applicare diverse tipologie di supporto a superficie (si analizzeranno solamente quelle viste nel paragrafo [2.3]) e inoltre permette di impostare i parametri con cui deve essere generata la struttura di supporto.

Types of supports

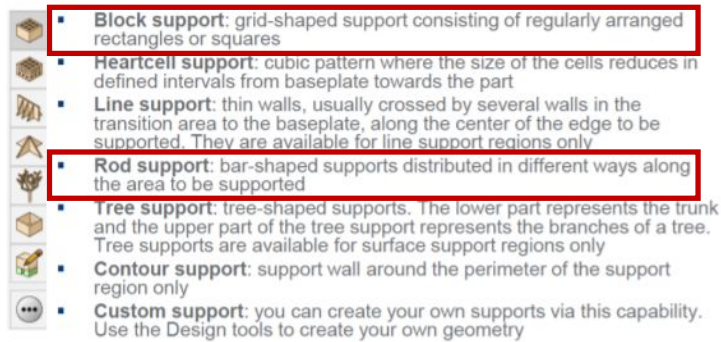


Figura 36: tipi di supporti presenti all'interno di Space Claim

- **Parametri per la generazione di supporti a blocco:** questa interfaccia permette di modificare le caratteristiche e le dimensioni di questi supporti.
- **Dentatura:** i denti sono realizzati per rendere il processo di rimozione dei supporti più agevole. Questi vengono realizzati nella parte inferiore e superiore dell'supporto.

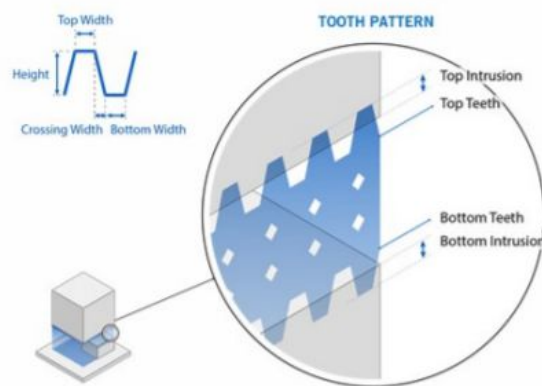


Figura 37: dentatura supporti a blocco

- **Spaziatura lungo X e Y:** definisce le dimensioni dei supporti lungo X e Y

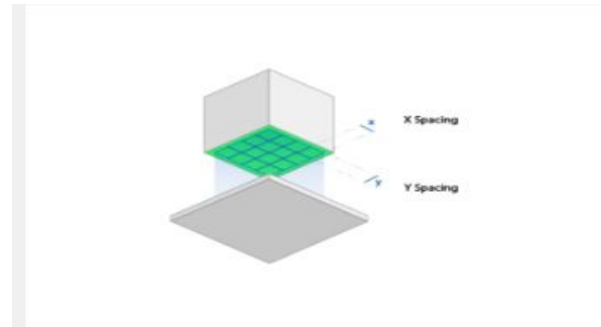
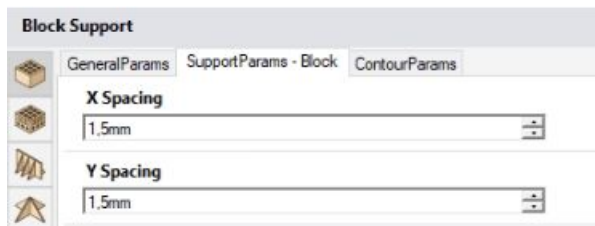


Figura 38: X and Y Spacing

- **Regolare la profondità di intrusione dell'supporto nella superficie della componente.**

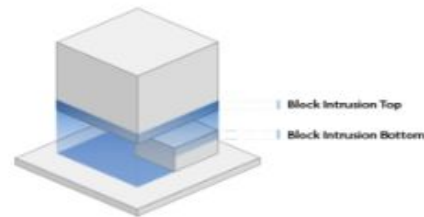
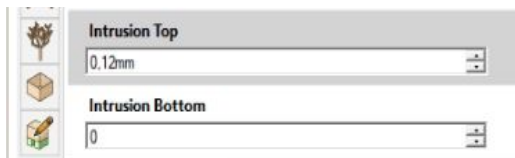


Figura 39: intrusion settings

- **Parametri per la generazione di supporti ad asta (ROD):**

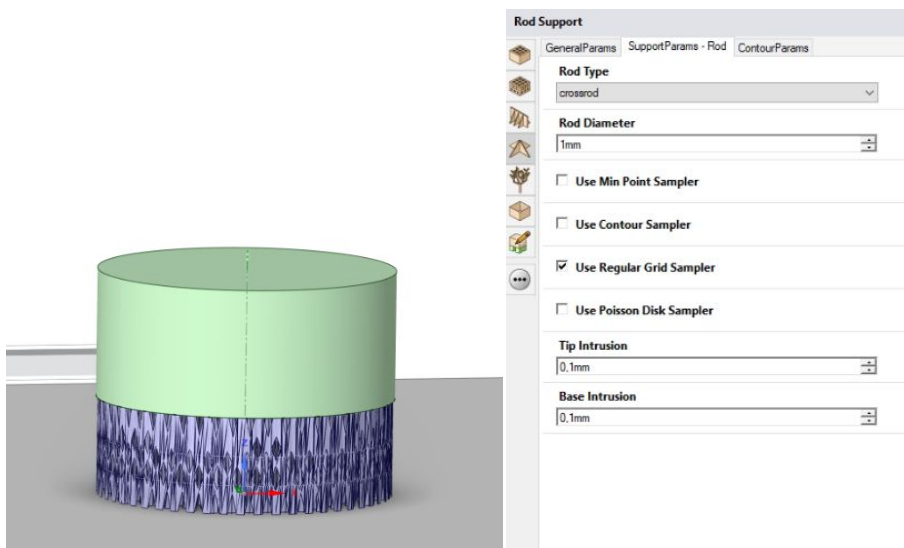


Figura 40: parametri e esempio di supporti ROD

Questa interfaccia permette di selezionare la tipologia di “ROD” da applicare e le dimensioni del suo diametro, inoltre permette di scegliere come i supporti devono essere distribuiti sulla superficie della componente.

L’ultimo parametro è quello legato alla profondità di penetrazione dell’ supporto all’interno della componente.

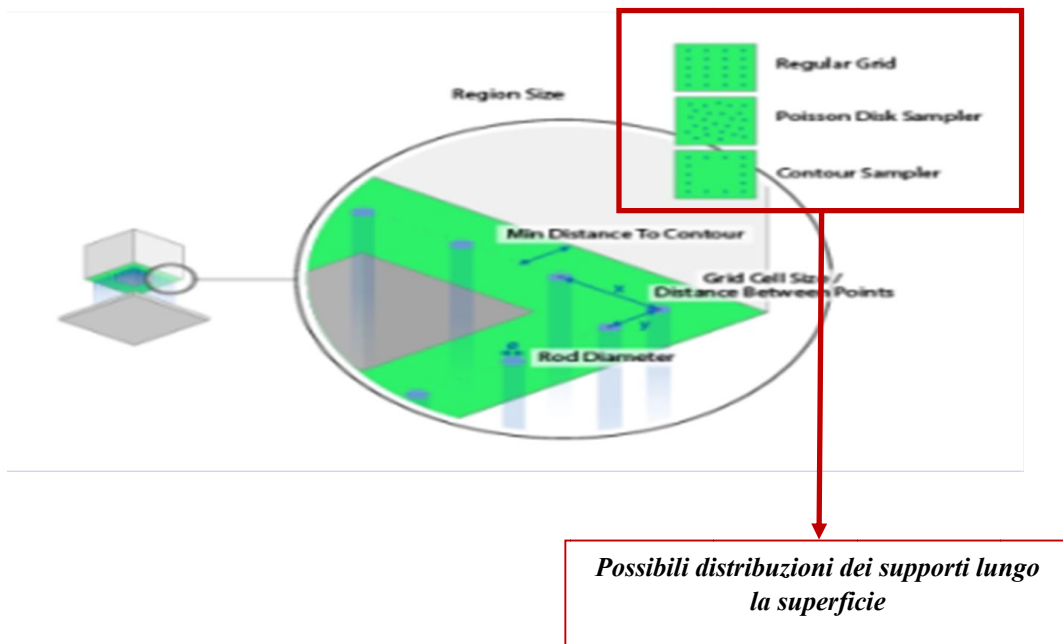


Figura 41: esempi di distribuzione dei supporti e alcuni parametri caratteristici

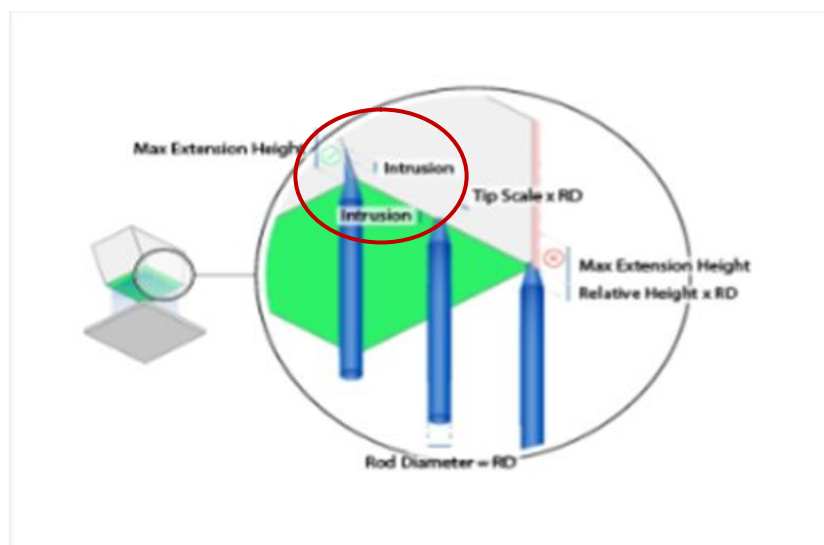


Figura 42: tip intrusion e base intrusion

3.2.5. Export della geometria e del reticolo di supporto

Una volta impostati e generati i supporti si passa alla creazione delle mesh per l'export all'interno del programma di simulazione, il software in automatico esegue due mesh in formato STL: una per la geometria e una per il reticolo di supporto.







 ansys_additive_print.zip	23/06/2021 11:37	zip Archive	15.443 KB
 baseplate.stl	23/06/2021 11:37	Oggetto 3D	1 KB
 build_job.scdoc	23/06/2021 11:37	ANSYS 2021 R1 .sc...	14.834 KB
 part.stl	23/06/2021 11:37	Oggetto 3D	162 KB
 print_file.slm	23/06/2021 11:37	File SLM	26.488 KB
 support_vless.stl	23/06/2021 11:37	Oggetto 3D	5.012 KB

Figura 43: export delle mesh dei supporti e della parte

3.3. Ansys Additive Print: import e parametri per la simulazione

L'ultimo step del workflow è il processo di simulazione della stampa, che risulta essere del tutto analogo per i due software visti in precedenza.

Quest'ultimo passaggio viene svolto utilizzando il programma *Ansys Additive Print*: importando le due mesh generate in precedenza e impostando i parametri di input (materiale, tipo di sollecitazione e la definizione delle mesh importate) il programma restituisce degli output che permettono di stabilire l'effettiva stampabilità della componente.

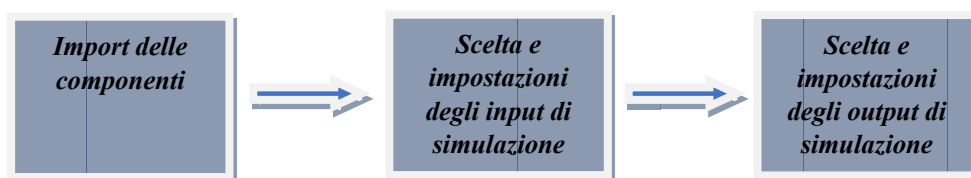


Figura 44: Ansys Additive Print, sequenza per eseguire la simulazione di stampa

3.3.1. Import delle componenti

Le mesh precedentemente ottenute vengono importate all' interno del software di simulazione. Si esegue per prima l'import della geometria e successivamente si importa la struttura di supporto.

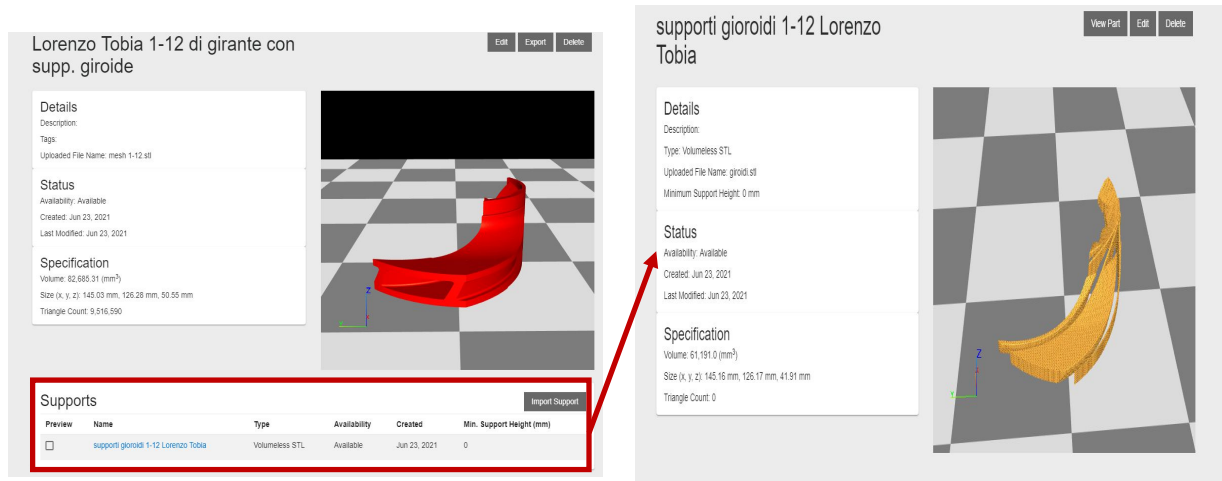


Figura 45: import delle geometrie

3.3.2. Parametri di Inputs per la simulazione di stampa

Gli input che richiede il programma per eseguire il processo di stampa sono:

➤ **Settings della geometria**

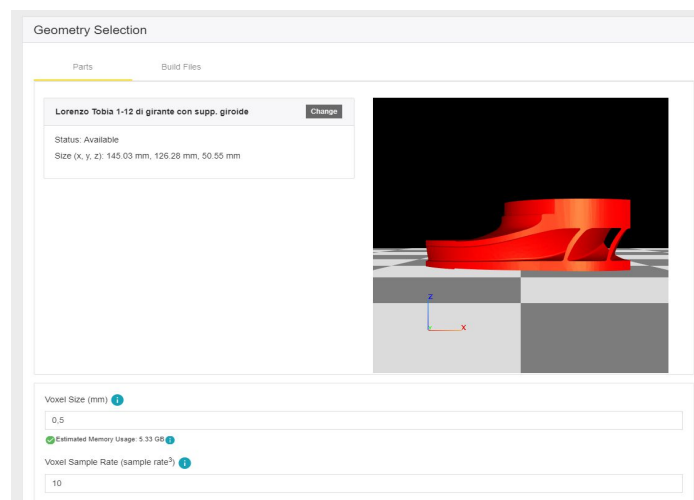


Figura 46: Interfaccia impostazioni geometria

- **Voxel Size [mm]:** il *voxel* è un elemento cubico utilizzato per definire il dominio della geometria. Dalla scelta di questo parametro dipende la memoria che andrà ad occupare la simulazione.
- **Voxel Sample Rate:** la frequenza di campionamento determina l'accuratezza della densità dei voxel.

➤ **Settings dei supporti**

Figura 47: Interfaccia impostazioni geometria

- **Support Yield Strength Ratio:** è la resistenza del materiale della struttura di supporto rispetto al materiale della geometria. Nel caso ideale il suo valore è pari a uno, il ciò significa che la due resistenze si equivalgono.

➤ **Settings del materiale e delle sollecitazioni**

Figura 48: Interfaccia impostazioni materiali e tipo di sollecitazioni

- **Material:** il software permette di selezionare da una libreria il tipo di materiale che sarà oggetto della simulazione. La selezione del materiale comporta il riempimento automatico dei parametri che riguardano le sue caratteristiche fisiche e meccaniche.
- **Load Stepping Type:** questo parametro permette di migliorare la convergenza delle soluzioni durante la fase di simulazione; il carico totale verrà applicato ad ogni layer in maniera incrementale.
- **Hardening Factor:** viene utilizzato per calcolare la pendenza della curva tensione-deformazione al di sopra del carico di snervamento del materiale.
- **Strain Scaling Factor:** questo è un fattore in base al quale viene scalato il fattore di resa del materiale.

3.3.3. Parametri di output della simulazione

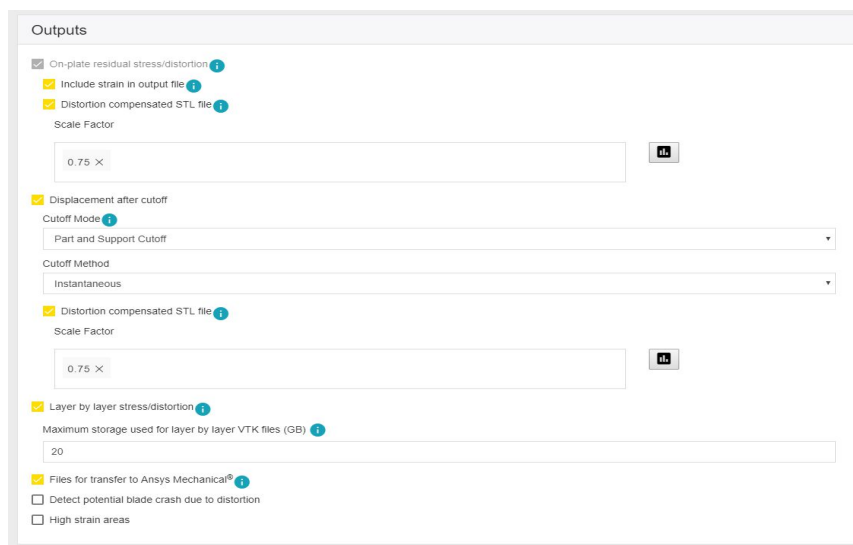


Figura 49: Interfaccia outputs

- **Include strain in output file:** selezionando questa opzione il programma restituisce un file che contiene lo stress residuo e lo spostamento della parte prima della rimozione dalla piastra di base.
- **Distorsion compensated STL file:** il file STL viene rielaborato utilizzando i risultati ottenuti nella simulazione degli stress residui e dello spostamento.

- ***Displacement after cutoff (part and support cutoff)***: questa opzione permette di rimuovere l'intera geometria dal piatto di stampa e inoltre divide anche i supporti dalla parte, andando a simulare separatamente le varie componenti.
- ***Layer by layer stress/distortion***: parametro che permette il controllo delle deformazioni e degli stress residui di ogni singolo layer.
- ***Detect potential blade crash due to distortion***: grazie all'analisi delle deformazioni di ogni layer, questo comando permette di stabilire se siano possibili eventuali urti fra il re-coating roller e il pezzo in stampa.

4. CASO STUDIO

Il caso studio di cui si tratterà nel resto del capitolo è basato sull'analisi di stampabilità di una girante per compressori centrifughi realizzata in Inconel 718. Per lo stampaggio di questa componente si è deciso di utilizzare la tecnologia SLM “Selective Laser Melting”. Tale analisi ha lo scopo di andare a verificare i requisiti di stampabilità, attraverso l'analisi delle tensioni e delle deformazioni e inoltre di andare ad effettuare un confronto fra le diverse tipologie di strutture di supporto applicate alla geometria, andando così ad individuare la miglior strategia per la realizzazione della stampa. Le morfologie dei supporti che sono state analizzate sono:

- *Supporti di tipo lattice (Gyroid)*
- *Supporti a superficie (a Blocchi e ROD)*

4.1. Geometria

La geometria analizzata nel caso studio è una girante centrifuga con 12 pale.

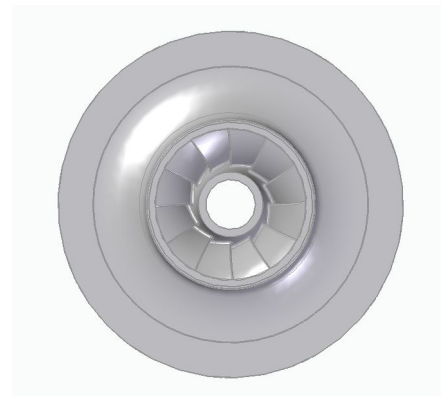
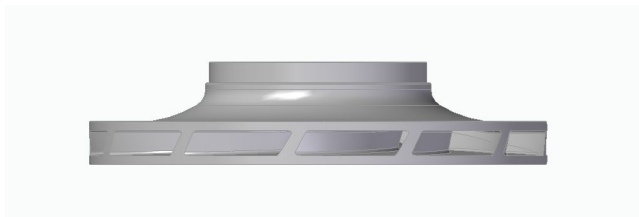


Figura 50: geometria girante

L'applicazione di supporti e la simulazione di stampa, per una componente così complessa e voluminosa, richiederebbero una notevole potenza di calcolo da parte del computer. Per evitare l'arresto improvviso dei software di applicazione dei supporti e tempi eccessivamente lunghi di simulazione, si è pensato di analizzare un

singolo canale della girante (in modo tale da avvicinarsi il più possibile al reale comportamento della girante completa e minimizzare gli effetti di bordo).

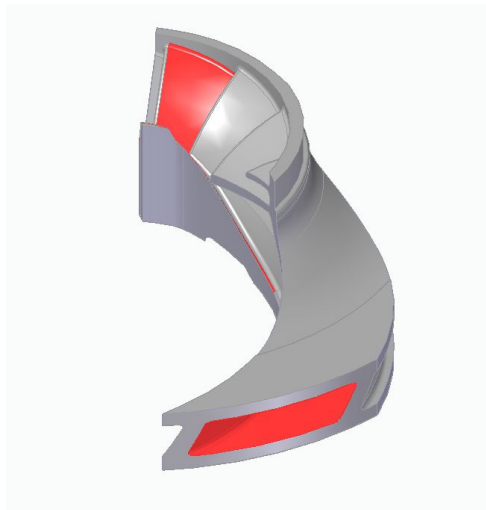


Figura 51: geometria canale di girante (geometria studiata)

4.1.1. Applicazione di supporti Gyroid alla geometria

Applicando il workflow del capitolo [3.1] con i seguenti parametri per la generazione delle celle elementari di tipo **Gyroid**:

<i>Parametri</i>	<i>Valori[mm]</i>
Cell Size	2-2-2
Approx. thickness	0.5
Approx. Bias Length	0

Figura 50: tabella con valori utilizzati per la generazione di strutture di supporto (Gyroid) all'interno del caso studio

Si ottiene:

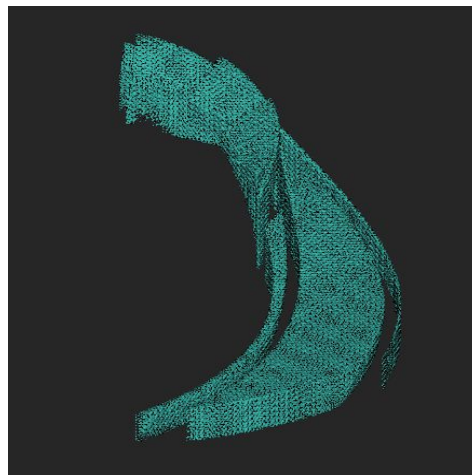


Figura 52: struttura di supporto costituita da celle elementari di tipo Gyroid applicata alla geometria del caso studio

4.1.2. Applicazione di supporti a superficie alla geometria

Applicando il workflow del capitolo [3.2] e scegliendo i supporti a superficie di tipo ROD, per il sostentamento del vano interno del canale di turbina e i supporti a blocchi per il collegamento della componente con il piatto di stampa, si ottiene:

(Parametri usati per la generazione dei supporti contenuti nelle tabelle in figura 37-38-39)

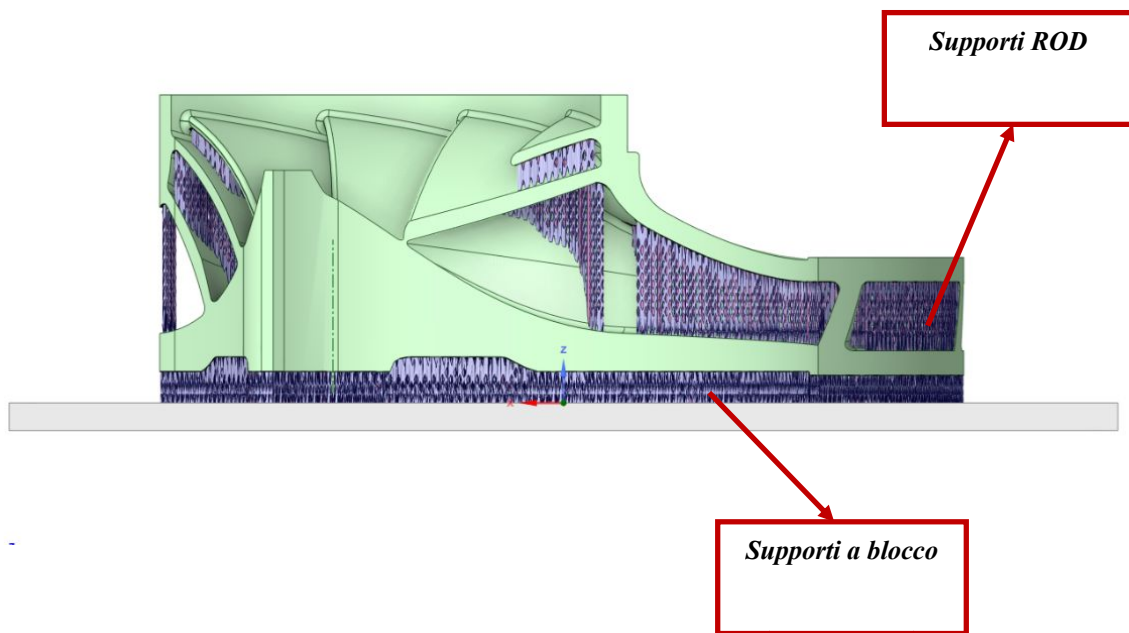


Figura 53: geometria con applicati i supporti a superficie

4.2. Parametri di processo utilizzati per la stampa

I parametri utilizzati per il processo di stampa con tecnologia SLM sono riportati nella seguente tabella:

Parametri di processo	
Layer thickness	40 μm
Laser power	285 W
Velocity	960 mm/s
Stripe width	10 mm
Hatching space	0,11 mm
Stripe overlap	0,8 mm

Figura 54: tabella con i parametri utilizzati per eseguire la stampa

L'analisi sarà effettuata orientando la componente in maniera orizzontale rispetto al piatto di stampa. Studiando le mappe di orientamento (con priorità egualmente distribuita) si è visto che mantenendo un orientamento orizzontale le tre variabili risultano essere all'interno della “zona verde” e quindi già ottimizzate.



Figura 55: mappa e triangolo di priorità utilizzate per il caso studio

4.3. Analisi dei risultati della simulazione di stampa e verifica requisiti di stampabilità

Nel proseguire la trattazione si analizzeranno i risultati ottenuti dalle simulazioni di stampa, in particolar modo ci si concentrerà su:

- **Analisi delle deformazioni durante il processo di stampa** e quindi verificare che le deformazioni siano contenute all'interno dell'intervallo di tolleranza imposto.
- **Analisi delle tensioni durante il processo di stampa:** verificare che le tensioni equivalenti di Von-Mises non superino quella di snervamento del materiale
- **Possibili collisioni della parte in stampa con il re-coating roller:** se la deformazione del singolo layer supera un valore di deformazione critico superando così i 40 μ m, nasce la concreta possibilità che avvengano urti fra il pezzo in stampa e il re-coating roller.

Queste analisi verranno effettuate sia per i **supporti volumetrici Lattice (Gyroid)** e sia per i **supporti a superficie (Rod e Blocco)**, dopo di che si farà un confronto fra i

risultati ottenuti per le due categorie, per individuare la miglior strategia di supporto applicabile alla geometria.

4.3.1. Analisi delle deformazioni durante il processo di stampa

Applicando i passaggi visti nel workflow relativi ad *Ansys Additive Print*, si ottengono i seguenti risultati di simulazione:

➤ **RISULTATI CON L'APPLICAZIONE DEI SUPPORTI DI TIPO GYROID:**

○ *Deformazioni sulla geometria della girante durante il processo di stampa:*

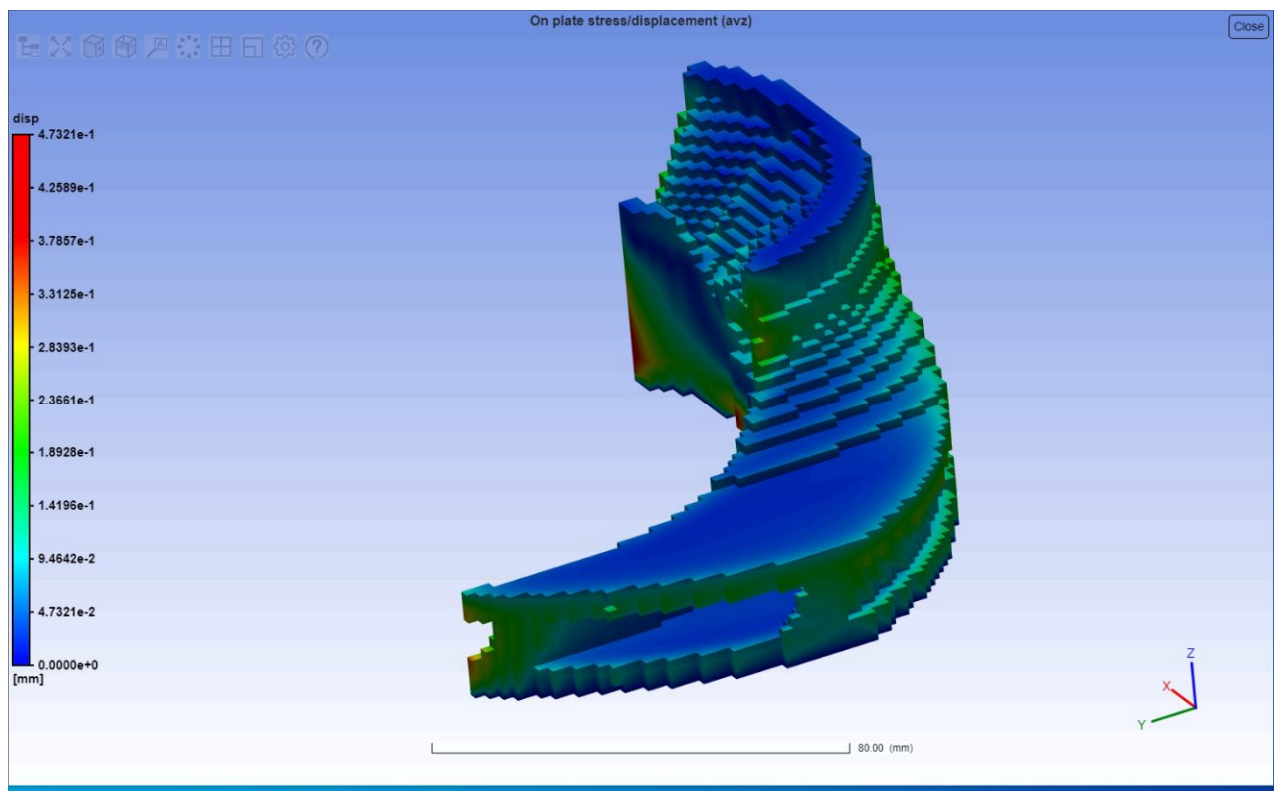


Figura 56: deformazione della girante sul piatto di stampa, con applicati supporti Gyroid

Da notare che le zone che risultano essere maggiormente deformate sono quelle in corrispondenza della zona dove è stato eseguito il taglio dal resto della girante e

quindi possono essere considerate come effetti di bordo. Per il resto della geometria possiamo notare una deformazione massima che si aggira intorno ai 0.28 [mm] in corrispondenza della corona circolare esterna, una deformazione minima con un valore pari a zero e una deformazione media intorno ai 0.24 [mm]

- *Deformazioni sulla struttura di supporto della girante durante il processo di stampa:*

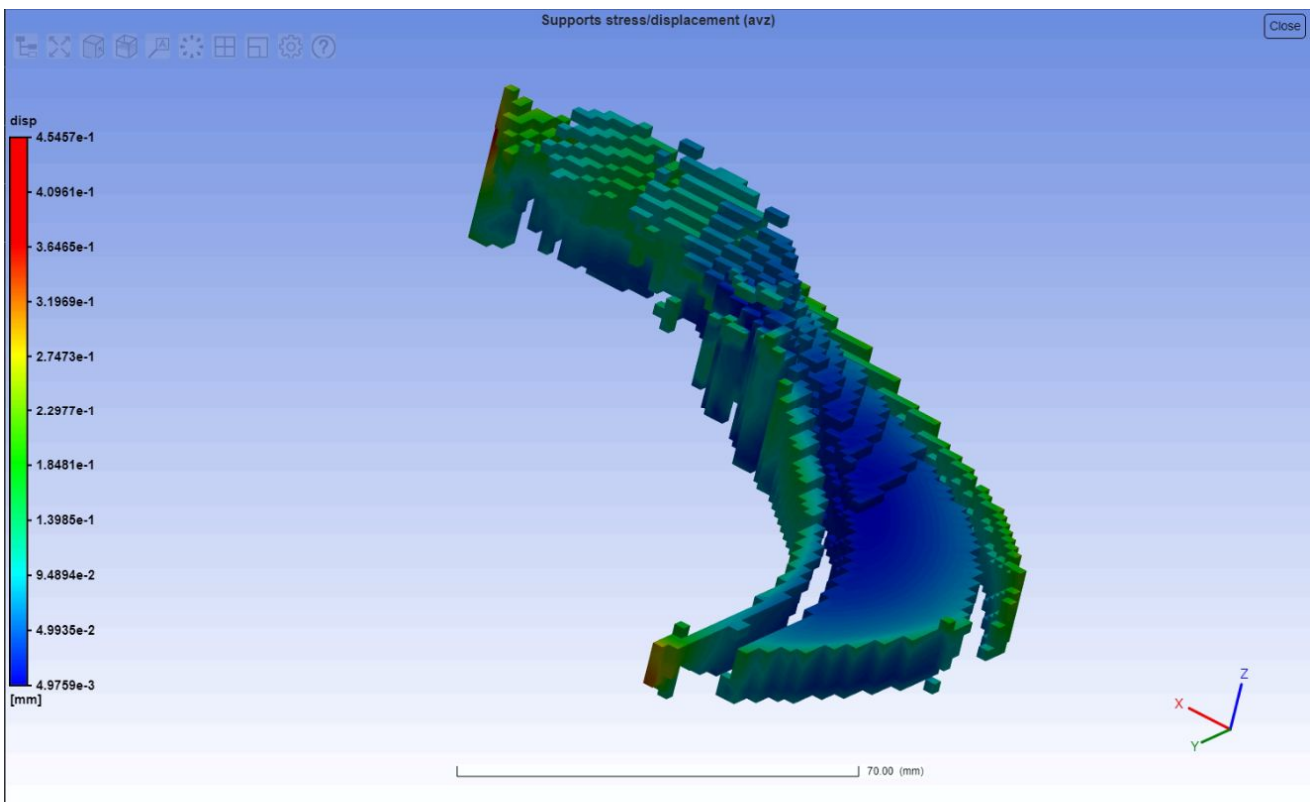


Figura 57: deformazione della struttura di supporto sul piatto di stampa, con applicati supporti Gyroid

Anche in questo caso possiamo notare che le zone di massima deformazione sono quelle adiacenti al taglio. La deformazione massima risulta essere nella bocca di entrata e uscita della girante con valori che si aggirano intorno ai 0.28 [mm] la deformazione minima è di circa 0.005 [mm].

- RISULTATI CON L'APPLICAZIONE DEI SUPPORTI A SUPERFICIE (ROD E A BLOCCHI):
- *Deformazioni sulla geometria della girante durante il processo di stampa:*

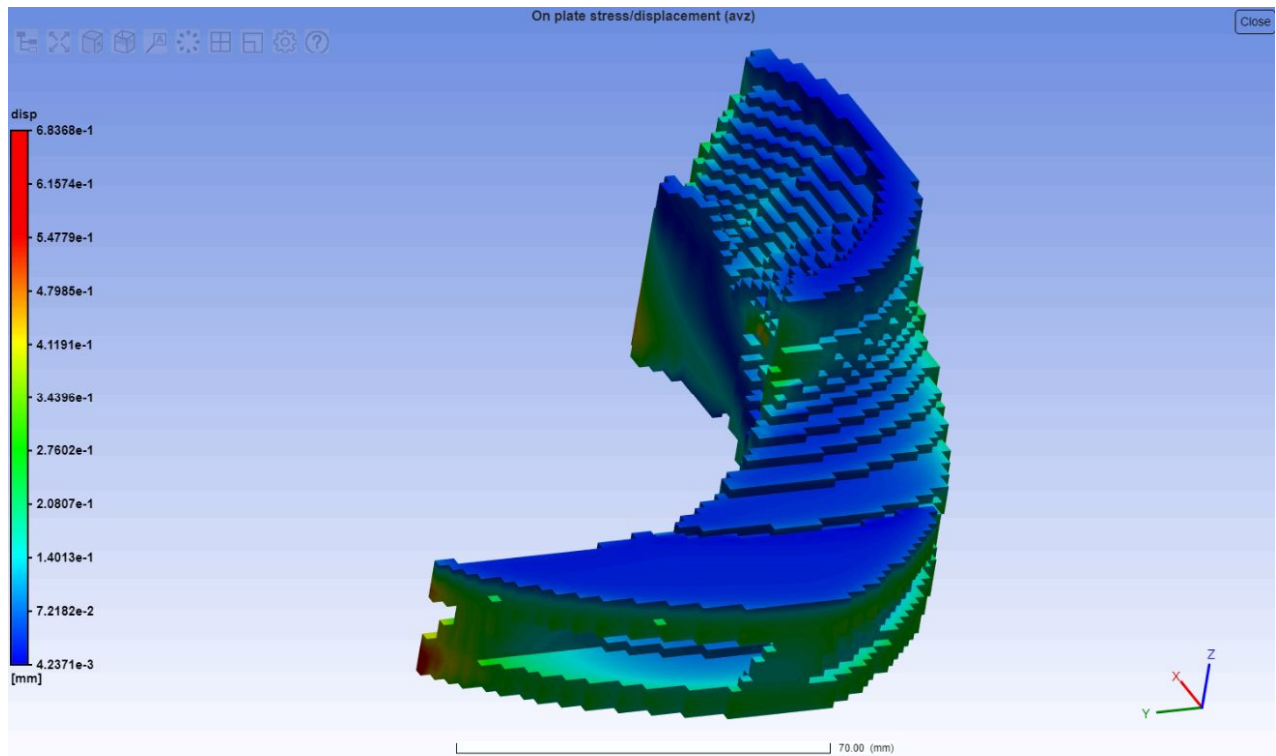


Figura 58: deformazione della girante sul piatto di stampa, con applicati i supporti a superficie

Anche in questo caso tralasciamo gli effetti di bordo. Dalla scala notiamo che la deformazione massima ha un valore di circa 0.39 [mm] e si trova sempre in corrispondenza della corona circolare esterna, mentre la deformazione minima ha un valore di 0.004 [mm].

- ***Deformazioni sulla struttura di supporto della girante durante il processo di stampa:***

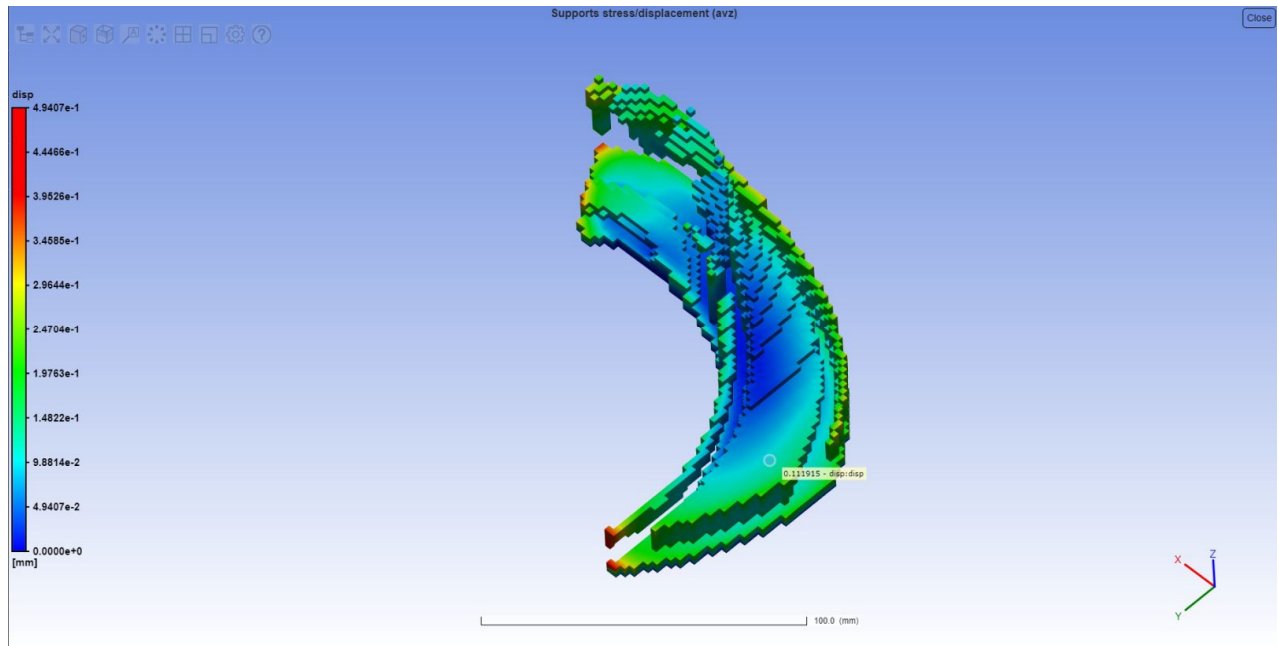


Figura 59: deformazione della struttura di supporto sul piatto di stampa, con applicati supporti a superficie

La deformazione massima in questo caso risulta essere nelle bocche di ingresso e di uscita della turbina con un valore di circa 0.27 [mm] mentre la deformazione minima come deducibile dalla scala risulta essere pari a zero.

4.3.2 Analisi delle possibili collisioni con il re-coating roller

Le zone in cui le deformazioni del singolo layer superano un valore limite sono soggette a possibili collisioni con il re-coating roller. Nei seguenti risultati di simulazione è possibile individuare queste zone poiché vengono evidenziate in rosso dal software.

➤ **RISULTATI CON L'APPLICAZIONE DEI SUPPORTI DI TIPO GYROID:**

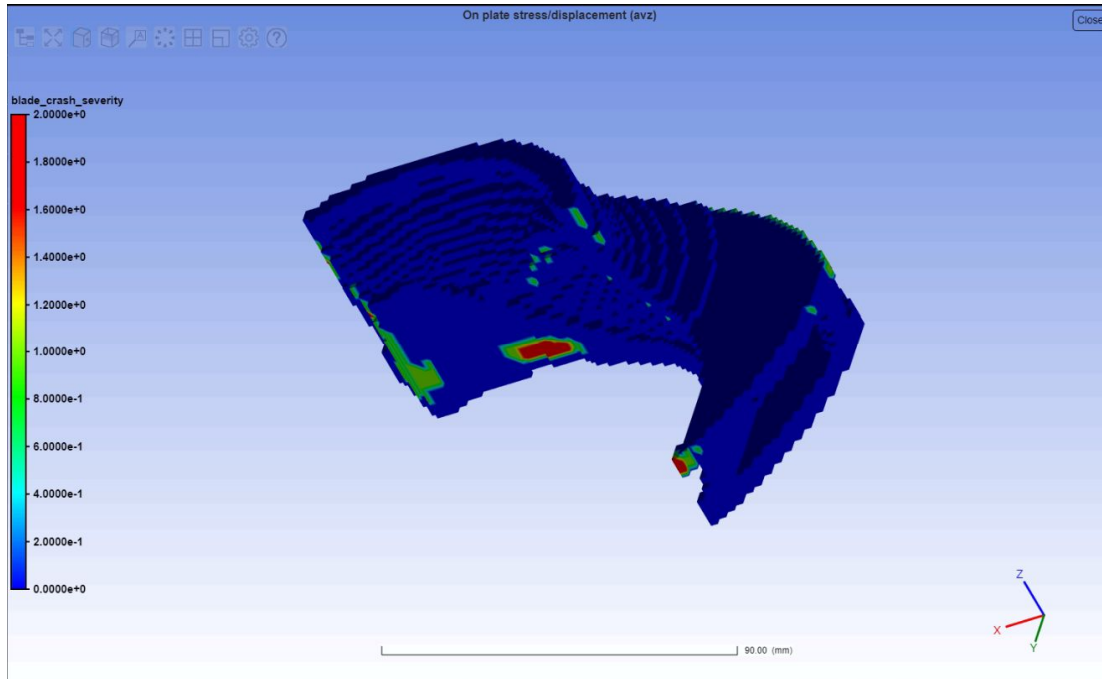


Figura 60: blade crash con supporti Gyroid

➤ **RISULTATI CON L'APPLICAZIONE DEI SUPPORTI A SUPERFICIE (ROD E A BLOCCHI):**

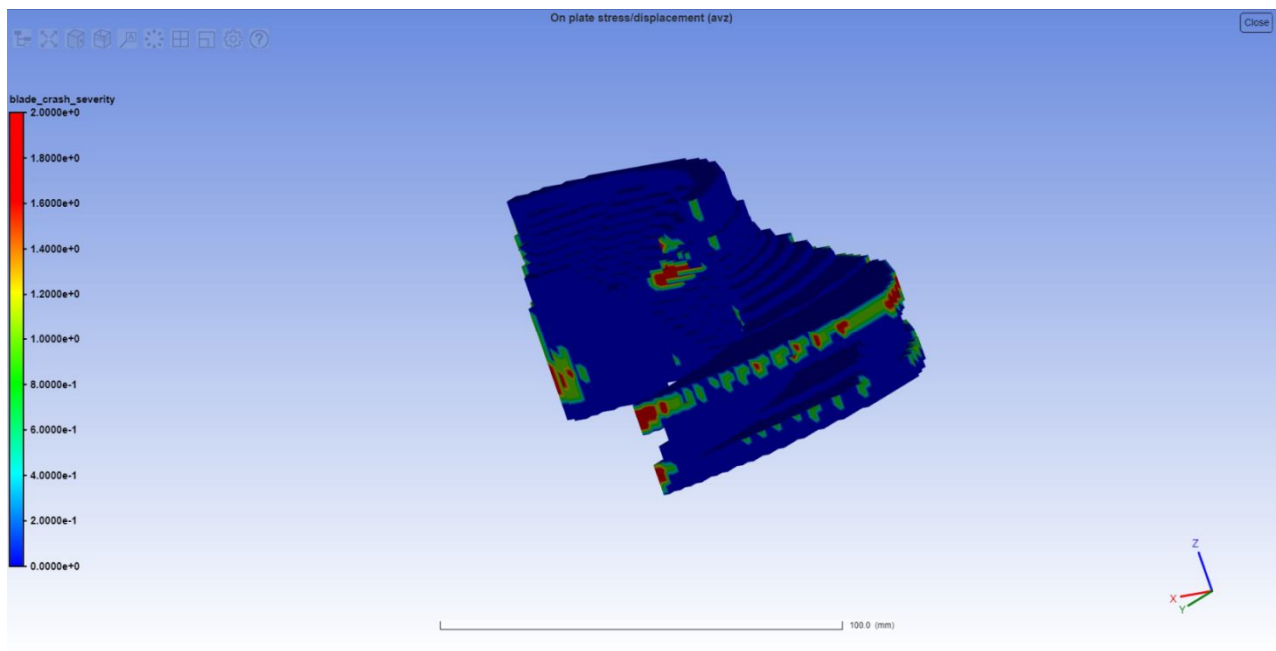


Figura 61: blade crash con supporti a superficie

Analizzando i risultati ottenuti si può concludere che le zone critiche sono in prossimità della zona di taglio della geometria, per cui possono essere influenzate dagli effetti di bordo.

4.3.3. Analisi delle tensioni equivalenti di Von-Mises durante la fase di stampa

➤ RISULTATI CON L'APPLICAZIONE DEI SUPPORTI DI TIPO GYROID:

- *Tensioni equivalenti di Von-Mises sulla geometria della girante durante il processo di stampa:*

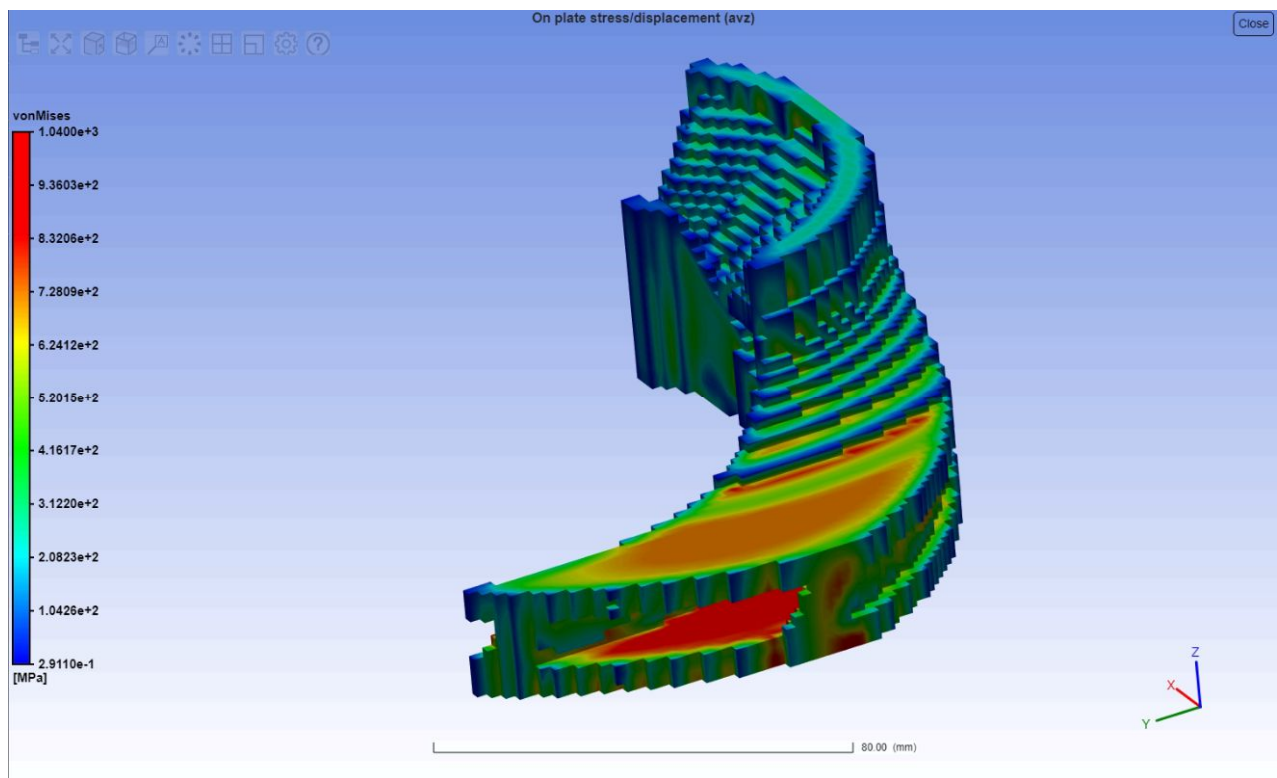


Figura 62: tensioni equivalenti di Von-Mises componente (Gyroid)

Analizzando i risultati si può notare che la parte inferiore del vano girante presenta valori di tensione equivalenti pari a 936 MPa superando così la tensione di snervamento del materiale 827 MPa, ma questo risultato può essere influenzato dal fatto che per lo studio della stampabilità con i supporti Gyroid non sono stati applicati supporti fra componente e piatto di stampa. Inoltre, anche la parte

superiore della cavità presenta valori di tensione elevati intorno ai 720 MPa che sono prossimi alla tensione di snervamento. Per cui è consigliabile effettuare dei trattamenti termici di post-processing per eliminare le tensioni residue.

- ***Tensioni equivalenti di Von-Mises sulla struttura di supporto della girante durante il processo di stampa:***

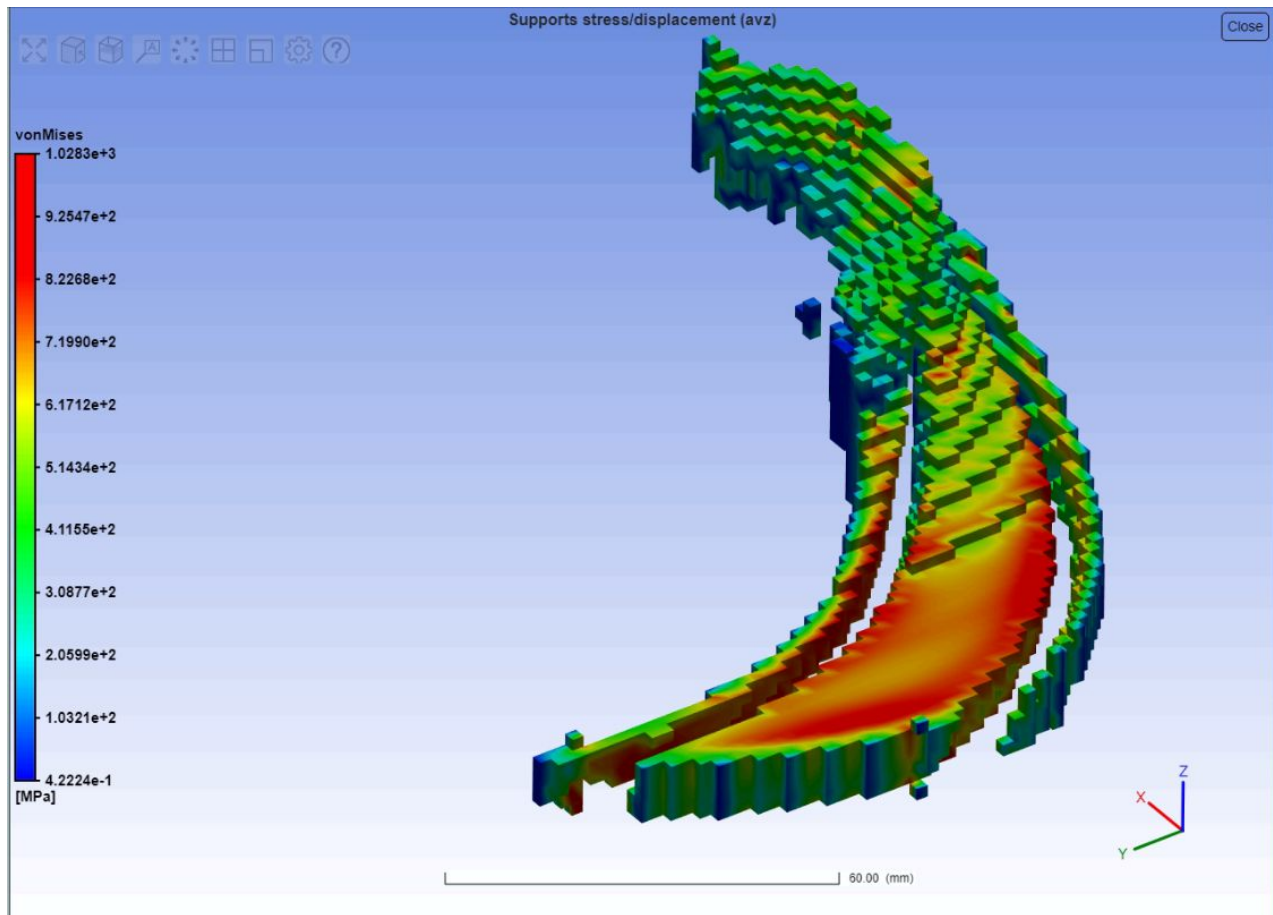


Figura 63: tensioni equivalenti di Von-Mises supporti (Gyroid)

Tralasciando i soliti effetti di bordo, si può concludere che il valore massimo di tensione equivalente è di circa 730 MPa, mentre il valore minimo risulta essere di 0.42 MPa.

- RISULTATI CON L'APPLICAZIONE DEI SUPPORTI A SUPERFICIE (ROD E A BLOCCHI):
- *Tensioni equivalenti di Von-Mises sulla geometria della girante durante il processo di stampa:*

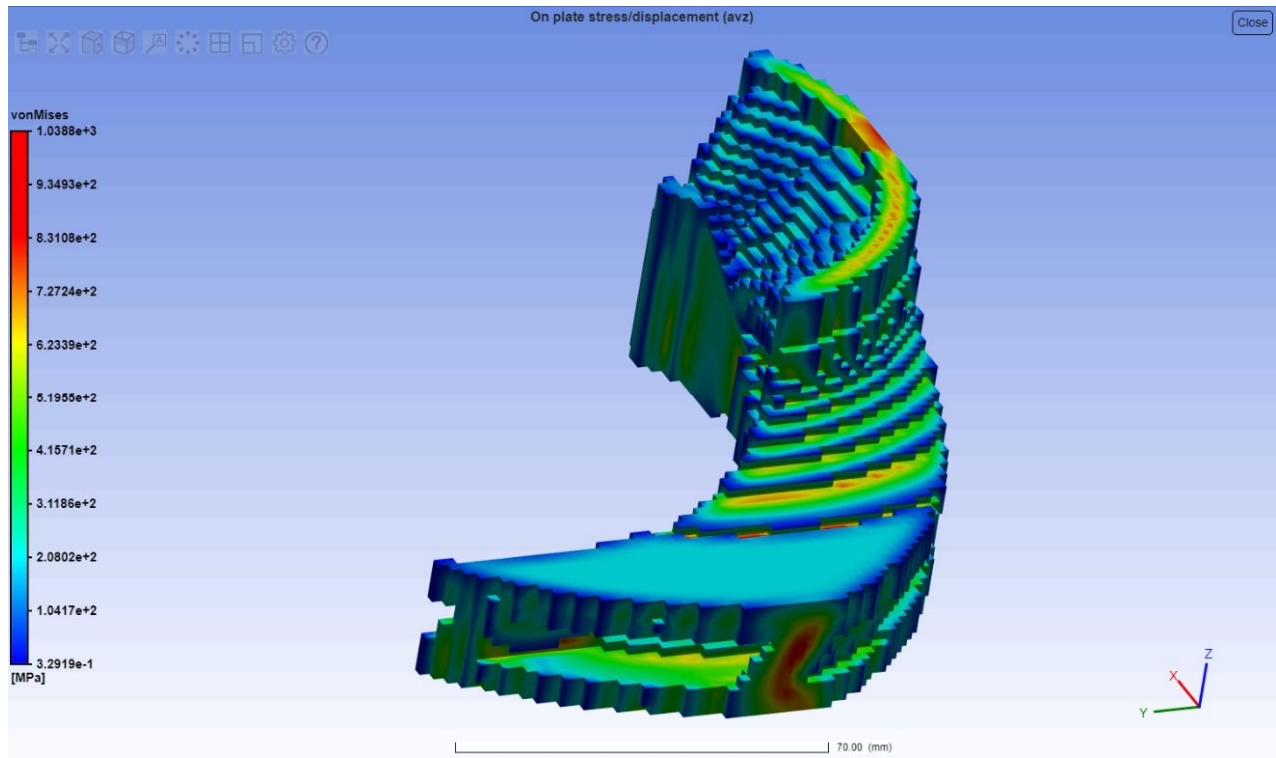


Figura 64: tensioni equivalenti di Von-Mises componente (ROD e a BLOCCHI)

Tralasciando i soliti effetti di bordo, si può concludere che il valore massimo di tensione equivalente è di circa 650 MPa, mentre il valore minimo risulta essere di 0.33 MPa.

- **Tensioni equivalenti di Von-Mises sulla struttura di supporto della girante durante il processo di stampa:**

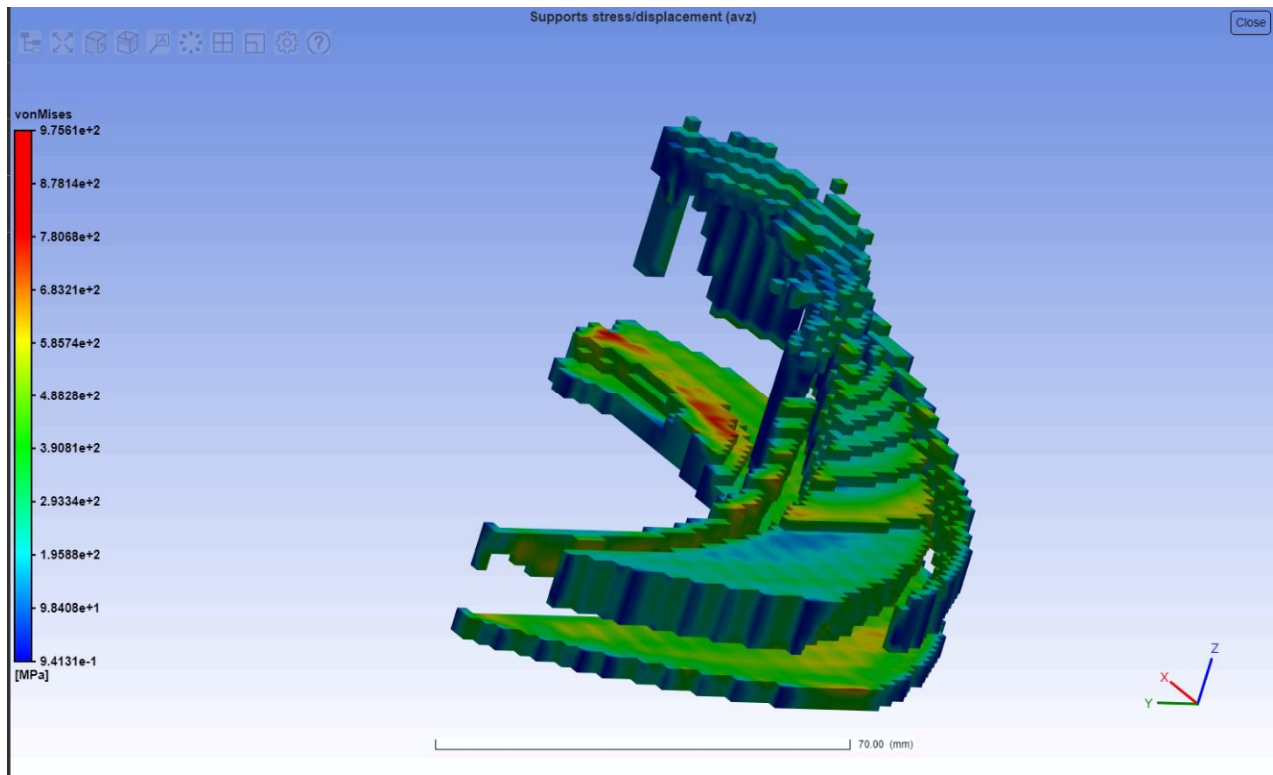


Figura 65: tensioni equivalenti di Von-Mises supporti (ROD e a BLOCCHI)

Tralasciando i soliti effetti di bordo, si può concludere che il valore massimo di tensione equivalente è di circa 600 MPa, mentre il valore minimo risulta essere di 0.94 MPa.

4.4. Confronto tra i risultati ottenuti per le due tipologie di supporto analizzate

- Confronto fra le deformazioni sulla geometria della girante

<i>Tipologia di supporto applicata alla geometria</i>	<i>Deformazione minima [mm]</i>	<i>Deformazione massima [mm]</i>	<i>Deformazione media [mm]</i>
Gyroid	0	0.28	0.24
Rod e a blocchi	0.004	0.39	0.34

Figura 66: tabella di confronto delle deformazioni sulla girante

- Confronto fra le deformazioni sulla struttura di supporto della girante

<i>Tipologia di supporto</i>	<i>Deformazione minima [mm]</i>	<i>Deformazione massima [mm]</i>	<i>Deformazione media [mm]</i>
<i>Gyroid</i>	0.005	0.28	0.23
<i>Rod e a blocchi</i>	0	0.27	0.24

Figura 67: tabella di confronto delle deformazioni sulla struttura di supporto

- Confronto fra le tensioni equivalenti di Von-Mises che si generano sulla geometria della girante

<i>Tipologia di supporto</i>	<i>Tensione equivalente minima [MPa]</i>	<i>Tensione equivalente massima [MPa]</i>	<i>Tensione equivalente media [MPa]</i>
<i>Gyroid</i>	0.29	936	520
<i>Rod e a blocchi</i>	0.33	650	519

Figura 68: tabella di confronto delle tensioni equivalenti di Von-Mises sulla girante

- Confronto fra le tensioni equivalenti di Von-Mises che si generano sulla struttura di supporto

<i>Tipologia di supporto</i>	<i>Tensione equivalente minima [MPa]</i>	<i>Tensione equivalente massima [MPa]</i>	<i>Tensione equivalente media [MPa]</i>
<i>Gyroid</i>	0.42	730	514
<i>Rod e a blocchi</i>	0.94	600	488

Figura 69: tabella di confronto delle tensioni equivalenti di Von-Mises sulla struttura di supporto

- Confronto tra i volumi delle strutture di supporto

<i>Tipologia di supporto</i>	<i>Volume [mm³]</i>
<i>Gyroid</i>	61191
<i>Rod e a blocchi</i>	78655

Figura 70: tabella di confronto dei volumi delle strutture di supporto

CONCLUSIONE

Lo scopo del presente lavoro di tesi è stato quello di verificare l'effettiva stampabilità di una girante centrifuga e di individuare la più adatta strategia di supportazione da applicare al componente.

Nello specifico, si è optato per lo sviluppo di strutture di supporto a superficie (*ROD e blok support*) e di strutture lattice costituite dalla ripetizione nelle tre dimensioni x, y, z della cella elementari del tipo *Shoen Gyroid*.

Partendo dall'analisi dei processi produttivi che utilizzano tecnologie additive, è stata eseguito un esame accurato dei risultati emersi dal caso di studio.

Dopodiché sono state valutate diverse morfologie di supporti, per capire quale tra le tipologie indagate fosse la più indicata per i vani interni della girante oggetto di studio, basandoci sui requisiti di stampabilità richiesti dal progetto.

Per evitare tempi di calcolo eccessivi in fase di simulazione, si è pensato di studiare un singolo canale con metà dei due vani adiacenti, in modo da limitare gli effetti di bordo e da approssimare il comportamento dell'intera girante.

Successivamente è stata modellata la struttura di supporto all'interno del vano preso in esame, tramite l'utilizzo di software appositamente selezionati in base alla tipologia di supporto da realizzare.

L'ultima fase del presente lavoro è stata quella di simulare il processo di stampa del vano della girante con entrambe le strutture di supporto prese in esame. Infine, sono stati confrontati i risultati ottenuti dalle simulazioni in termini di:

- entità delle deformazioni istantanee ottenute durante e al termine della fase di stampa;
- presenza di eventuali collisioni fra il re-coating roller e il pezzo in stampa;
- valore delle tensioni equivalenti di Von-Mises durante la fase di stampa.

E' stato possibile notare come, analizzando i risultati ottenuti dalle simulazioni, il componente realizzato tramite l'implementazione di una struttura di supporto lattice del tipo *Shoen Gyroid* presenti dei valori di deformazione al termine della fase di stampa inferiori rispetto a quelli dello stesso componente realizzato con supporti a

superficie. I risultati di entrambe le simulazioni forniscono elevati valori di tensioni equivalenti, prossimi o addirittura superiori alla tensione di snervamento del materiale, motivo per cui al termine del processo di stampa sarà opportuno valutare se sottoporre o meno le parti stampate a specifici trattamenti termici atti ad eliminare le tensioni residue che altrimenti comporterebbero la rottura del componente. Inoltre, il canale della girante con le strutture di supporto del tipo Gyroid al suo interno è stato simulato, per semplicità e per ridurre i tempi di simulazione, attaccato al piatto di stampa, mentre lo stesso componente con all'interno supporti a superficie è stato simulato considerando l'applicazione di strutture di supporto a blocco tra la base della girante e il piatto di stampa. In relazione al volume di supporto totale calcolato in entrambi i casi, la struttura di supporto reticolare, sulla base dei valori dei parametri geometrici considerati in questo lavoro, risulta essere meno massiva di quella a superficie, pertanto comporta meno spreco di materiale per la realizzazione del supporto.

Analizzando l'eventuale collisione del job con il re-coating roller, si comprende come i risultati ottenuti in termini di tensioni e deformazioni vengano influenzati dalle condizioni al contorno (presenza di spigoli vivi dovuti alla geometria del vano e responsabili di elevate tensioni e deformazioni localizzate). Sono pertanto evidenti importanti collisioni del job con il recoater in corrispondenza delle zone prossime alla sezione di taglio, mentre per il resto della geometria non si notano collisioni tali da compromettere la stampabilità del componente.

In definitiva, dai risultati delle simulazioni del processo di stampa, si può affermare che la scelta di strutture di supporto lattice del tipo Gyroid risulta essere più vantaggiosa rispetto ai supporti a superficie, poiché comportano una minore deformazione del componente in fase di stampa, e un minor dispendio di materiale impiegato per la generazione del reticolo.

Per ottenere risultati più precisi, è necessario estendere le analisi all'intera geometria della girante, in quanto così facendo si andrebbero ad annullare gli effetti di bordo che vanno ad influenzare negativamente i risultati delle simulazioni di stampa.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA:

- Forcellese A., dispense dal corso di “Tecnologia Meccanica” A.A. 2019-2020, in learn.univpm.it
- Diab W. Abueidda, Mohamed Elhebeary, Cheng-Shen Shiang, Siyuan Pang, Rashid k. Abu Al-rub, Iwona M. Jasiuk, (2019). “*Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellularstructures: Experimental andfinite element study*”, in ScienceDirect.com.
- Tobias Maconachie, Martin Leary, Bill Lozanovsky, Xuezhe Zhang, Ma Qian, Omar Faruque, Milan Brandt (2019). “*SLM lattice structures: Properties, performance, applications andchallenges*”, in ScienceDirect.com.
- Stefano D’Accurzio, tesi di laurea magistrale “Tecniche e strumenti per la progettazione di supporti nella realizzazione di componenti in additive manufacturing”, A.A. 2019-2020.

SITOGRAFIA:

- <https://www.zare.it/additive-manufacturing-definizione-vantaggi>
- <https://www.zare.it/materiali/inconel-718>
- <https://wewanttolearn.wordpress.com/2019/02/03/tripty-periodic-minimal-surfaces/>
- <https://www.meccanicaneews.com/additive-manufacturing/>
- <https://www.ansys.com/support/spaceclaim-support>
- <https://support.ntopology.com/hc/en-us>

RINGRAZIAMENTI

I miei ringraziamenti vanno innanzitutto alla mia famiglia, ai miei amici e a tutte le persone che mi sono state vicine in questo percorso.

Un ringraziamento speciale va anche al Prof. Michele Germani per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso di tirocinio, al Prof. Paolo Cicconi e al Prof. Marco Mandolini, per avermi guidato nell'analisi e nella stesura della tesi, al Dott. Alberto Santoni per avermi seguito da vicino durante tutto il tirocinio, fornendomi il materiale, il supporto e le conoscenze necessarie per lo sviluppo della tesi e del lavoro.