



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Riprogettazione di componenti con tecniche di Additive Manufacturing

Redesign of components with Additive Manufacturing techniques

Relatore:

Prof. Michele Germani

Tesi di laurea di:

Marco Marusco

Correlatore:

Prof. Marco Mandolini

“Avrete abbastanza tempo per scegliere il vostro cammino.

A volte,

*scoprirete che il cammino non esisteva
fino a che non avrete fatto il primo passo.*

Non ha importanza.

L’unica cosa che conta è amare camminare.”

I. Ringraziamenti

Il tempo investito nel mio percorso accademico si è trasformato in conoscenza, esperienza e ricordi. Questo è il solo bagaglio che scelgo di portare con me, mentre viaggerò seguendo la mappa che contiene tutte le strade per scegliere il percorso per il mio futuro.

Ringrazio il relatore della mia tesi Michele Germani e il correlatore Marco Mandolini per avermi dato questa opportunità ed avermi guidato e supportato nella fase più importante del mio percorso accademico.

Dedico questo mio traguardo ai miei genitori Vincenzo e Rita, per tutti i loro sacrifici che mi hanno permesso di inseguire i miei sogni. A voi devo tutto e spero di dare molte altre soddisfazioni.

Ringrazio le mie sorelle Maria Grazia e Michela per essermi state sempre vicine quando ne avevo bisogno.

Ringrazio i miei zii Gabriella e Fernando.

Alla persona che più ho trascurato, con la quale ho condiviso questo percorso e che mi ha donato la sua forza per rialzarmi nei momenti più difficili. Alla mia ragazza, grazie Francesca.

Ringrazio Jonni e Daniele.

Ringrazio Ettore, Patrizia, Andrea e Agnese per avermi accolto nella loro famiglia e avermi sostenuto in questo percorso.

Ringrazio Giovanna, alla quale auguro altrettante soddisfazioni.

Ringrazio i miei amici Matteo, Mara, Mattia e Cristina.

Ringrazio tutti i miei colleghi e tutte le persone che ho incontrato nel mio percorso che hanno contribuito ad arricchire il mio bagaglio di esperienze e ricordi indimenticabili.

A te che sicuramente saresti stato fiero di me, grazie nonno.

II. Sommario

I. Ringraziamenti	1
II. Sommario	i
III. Elenco delle figure	iii
IV. Elenco delle tabelle	v
1 Introduzione	1
2 Additive Manufacturing	3
2.1 Storia dell'additive manufacturing	3
2.2 Principali applicazioni	6
2.3 Vantaggi e svantaggi	8
3 Additive manufacturing per la stampa dei metalli- Stato dell'arte	12
3.1 Direct Energy Deposition (DED)	13
3.2 Powder Bed Fusion (PBF)	14
3.2.1 Selective Laser Melting (SLM)	15
3.3 Hybrid Manufacturing	15
3.4 Inconel 718	16
3.5 Supporti	17
3.6 Post-processo di stampa	18
4 Simulazione del processo di stampa	20
4.1 Software	21
4.1.1 Ansys	21
4.1.2 Siemens NX	22
4.2 Workflow	25
4.2.1 Modulo NX: Additive Manufacturing	25
4.2.2 Modulo simulazione in Pre/Post	28
5 Caso di studio	39
5.1 Modellazione della girante	41
5.1.1 Scelta dei supporti	42
5.2 Simulazione della girante	44
6 Risultati e discussione	60
6.1 Possibili sviluppi futuri	60

7	Conclusioni	62
8	Bibliografia e sitografia	64

III. Elenco delle figure

Figura 1 Schema stampante SLA.....	4
Figura 2 Schema stampante SLS.....	5
Figura 3 Schema stampante FDM	5
Figura 4 Schema stampante EBM.....	6
Figura 5 Processo di stampa AM.....	12
Figura 6 Schema Direct Energy Deposition	13
Figura 7 Schema Powder Bed Fusion	14
Figura 8 Esempio Hybrid manufacturing	16
Figura 9 Polvere di Inconel 718.....	17
Figura 10 Esempio di una girante supportata	18
Figura 11 Ansys	21
Figura 12 Siemens NX.....	22
Figura 13 Simulation workflow NX.....	23
Figura 14 Nuovo file in NX Additive Manufacturing	25
Figura 15 Workflow in NX Additive Manufacturing	26
Figura 16 Selezione della stampante.....	26
Figura 17 Build volume	26
Figura 18 Parte supportata all'interno del build volume	27
Figura 19 Workflow Process Simulation	27
Figura 20 Workflow simulazione dalla scheda Additive Manufacturing	29
Figura 21 Gruppo "Printer Settings"	30
Figura 22 Finestra di dialogo "Global Settings"	30
Figura 23 Finestra di dialogo "Print Jobs"	31
Figura 24 Finestra di dialogo "Print Job Parameters"	32
Figura 25 Finestra di dialogo "Per Specimen Properties"	32
Figura 26 Gruppo FEM preparation	33
Figura 27 Slicing Termico	33
Figura 28 Slicing Meccanico	34
Figura 29 Gruppo "Model Preparation"	35

Figura 30 Proprietà mesh parte (A) e proprietà mesh del supporto immerso (B)	36
Figura 31 Mesh Vano Singolo della Girante	36
Figura 32 Gruppo "Simulation Process"	37
Figura 33 Finestra dialogo "opzioni di calcolo"	37
Figura 34 Gruppo "post processing"	38
Figura 35 Gruppo "Export"	38
Figura 36 Vista in prospettiva Vano Singolo	41
Figura 37 Vista dall'alto Vano Singolo.....	41
Figura 38(a) Vista frontale girante tagliata; (b) Vista in prospettiva girante tagliata; (c) Vista dall'alto girante tagliata	42
Figura 39 Vano singolo con supporti interni a blocco	43
Figura 40 Vano singolo con supporti di volume sulla base	43
Figura 41 Mesh "grossolana" del vano singolo	45
Figura 42 Risultati termici vano singolo con mesh "grossolana"	45
Figura 43 Risultati deformazione totale vano singolo con mesh "grossolana"	47
Figura 44 Risultati deformazioni localizzate lungo l'asse z del vano singolo con mesh "grossolana" ...	47
Figura 45 Collisioni recoater vano singolo con mesh "grossolana"	49
Figura 46 Mesh "fine" del vano singolo	51
Figura 47 Risultati termici vano singolo con mesh "fine"	51
Figura 48 Deformazione totale vano singolo con mesh "fine"	53
Figura 49 Deformazione localizzata lungo l'asse Z vano singolo con mesh "fine"	54
Figura 50 Collisioni con il recoater vano singolo con mesh "fine"	55
Figura 51 Mesh 3 vani più 3 vani opposti	56
Figura 52 Risultati termici 3 vani più 3 vani opposti.....	57
Figura 53 Deformazione totale 3 vani più 3 vani opposti.....	58
Figura 54 Deformazioni localizzate lungo Z girante con 3 vani più 3 vani opposti.....	58

IV. Elenco delle tabelle

Tabella 1 Parametri di processo.....	40
Tabella 2 Parametri della prima simulazione del vano singolo	44
Tabella 3 Riepilogo risultati termici vano singolo con mesh "grossolana"	46
Tabella 4 Riepilogo deformazioni vano singolo con mesh "grossolana"	48
Tabella 5 Riepilogo collisioni recoater vano singolo con mesh "grossolana"	49
Tabella 6 Parametri della seconda simulazione del vano singolo	50
Tabella 7 Risultati termici vano singolo con mesh "fine"	52
Tabella 8 Confronto deformazioni tra 1°e 2° simulazione	54
Tabella 9 Riepilogo collisioni recoater vano singolo con mesh "fine"	55
Tabella 10 Confronto risultati termici	57
Tabella 11 Confronto deformazioni	59
Tabella 12 Collisioni recoater	59

1 Introduzione

Il seguente lavoro di tesi si è basato su un ampio progetto che si svilupperà nel corso di più anni in collaborazione con un'azienda con l'obiettivo di realizzare giranti per compressori centrifughi in Inconel 718 mediante la tecnologia di additive manufacturing denominata "Powder Bed Fusion" (a letto di polvere). Nello specifico si utilizzerà il processo chiamato "Selective Laser Beam Melting".

Tale studio è stato intrapreso prendendo in considerazione i risultati ottenuti da un precedente studio effettuato all'interno del DIISM:

- Orientare orizzontalmente la girante rispetto al piatto di stampa per poter contenere i costi di produzione e per conservarne il più possibile l'isotropia.
- Utilizzare come materiale l'INCONEL 718 che è una lega di nichel resistente ad alte temperature e corrosione. Quest'ultimo è ideale per applicazioni ad alte temperature come parti di turbine a gas ed impianti industriali, come in questo caso, oltre che per applicazioni criogeniche.
- Verificare la stampabilità del pezzo assicurando che il recoater non impatti con la geometria deformata
- Controllare che le deformazioni siano contenute entro i limiti delle tolleranze al termine del processo.

Come primo step sono state effettuate delle ricerche nell'ambito dello stato dell'arte del design for additive manufacturing sia per quanto riguarda la geometria sia per quanto riguarda i supporti.

Su questi ultimi ci si è soffermati a lungo, studiando in particolar modo la morfologia e l'ottimizzazione della geometria più adatte nel caso in esame.

I supporti, infatti, sono fondamentali per diversi aspetti, quali: ancorare il pezzo al piatto di stampa, supportare le superfici con un angolo al di sotto di 45°, dissipare calore evitando distorsioni del pezzo e resistere alle sollecitazioni meccaniche.

L'analisi è proseguita studiando in modo dettagliato il modulo di simulazione di Siemens NX, valutando ogni tipologia di parametri da modificare. Contemporaneamente si è simulato il processo di stampa nel modulo Additive Manufacturing in Pre/Post introducendo tutti gli opportuni parametri di stampa studiati in precedenza.

In questo modo si è potuto stabilire quale fosse la migliore condizione di simulazione che permettesse di ottenere valori di deformazioni più vicini agli intervalli di tolleranza richiesti.

2 Additive Manufacturing

“A process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies”: è la definizione di additive manufacturing (AM) fornita da ASTM International (American Society for Testing and Materials).

L'Additive Manufacturing (AM), nota anche come stampa 3D, è una famiglia di tecnologie basate sul principio di funzionamento della stratificazione progressiva di materiale su livelli (layer) sovrapposti lungo “l'asse Z”, al fine di ottenere un oggetto tridimensionale. Questo processo è in opposizione alle tradizionali tecnologie di manifattura sottrattiva in cui un oggetto viene creato rimuovendo materiale da un blocco pieno fino ad ottenere la forma finale. L'AM offre flessibilità di progettazione e consente la realizzazione di parti con complesse geometrie, da realizzare con il minimo spreco di materiale. Sempre più spesso, l'AM viene utilizzato per riprogettare e fabbricare parti industriali metalliche complesse.

2.1 Storia dell'additive manufacturing

Seppur considerata l'innovazione dell'ultimo secolo, le origini dell'additive manufacturing risalgono all'inizio degli anni '80 nel campo della topografia e della fotoscultura con il brevetto di un dispositivo in grado di polimerizzare polimeri fotosensibili mediante l'utilizzo di luce ultravioletta, secondo un approccio di costruzione stratificato, per la prototipazione rapida di oggetti.

Questa prima forma di Additive Manufacturing risale appunto al 1982 e prese il nome di “Stereolitografia” (SLA), fu opera del signor Chuck Hull che fondò così la prima realtà commerciale di rapid prototyping.

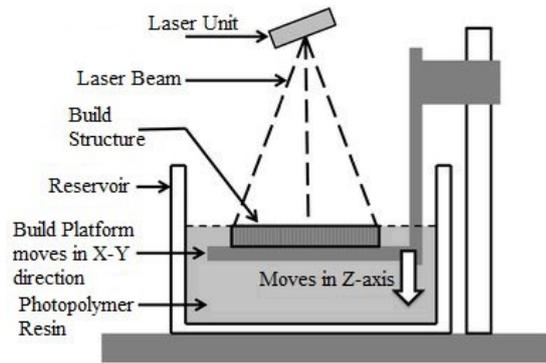


Figura 1 Schema stampante SLA

Il dispositivo, ideato dall'ingegnere americano e descritto nel suo brevetto, consiste in una vasca contenente una superficie sulla quale viene progressivamente versata una resina termosensibile liquida. Un fascio di luce ultravioletta concentrata colpisce lo strato di resina presente sulla superficie che, solidificandosi, costituisce ciascuno strato dell'oggetto desiderato. A Hull bisogna riconoscere un ulteriore merito, di fondamentale importanza nell'ambito dell'AM, ovvero l'invenzione del formato di file STL (STereoLithography interface format), ancora oggi ampiamente utilizzato da numerosi software impiegati nel campo della stampa tridimensionale.

Il passo successivo fu compiuto da Carl Deckard, Joe Beamen e Paul Forderhase presso l'Austin's Department of Mechanical Engineering della Texas University. A partire dal 1984, essi incominciarono a lavorare per lo sviluppo di una nuova metodologia, la Selective Laser Sintering (SLS), che a differenza della precedente si caratterizzava dell'utilizzo di polimeri termoplastici in forma di polveri e non sotto forma liquida. In questo caso, un sottile strato di polvere viene depositato su una superficie e un apposito laser provoca la sinterizzazione delle particelle laddove necessario, creando così uno strato di materiale solido.

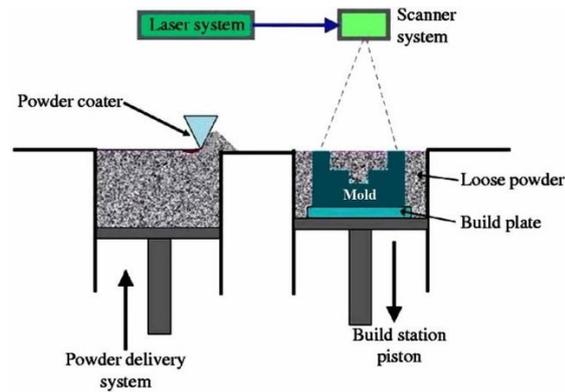


Figura 2 Schema stampante SLS

All'ingegnere meccanico Scott Crump fu dovuta l'invenzione di una nuova metodologia di AM denominata Fusion Deposition Modelling (FDM), questa tecnologia consiste nel realizzare i diversi strati sovrapposti attraverso la deposizione di un filamento di materiale termoplastico contenuto in un bobina e quindi estruso; l'estrusione avviene mediante due testine, una per il materiale del componente e l'altra per il materiale del supporto, che si muovono sul piano XY e depositano i filamenti su di una piattaforma di lavoro.

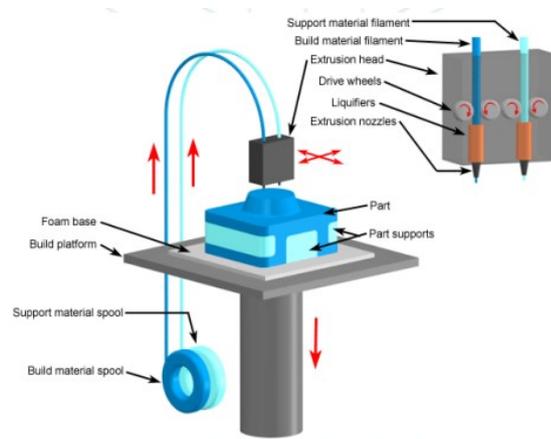


Figura 3 Schema stampante FDM

Un anno di svolta per l'Additive Manufacturing è il 1995, per la prima volta la tecnologia permise di fondere polveri di metallo e realizzare oggetti con una densità paragonabile a quella ottenibile con l'industria tradizionale. Tale risultato è stato possibile attraverso la tecnica del Selective Laser Melting (SLM), sviluppata dai tedeschi del Fraunhofer Institute. Il processo è analogo a quello della Selective Laser Sintering con l'aggiunta di alcuni accorgimenti dovuti alla natura del materiale metallico.

Successivamente, nel 2002, venne sviluppato l'Electron Beam Melting (EBM), la tecnologia consiste nel colpire con un fascio di elettroni, opportunamente focalizzato e accelerato, uno strato di polvere metallica, durante l'impatto l'energia cinetica si trasforma in energia termica e permette la completa fusione delle polveri garantendo una densità ancora maggiore rispetto al Selective Laser Melting.

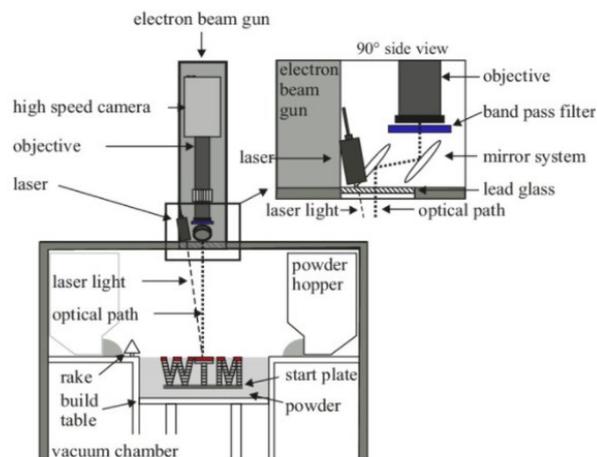


Figura 4 Schema stampante EBM

2.2 Principali applicazioni

Le principali applicazioni della stampa 3D, ad oggi, possono essere racchiuse in 3 macroaree:

- **“Rapid Prototyping”**, ovvero l’insieme di tecniche industriali volte alla realizzazione fisica del prototipo, in tempi relativamente brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell’oggetto (CAD). Prima la costruzione era affidata ad artigiani o modellisti con aumento dei costi e dei tempi di realizzazione. La tecnologia AM più sfruttata in questo senso è sicuramente quella basata sull’utilizzo di polimeri, in quanto permette di abbattere notevolmente i costi. Analizzando tali prototipi si ha la possibilità di valutarne le caratteristiche e implementare eventuali modifiche prima dell’esecuzione del vero e proprio prodotto finito, con conseguente riduzione dei costi di fabbricazione. L’utilizzo di una metodologia di questo genere ha la potenzialità

di ridurre i costi correlati alla produzione di un nuovo prodotto fino al 70% e il tempo necessario all'introduzione di quest'ultimo sul mercato fino al 90%;

- *"Rapid Tooling"* tecnica che consente, in tempi molto più rapidi, di realizzare attrezzature e utensili per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico. Rispetto ai processi tradizionali, la produzione additiva garantisce un sensibile risparmio di tempo e inoltre il costo non è legato alla forma. Dal momento che nella stampa 3D ogni componente viene realizzato direttamente dai dati CAD, non è necessario alcun utensile aggiuntivo. Questo comporta una riduzione del lavoro necessario e, di conseguenza, del rischio di errori nel processo produttivo;
- *"Rapid Manufacturing"* con cui si intende la produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente. 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. Soprattutto negli ultimi anni, grazie alla raffinazione delle tecniche adoperate e all'aumento della gamma di materiali a disposizione (polimeri, acciai, leghe metalliche a base di nichel, cromo, alluminio e titanio, biomateriali), l'AM ha notevolmente ampliato i suoi possibili campi di applicazione, venendo sempre più adoperata per la produzione di prodotti finiti.

L'AM si sta, quindi, sviluppando in tutti quei settori industriali che risentono di elevati costi di produzione, bassi volumi produttivi e difficoltà nel reperire materie prime a basso prezzo, ovvero:

- Industria aerospaziale, automotive e marina. L'AM consente in tal campo di integrare più parti in un unico componente e di realizzare parti metalliche in leghe di titanio e, in generale, pezzi dalla geometria complessa, con elevate performance e affidabilità, e caratterizzati da un minore peso rispetto a quelli ottenibili con le metodologie tradizionali, quali parti di turbine, componenti del motore, sistemi di raffreddamento e sistemi di scarico.

- Industria medicale. In questo settore le tecnologie di manifattura additiva possono essere utilizzate sia per la realizzazione di prototipi in campo medico (utili nel campo nella formazione o nella pianificazione e simulazione di interventi chirurgici particolarmente complessi) che per la produzione di protesi altamente customizzate, impianti dentali, strumenti medici, apparecchi acustici, sistemi per il rilascio controllato di farmaci, scaffold per la rigenerazione di tessuti danneggiati e altri dispositivi biomedicali.
- Industria dell'arte, dell'architettura e della moda. L'AM viene impiegata per la costruzione di prototipi molto accurati che consentono di ridurre notevolmente i tempi di ideazione e fabbricazione di modelli architettonici elaborati, gioielli, abbigliamento, calzature e complementi d'arredo.
- Industria dell'elettronica. Negli ultimi anni sono state compiute numerose ricerche aventi lo scopo di valutare le potenzialità di utilizzo della stampa 3D per la realizzazione di componenti elettronici sia di tipo attivo che di tipo passivo, come resistori, condensatori, induttori, antenne, transistor, LED e batterie.

2.3 Vantaggi e svantaggi

I diversi metodi di Fabbricazione Additiva presentano vantaggi e svantaggi, ognuno rispetto agli altri, riconducibili alle loro specifiche caratteristiche del processo produttivo; tuttavia, mettendoli in contrapposizione con le tecniche tradizionali, è possibile identificare una serie di benefici e limiti riconducibili all'intera categoria.

Tra i principali vantaggi dell'AM si possono annoverare:

- Elevate potenzialità di innovazione. Grazie alle procedure impiegate, l'AM consente di ottenere prodotti caratterizzati da elevate performance e funzionalità. I tempi e i costi di realizzazione dipendono solo dalle dimensioni del pezzo e non dalla sua complessità geometrica, questo è forse l'aspetto più rilevante della Fabbricazione Additiva. Mentre nelle tecniche tradizionali il costo per ciascuna unità aumenta in maniera esponenziale al crescere della sua complessità

geometrica. Allo stesso modo, permette di integrare più parti in un unico componente, riducendo i problemi e i costi legati all'assemblaggio.

- Ottimizzazione topologica del componente: permette di studiare le forze agenti su un componente da realizzare e attraverso l'utilizzo di appositi software è possibile realizzare geometrie molto complesse, impossibili da realizzare con le tecniche tradizionali, andando a mettere il materiale soltanto dove necessario.
- Minore quantità di prodotti di scarto. Poiché, a differenza dei metodi tradizionali, il materiale viene depositato strato su strato solamente dove necessario per la costruzione del pezzo, la quantità di materie prime impiegate può essere ridotta fino al 40% rispetto a quella necessaria nell'ambito dei processi sottrattivi. Nel caso di tecniche utilizzanti materia prima in polvere, quest'ultima, al termine del processo di stampa, ha la possibilità di essere setacciata e riutilizzata per stampe successive fino all'esaurimento della sua efficienza.
- Minor tempo di fabbricazione del pezzo e di introduzione di quest'ultimo nel mercato. Il pezzo metallico, una volta realizzato il modello 3D computerizzato, può essere rapidamente ottenuto e ciò permette di evitare i problemi, i costi e il consumo di tempo legati all'approvvigionamento delle apparecchiature necessarie alla fabbricazione del pezzo e alla realizzazione di prototipi derivanti da un approccio del tipo "trial and error". Spesso, peraltro, grazie al continuo sviluppo dei software utilizzati, è possibile ottenere immediatamente una stima iniziale del tempo necessario per la costruzione del componente desiderato.
- Minore dispendio energetico: Ciò viene realizzato minimizzando gli step e i materiali richiesti per la produzione del pezzo, rendendo possibile la fabbricazione di parti più leggere e il riutilizzo dei sottoprodotti ottenuti. Nelle applicazioni in cui l'AM è competitiva, è possibile ridurre i consumi energetici fino al 50% rispetto ai metodi tradizionali.
- Flessibilità e rapidità. Per passare dalla lavorazione di un elemento ad un altro non è necessario il tempo di set up per cambiare gli utensili di lavoro, le attrezzature, i sistemi di bloccaggio e altri provvedimenti.

Essendo una metodologia nata da pochi decenni, l'AM presenta alcune criticità tipiche delle nuove tecnologie emergenti che, nel tempo, si stanno cercando di risolvere con lo scopo di trasformare quest'ultima in una tecnologia di avanguardia. In particolare, al fine di raggiungere un campo di applicazione maggiormente ampio, è necessario risolvere alcune problematiche legate a:

- Dimensioni del pezzo. La grandezza dei componenti realizzabili è limitata dalle dimensioni della macchina utilizzata per lo stampaggio.
- Costi elevati, legati sia ai macchinari e ai materiali impiegati che alla presenza di un limitato numero di acquirenti.
- Bassa produttività dei macchinari utilizzati. Comparando le stampanti 3D con le macchine CNC, è possibile affermare che queste ultime, generalmente, rimuovono materiale con una velocità maggiore rispetto alla velocità con cui le prime aggiungono il medesimo volume di materiale. Se si ambisce a una produzione di massa dei componenti è necessario, almeno per il momento, utilizzare più stampanti 3D in parallelo.
- Anisotropia dei componenti realizzati e presenza di porosità residue interne. Ne consegue un peggioramento delle proprietà meccaniche del pezzo finito.
- Presenza di stress termici residui e deformazioni sul pezzo dovute ai gradienti termici che si hanno durante la stampa. Questi potrebbero far sì che il pezzo non abbia le proprietà meccaniche desiderate e necessarie all'uso finale. Per ovviare a ciò, nella fase di realizzazione del pezzo, è possibile inserire delle strutture di supporto, in modo da dissipare in maniera ottimale il flusso di calore, oppure preriscaldare la piastra in cui viene progressivamente depositato il materiale.
- Maggiore rugosità superficiale dei componenti prodotti rispetto a quella usualmente ottenuta con le metodologie tradizionali. Poiché alcune applicazioni richiedono pezzi caratterizzati da un'elevata accuratezza su scala microscopica, spesso i prodotti realizzati mediante AM necessitano di successivi trattamenti di finitura superficiale, capaci di migliorare la resistenza dell'oggetto alla corrosione e all'usura.

- Necessità di utilizzo di strutture di supporto nel processo di fabbricazione. L'uso di tali supporti deve essere minimizzato selezionando una direzione di costruzione ottimale, in quanto il materiale utilizzato per la realizzazione dei supporti non può essere riciclato ed inoltre, talvolta, essi hanno la potenzialità di influenzare negativamente le caratteristiche qualitative del pezzo finito.

3 Additive manufacturing per la stampa dei metalli- Stato dell'arte

Il processo di stampa nell'ambito dei metalli avviene attraverso vari step:

1. Creazione del modello matematico tridimensionale del prodotto
2. Generazione del file STL
3. Orientamento del modello e generazione dei supporti
4. Esecuzione dello slicing
5. Esecuzione della stampa
6. Eventuali processi post-trattamento

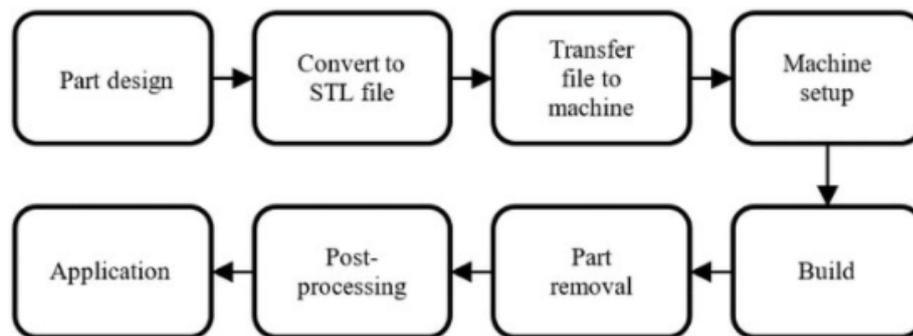


Figura 5 Processo di stampa AM

Esistono diverse tipologie di AM nell'ambito metallico che sono distinguibili tra loro in base alla natura delle materie prime, alla fonte energetica in uso e al meccanismo attraverso il quale i layer vengono generati portando alla formazione del pezzo finito.

Le principali tecniche utilizzate sono:

- *Direct Energy Deposition (DED)*
- *Powder Bed Fusion (PBF)*

3.1 Direct Energy Deposition (DED)

La tecnologia “*Direct Energy Deposition*” è una procedura additiva che utilizza principalmente polveri metalliche, o fili metallici, applicati strato su strato per creare componenti meccanici o, eventualmente, per riparare componenti già esistenti. I processi a deposizione diretta creano strutture fondendo il materiale metallico, polvere o filo, tramite una fonte di calore concentrata (laser, fascio di elettroni o arco), mentre viene depositato in un punto preciso; a ciascun passaggio della testa di deposizione, tramite un ugello montato su un braccio a più assi, si crea una traccia di materiale rapidamente solidificato.

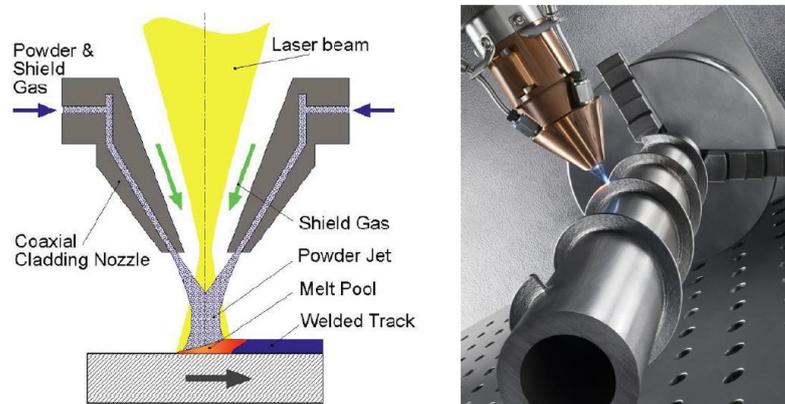


Figura 6 Schema Direct Energy Deposition

La polvere metallica, o il filo, vengono simultaneamente erogati attraverso un ugello insieme al gas di protezione e il laser. La polvere viene trasportata verso l'ugello usando un gas inerte che permette al materiale di essere soffiato nel percorso del fascio laser. Il materiale viene depositato selettivamente, solo dove è necessario. L'energia del laser fonde parzialmente le particelle di metallo, che si fondono completamente a contatto con il bagno di fusione creando così un legame metallurgico tra la polvere e il substrato. Il processo prevede lo spostamento del substrato o del laser per permettere al bagno di fusione di solidificarsi e di produrre così una piccola zona rialzata di metallo solido (traccia). Le tracce risultanti, depositate strato dopo strato, generano prodotti in metallo per diverse applicazioni completamente personalizzabili. I tassi di accumulo e quindi le velocità di elaborazione sono elevati, insieme si traducono in tempi di produzione più rapidi e costi più bassi.

3.2 Powder Bed Fusion (PBF)

L'energia termica derivante da fascio laser o di elettroni fonde selettivamente regioni di un letto di polvere posizionata su un piano mobile in direzione verticale, strato su strato, seguendo un modello CAD.

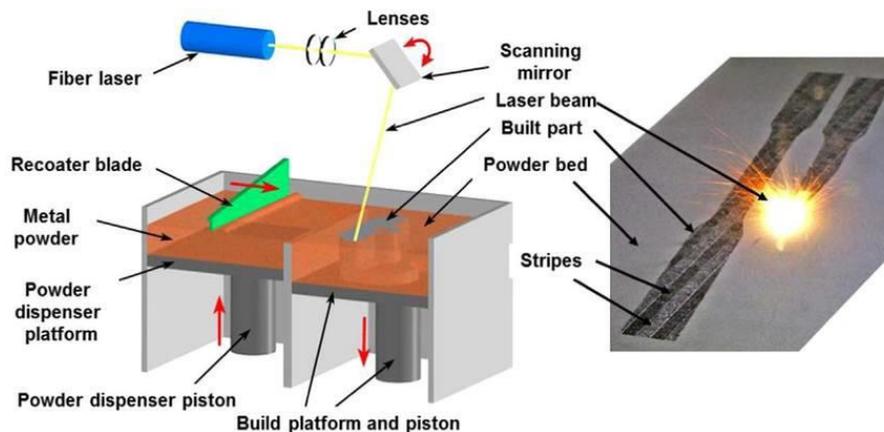


Figura 7 Schema Powder Bed Fusion

Completato uno strato, la piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale (*Recoater*) deposita nuova polvere per lo strato successivo. La polvere non processata viene recuperata e riutilizzata.

Principali tecnologie:

- *Selective Laser Sintering (SLS)*: uno specchio mobile direziona un fascio laser colpendo la polvere che viene sinterizzata legandosi ai granelli circostanti con legami molecolari;
- *Selective Laser Melting (SLM)/Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*: tecnologia simile alla precedente, ma i singoli granelli vengono fusi in un pezzo monolitico;
- *Electron Beam Melting (EBM)*: fascio di elettroni direzionati da due magneti rotanti ad anello

I pezzi realizzati tramite SLS hanno porosità maggiore di quelli realizzati tramite SLM e EBM, mentre questi presentano una struttura molecolare più omogenea con migliori proprietà meccaniche.

Essendo oggetto del nostro caso di studio analizzeremo nel dettaglio la tecnologia SLM.

3.2.1 Selective Laser Melting (SLM)

Oggetto del nostro caso di studio, la tecnologia SLM consiste nella realizzazione di componenti attraverso la fusione selettiva di un letto di polvere.

Il processo inizia con la deposizione di uno strato di polvere, prelevata da una camera che contiene la polvere, sulla piattaforma di lavoro attraverso un "recoater" che la distribuisce uniformemente all'interno della camera di stampa livellandola. In seguito, un raggio laser, emesso da una sorgente laser, viene proiettato con degli specchi sullo strato di polvere, coerentemente con la sezione da realizzare, portando a fusione le particelle metalliche interessate. Ottenuto il primo strato, l'elevatore fa scendere la camera di stampa di una quantità pari allo spessore del successivo strato (solitamente nel range di 20-100µm) ed il processo può così ripetersi. Una volta ultimata la lavorazione è possibile estrarre il componente e passare alla susseguente rimozione dei supporti e delle particelle non interessate dalla fusione.

3.3 Hybrid Manufacturing

Ultima frontiera dell'innovazione è l'Hybrid Manufacturing.

Le tecnologie di produzione ibrida combinano i punti di forza dell'AM con quelli della tradizionale lavorazione CNC/sottrattiva, per creare un singolo flusso produttivo che utilizza efficacemente entrambe le tecniche.

I sistemi ibridi sono spesso costituiti da una macchina utensile, fresa, tornio o braccio robotico, dotata di una testa per la Direct Energy Deposition (DED) in grado di depositare polvere o filo metallico. La combinazione delle due tecnologie può prevedere:

- processo additive seguito da lavorazioni sottrattive, ad esempio per realizzare fori o levigare le superfici;
- operazioni di machining seguite da tecniche additive, ad esempio per creare una struttura di base dove poi deve essere realizzato un pezzo complesso.

Esistono altri sistemi che combinano le lavorazioni con la fusione a letto di polvere (PBF) per i metalli e che utilizzano l'estrusione di materiale come processo additivo per la lavorazione di polimeri.



Figura 8 Esempio Hybrid manufacturing

3.4 Inconel 718

Negli ultimi anni sono stati fatti grandi progressi sullo sviluppo della tecnologia AM che hanno portato al miglioramento delle attrezzature e dei processi basati sulle tecnologie a letto di polvere. A questo sviluppo ha contribuito l'impiego della superlega Inconel 718.

Nel nostro caso di studio effettueremo un'analisi sullo studio di fattibilità di una girante realizzata attraverso la tecnologia SLM utilizzando la superlega in polvere Inconel 718.

L'Inconel stampato in 3D vanta una resistenza termica eccezionale, fino a 700°C, rendendo l'IN718 una scelta allettante per impieghi a temperature estreme come le turbine o gli ambienti criogenici.

Poiché la lega Inconel 718 è caratterizzata da un alto grado di affidabilità in termini di eccellente corrosione, proprietà termiche e di resistenza in condizioni termiche e meccaniche estreme, è ampiamente utilizzata per varie applicazioni ad alta temperatura, specialmente nell'industria aerospaziale.

Come riportato nell'articolo [1] la microstruttura dell'Inconel 718 presenta dei precipitati γ' , γ'' e δ che gli conferiscono le ottime proprietà termiche che lo rendono adatto per l'impiego nella tecnologia AM a letto di polvere.



Figura 9 Polvere di Inconel 718

3.5 Supporti

Di fondamentale importanza è l'assegnazione dei supporti alla parte da realizzare attraverso una tecnologia AM. Essendo il pezzo costruito strato dopo strato (layer by layer), a seconda dell'orientamento della superficie del pezzo, possono essere necessari supporti che vengono stampati durante il processo di produzione con lo stesso materiale della parte. I supporti hanno lo scopo di mantenere il modello rigidamente fissato alla piattaforma di costruzione durante il processo di stampa, assorbono gli stress interni e allo stesso tempo prevengono deformazioni del pezzo dissipando calore. Pareti o sbalzi con angoli inferiori a 45° rispetto alla piattaforma di stampa devono generalmente essere supportati in quanto, altrimenti, porterebbero al collasso del materiale fuso. Una volta che il pezzo è stato stampato correttamente, il supporto viene rimosso e il pezzo viene sabbiato.

Nonostante l'impiego di supporti sia necessario per la maggior parte dei processi AM, questo impone un limite alla tecnologia stessa in quanto comportano un maggior dispendio di materiale ed energia, aumentano i tempi di stampa, prevedono poi successivi trattamenti di rimozione e finitura del pezzo.

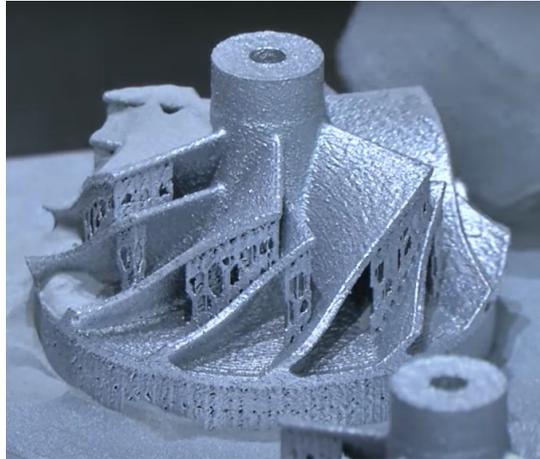


Figura 10 Esempio di una girante supportata

3.6 Post-processo di stampa

La tecnologia AM viene utilizzata non solo per la realizzazione di prototipi, ma anche per oggetti finiti o semilavorati, dato l'elevato grado di qualità. Alcune tecnologie, però, non riescono a produrre particolari esenti da difetti estetici o che non necessitano di altre lavorazioni, tra le quali troviamo:

- **Rimozione dei supporti:** stampa del supporto necessario a prevenire il collasso della struttura;
- **Bonding (assemblaggio):** oggetto suddiviso in più parti che devono essere poi assemblate;
- **Infiltration:** migliora le proprietà meccaniche dei manufatti in materiale polimerico. Rivestimento della superficie con una resina epossidica che riempie le cavità e, una volta solidificata dopo un trattamento in forno, crea una patina isolante;

- **Sabbiatura:** il manufatto viene colpito da sfere di vetro e sabbia scagliate mediante aria compressa, ottenendo una superficie più uniforme ed eliminando residui di supporto e il caratteristico effetto layer derivante da lavorazioni per strati;
- **Mass finishing:** sistema vibrante che attua un'azione di lucidatura assieme a del materiale abrasivo. Gli impatti e l'attrito levigano la superficie ottenendo gli stessi risultati della sabbiatura;
- **Vapor smoothing:** esposizione della parte in materiale polimerico a vapori di solventi, per rendere la superficie lucida e uniforme. Permette di raggiungere zone non accessibili mediante sabbiatura;
- **Verniciatura:** trattamento più utilizzato assieme alla sabbiatura, per velocità e convenienza in quanto può essere effettuata su qualunque manufatto realizzato tramite AM;
- **Electroplating (elettroplaccatura):** immersione del pezzo in un bagno di ioni della lega di rivestimento con carica opposta a quella degli ioni del pezzo. Gli ioni, attratti dalla carica opposta, si depositano sul particolare, creando uno strato superficiale uniforme.

4 Simulazione del processo di stampa

Un metodo molto efficace per ridurre i tempi e i costi della produzione additiva è la possibilità di svolgere simulazioni termo-meccaniche della parte da realizzare, attraverso appositi software, che permettono di calcolare e prevedere i gradienti termici ai quali si è soggetti durante la realizzazione del processo di stampa. Questi ultimi fanno sì che il pezzo sia caratterizzato da stress termici residui e deformazioni in grado di alterare le proprietà meccaniche e geometriche del componente.

Attraverso questi software è possibile simulare la fase di stampa e ottenere una previsione, più o meno accurata, degli stress termici e delle deformazioni residue una volta finito il processo di stampa e, inoltre, dopo la rimozione dei supporti.

In questo modo, si ha la possibilità di ricreare l'ambiente di stampa scegliendo appositamente tutti i parametri di processo evitando inutili sprechi di tempo e materiale realizzando componenti derivati da un approccio "trial and error".

I componenti vengono simulati attraverso modelli FEM, con la generazione di una mesh sulla quale verranno poi calcolati i risultati della simulazione. Per far sì che la simulazione sia il più accurata possibile è necessario impostare adeguati parametri della mesh, dei supporti e soprattutto è necessario scegliere opportuni modelli termici e meccanici.

Lo scopo di tali simulazioni è quello di ottenere informazioni riguardo le aree del componente maggiormente sottoposte a stress e deformazioni in modo tale da aiutare il progettista nell'implementare tutte le modifiche atte a migliorare la qualità del prodotto finito e valutarne la fattibilità del processo.

4.1 Software

Di seguito andremo a introdurre i principali software utilizzati nel nostro caso di studio.

In particolare, l'intero studio è stato effettuato attraverso l'utilizzo del software di simulazione Siemens NX. Una volta ottenuti tutti i risultati delle simulazioni e analizzato tutte le possibili soluzioni per migliorare il processo, si è poi svolta una comparazione con i risultati ottenuti da un secondo software di simulazione, Ansys, al fine di valutare l'effettiva efficacia di tali simulazioni, confrontando i risultati ottenuti dai due con i risultati ottenuti dalle prove sperimentali di stampa del componente.

4.1.1 Ansys

Ansys offre una soluzione software completa e scalabile che minimizza il rischio dei processi di Additive Manufacturing e garantisce componenti certificati di alta qualità.

Crea e ottimizza progetti adatti alla produzione additiva, includendo anche, e non solo, l'ottimizzazione topologica e reticolare della parte.

Simula il processo di produzione Metal Additive per stampare le parti in esame per la prima volta e ridurre significativamente i tempi del ciclo di sviluppo del prodotto.

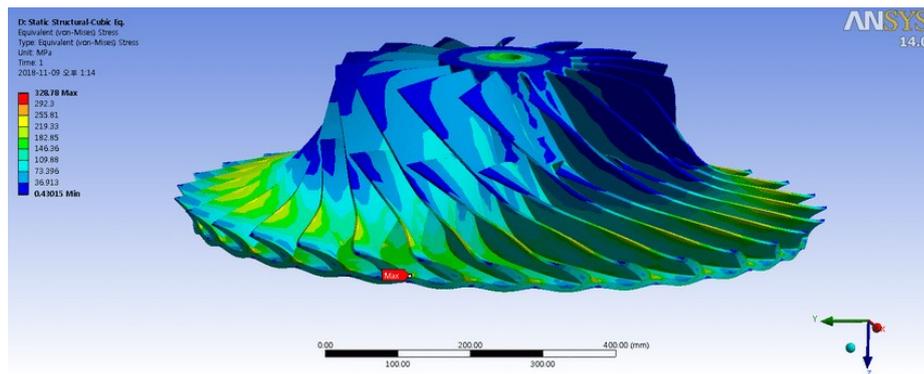


Figura 11 Ansys

4.1.2 Siemens NX

Siemens NX fornisce tutte le funzionalità necessarie, dalla progettazione alla stampa fino alla convalida dopo la stampa, in un singolo sistema integrato. Siemens NX industrializza l'additive manufacturing per realizzare prodotti rivoluzionari, oltre a realizzarne i prototipi, con questa nuova tecnologia. Questo consente di reinventare i prodotti, reinventare la produzione e persino reinventare i modelli di business con la tecnologia di additive manufacturing.

NX consente di creare disegni di parti ottimali per la produzione additiva con strumenti di ingegneria generativa integrati come l'esplorazione dello spazio di progettazione e l'ottimizzazione topologica.

Simcenter 3D Additive Manufacturing simula il processo AM per la fusione laser selettiva (SLM). Il setup di una parte nel vassoio di costruzione, comprese le strutture di supporto, viene usato come base per tale simulazione. L'utente seleziona le parti da simulare e definisce i parametri del processo di stampa (materiale, numero di parti, taglio degli strati, parametri del laser, ecc.) ed esegue la simulazione.

Il risultato è la distribuzione della temperatura e della distorsione della parte.

NX consente al progettista e al produttore di convalidare le proprie parti AM ad ogni passo lungo il percorso.

Gli strumenti di preparazione integrati in NX aiutano a posizionare, orientare e sostenere le parti sul piatto di stampa nel modo più efficiente possibile.

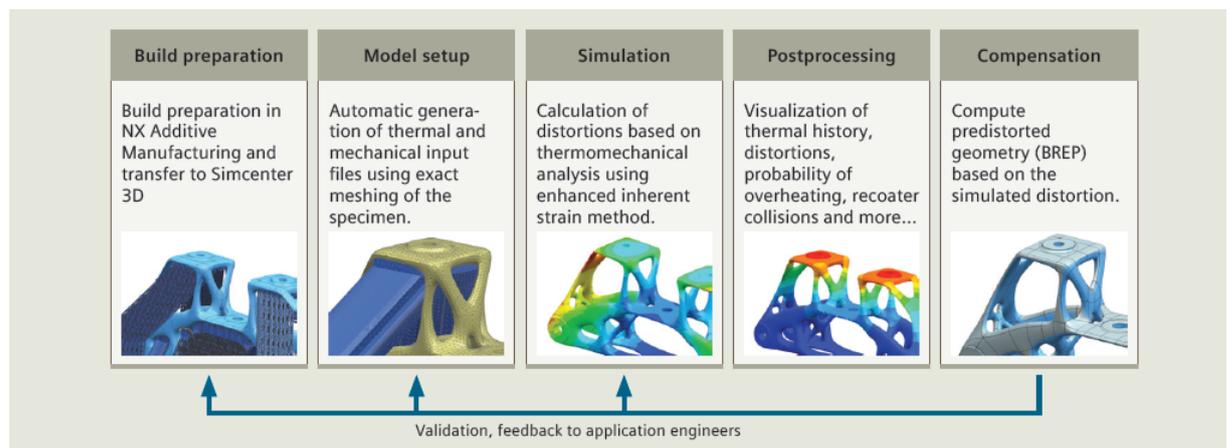


Figura 12 Siemens NX

La preparazione del modello viene fatta all'interno del modulo Additive Manufacturing di NX integrando completamente la simulazione nel flusso di lavoro e utilizzando i supporti modificati in tale modulo. Dopodiché vengono create mesh separate per l'analisi termica e meccanica, mesh che seguono in modo esatto la geometria della parte. Da queste è possibile ricavare molteplici valori per la valutazione del processo, tra questi: surriscaldamento locale, rigidità, deformazioni prima e dopo la rimozione dei supporti e possibili collisioni con il recoater durante la fase di stampa.

Dallo stesso modulo è possibile infine esportare la geometria compensata con le deformazioni in negativo della parte.

Tutti i passaggi appena descritti sono rappresentati nella figura sotto

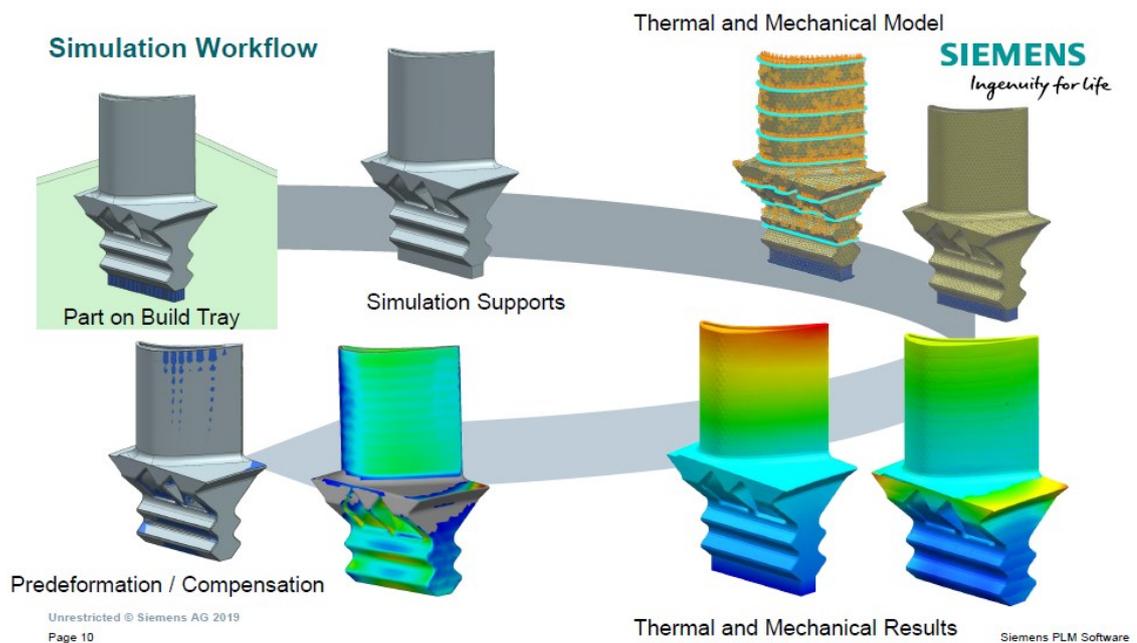


Figura 13 Simulation workflow NX

4.1.2.1 Inherent Strain Methods

Per permettere un uso pratico di un metodo basato su FEM per la simulazione del processo AM è necessario che i tempi di calcolo e la complessità del modello devono essere tenuti al minimo. Questo è il motivo per cui alcuni ricercatori hanno sviluppato un nuovo modello di simulazione basato sulla deformazione intrinseca chiamato Inherent Strain (IS). Questo è il modello sul quale si basa l'esecuzione delle simulazioni di stampa del software NX.

Il metodo è basato su misure sperimentali delle deformazioni intrinseche effettuate attraverso misure diffrattometriche a raggi X.

Le deformazioni sperimentali stimate sperimentalmente sono poi inserite, attraverso un processo di calibrazione, direttamente nel modello meccanico a macroscale per la previsione finale di stress/deformazione della simulazione.

Il lavoro si basa sulla considerazione che la geometria completa della parte è generata da un accumulo di processi di microsaldatura ad ognuno dei quali è associata una storia termo-meccanica identica o comparabile. Questa assunzione è usata per ridurre la dimensione del problema, impostando un'analisi termo-meccanica più leggera.

Le deformazioni calcolate numericamente vengono poi applicate come deformazione intrinseca in un modello ad elementi finiti elasto-plastico a macroscale per prevedere le sollecitazioni e le deformazioni residue della parte reale.

Rispetto alla complessa analisi termo-meccanica, è necessario un tempo di calcolo molto breve per completare la simulazione, anche per strutture grandi e complesse.

4.2 Workflow

Di seguito verrà descritto il workflow seguito all'interno di Siemens NX.

All'avvio di NX generiamo un nuovo file di lavoro andando a selezionare il modulo all'interno del quale si intende lavorare, nel nostro caso Additive Manufacturing. Una volta inserita la parte nel volume di stampa e supportata con appositi supporti si procede con la simulazione del componente, che apre l'applicazione Pre/Post di NX nella quale sarà possibile inserire tutti i parametri di processo per la corretta esecuzione del processo di stampa, andando poi ad analizzare i risultati.

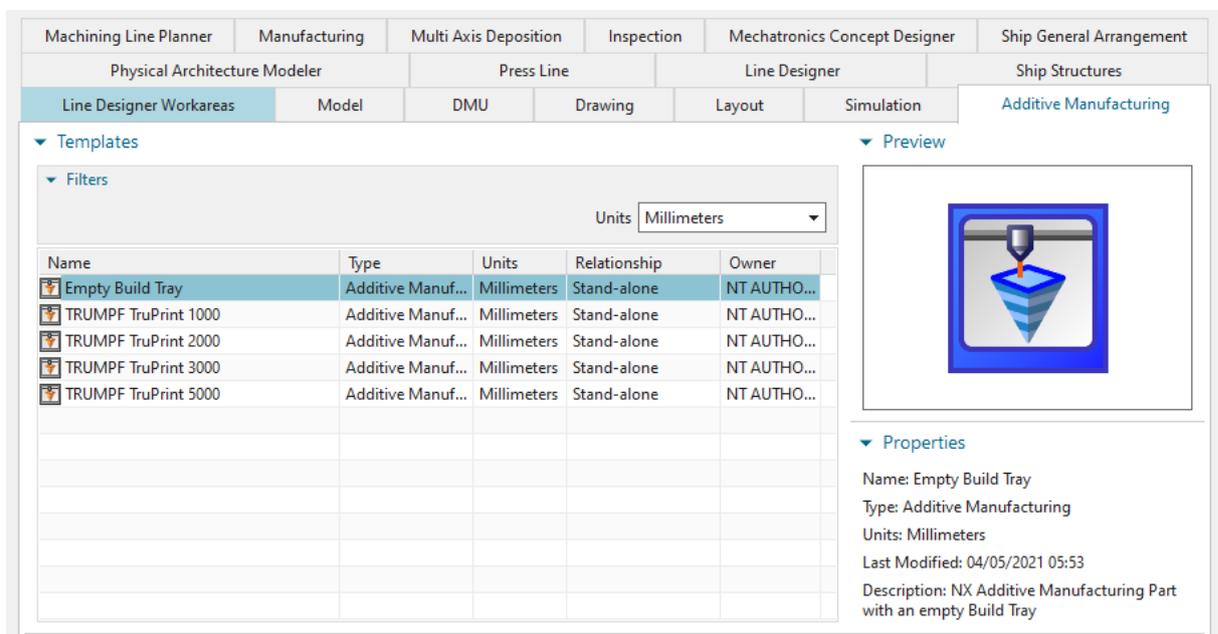


Figura 14 Nuovo file in NX Additive Manufacturing

4.2.1 Modulo NX: Additive Manufacturing

NX Additive Manufacturing è un'applicazione di NX che crea una parte di produzione additiva, ovvero una copia della parte originale, che contiene il vassoio di costruzione, il modello e le strutture di supporto.

In NX Additive Manufacturing si effettuano le seguenti operazioni:

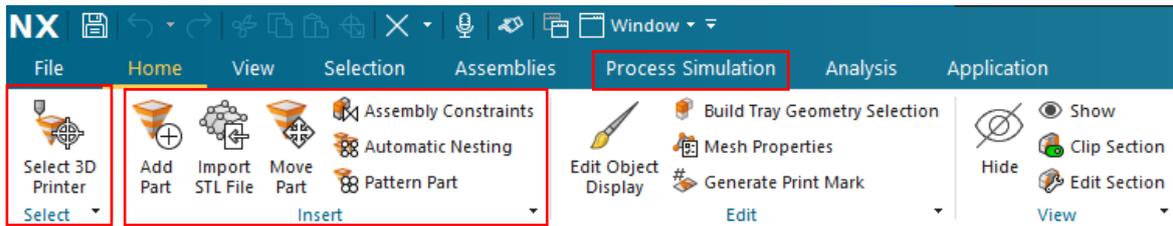


Figura 15 Workflow in NX Additive Manufacturing

1. Selezionare la stampante per generare il build volume;

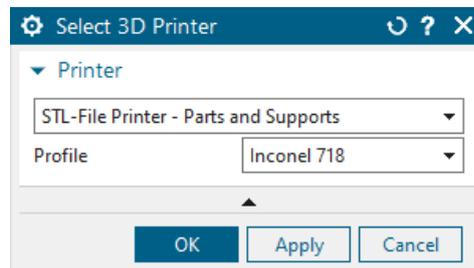


Figura 16 Selezione della stampante

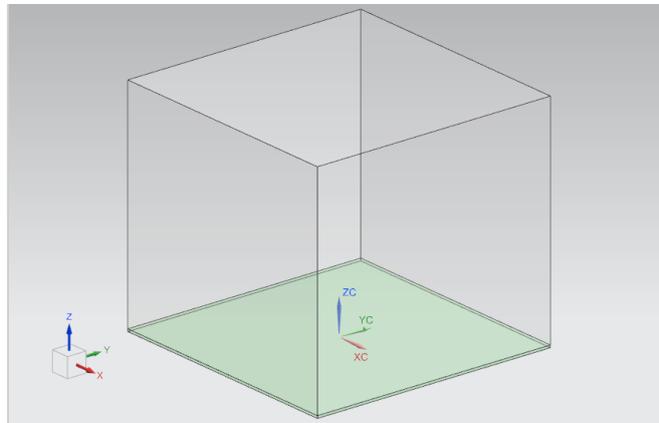


Figura 17 Build volume

2. Aggiungere parti al vassoio della stampante, posizionarle e aggiungere supporti alla parte;

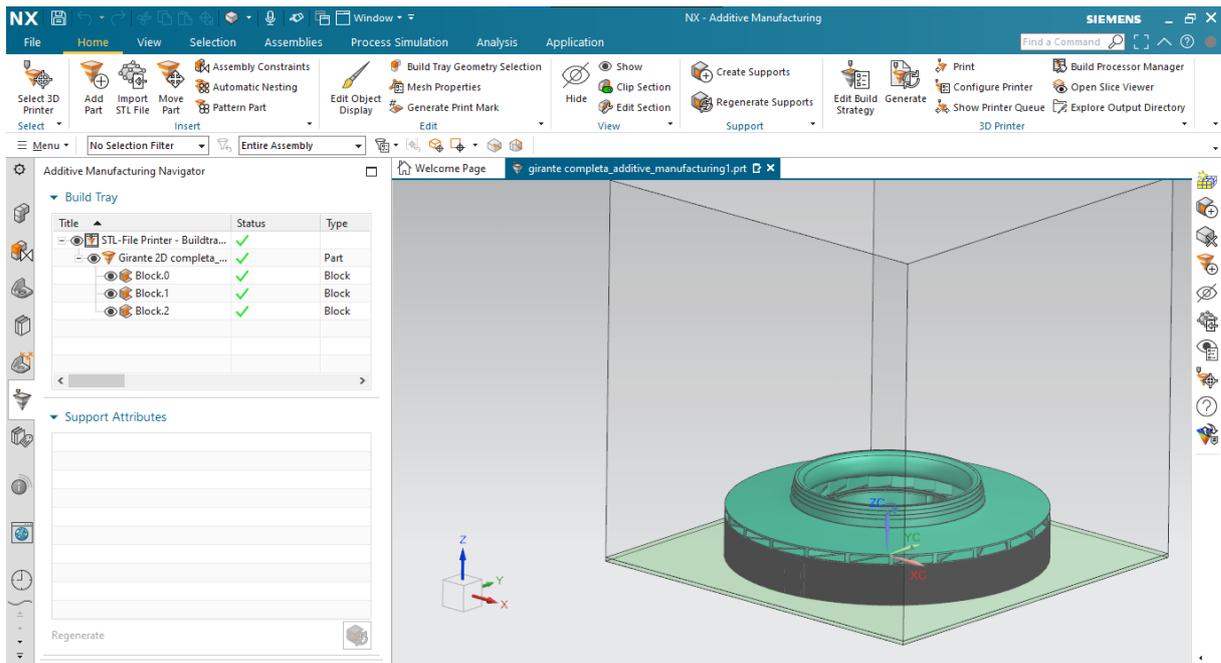


Figura 18 Parte supportata all'interno del build volume

3. Modificare, eventualmente, i supporti in supporti di simulazione e avviare il processo di simulazione, che apre Pre/Post.



Figura 19 Workflow Process Simulation

Il tipo di supporto determina il metodo di meshing che può essere utilizzato per creare mesh del supporto: il metodo di supporto immerso o il metodo di supporto di simulazione. Il metodo di supporto immerso è automatico ed è adatto alla maggior parte delle parti, ma il metodo di supporto di simulazione può generare mesh più fini e precise. I tipi di supporto Block (tipo di supporto più comune) e Volume consentono di scegliere tra i metodi. È possibile utilizzare una combinazione di tipi di supporto e metodi di mesh per ogni provino.

4.2.2 Modulo simulazione in Pre/Post

Avviando la simulazione del processo da NX Additive Manufacturing si viene reindirizzati sull'applicazione NX Pre/Post dalla quale è possibile simulare il processo di stampa.

Il metodo di simulazione usato in NX è chiamato "Inherent Strain Method". L'Additive Manufacturing (AM) a deposizione di metallo utilizza un complesso processo termo-meccanico, intorno al bacino di fusione della fonte di calore, il materiale si espande localmente durante la fase di riscaldamento e si contrae successivamente nella fase di raffreddamento (solidificazione). In una situazione ideale i cambiamenti di forma causati dalle espansioni sono invertiti dalle contrazioni, tuttavia, in realtà le espansioni comprimono irreversibilmente il materiale nelle regioni periferiche del bacino di fusione. Queste regioni rimanenti, compresse, impediscono al materiale di tornare localmente alla sua forma originale e introducono uno squilibrio. Di conseguenza, interi progetti iniziano a deformarsi per contrastare questo squilibrio. In termini tecnici, le regioni compresse possono essere espresse come regioni con deformazioni residue che causano deformazioni localizzate e, successivamente, globali della parte quando si accumulano.

Se si osserva dall'esterno il complesso processo termomeccanico dell'AM, allora si può descriverlo come segue: la realizzazione di un componente con un processo termomeccanico provoca dilatazioni e contrazioni termiche che portano alla formazione di deformazioni residue che a loro volta generano una forma deformata del componente originale. Se un dato disegno viene fabbricato con un certo processo, questo porta a deformazioni residue che porteranno a una forma deformata del disegno originale.

In altre parole, può essere meno importante sapere in profondità cosa succede durante il processo di stampa, purché si possa trovare un modo adeguato di utilizzare le tensioni residue per trasformare la forma originale in quella deformata.

Questo è esattamente ciò che fa il metodo Inherent-Strain (IS). Utilizza le deformazioni ereditate dal processo termomeccanico e permette di calcolare la forma deformata. Il metodo IS riduce la complessa simulazione termo-meccanica ad una sola meccanica, il che rende la simulazione molto più veloce e conveniente, pur avendo un limitato compromesso nella precisione. Il compromesso riguarda comunemente le sollecitazioni che, in alcuni casi, possono essere previste in modo meno accurato di quanto lo sarebbero con un'analisi termo-meccanica approfondita.

A causa della riduzione del complesso problema termo-meccanico in un semplice problema meccanico, questo metodo può produrre previsioni realistiche in brevi momenti.

Per creare i file di simulazione e risolvere la simulazione, bisogna utilizzare i comandi della scheda Additive Manufacturing.

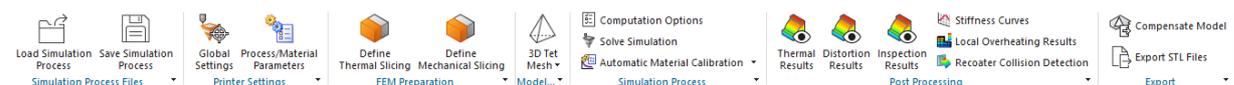


Figura 20 Workflow simulazione dalla scheda Additive Manufacturing

Iniziando con il gruppo “Printer Settings”, bisogna utilizzare ogni comando in ordine da sinistra a destra. Non si può passare al comando successivo finché non si completa quello precedente.

In sequenza, il flusso di lavoro è:

1. Imposta i parametri di stampa (*Printer Settings*)
2. Definisci il taglio termico e meccanico (*FEM Preparation*)
3. Definisci i parametri della mesh del componente (*Model Preparation*)
4. Imposta e risolvi la simulazione (*Simulation Process*)
5. Naviga all’interno della simulazione (*Post Processing*)
6. Esporta file (*Export*)

4.2.2.1 Printer Settings

Dal gruppo “Printer Settings” si impostano i parametri globali della simulazione e i parametri di processo della stampante e dei materiali.

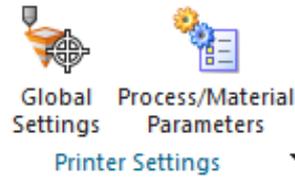


Figura 21 Gruppo "Printer Settings"

Il primo comando da impostare è quello relativo ai parametri globali di processo (*Global Settings*) dal quale è possibile impostare il tipo di simulazione che si vuole effettuare, si può selezionare un tipo simulazione solo termico, solo meccanico oppure termico+ meccanico.

La differenza tra le diverse tipologie di simulazione è la seguente:

- **Solo Termico:** fornisce solo risultati termici;
- **Solo Meccanico:** Fornisce risultati di rigidità e deformazione. I risultati di deformazione includono rimozione del supporto e stampa;
- **Termico + Meccanico:** fornisce i risultati termici più risultati meccanici di mappatura, rigidità, deformazione di stampa, raffreddamento e rimozione del supporto.

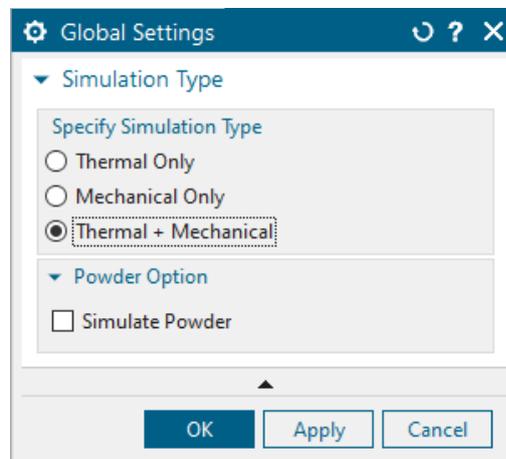


Figura 22 Finestra di dialogo "Global Settings"

Inoltre, è possibile, spuntando la corrispettiva casella, scegliere di simulare o meno anche la polvere nel build volume. La simulazione della polvere porta ad avere risultati più precisi a discapito, però, del tempo di simulazione che aumenta.

Il secondo comando è quello relativo ai parametri di processo e del materiale.

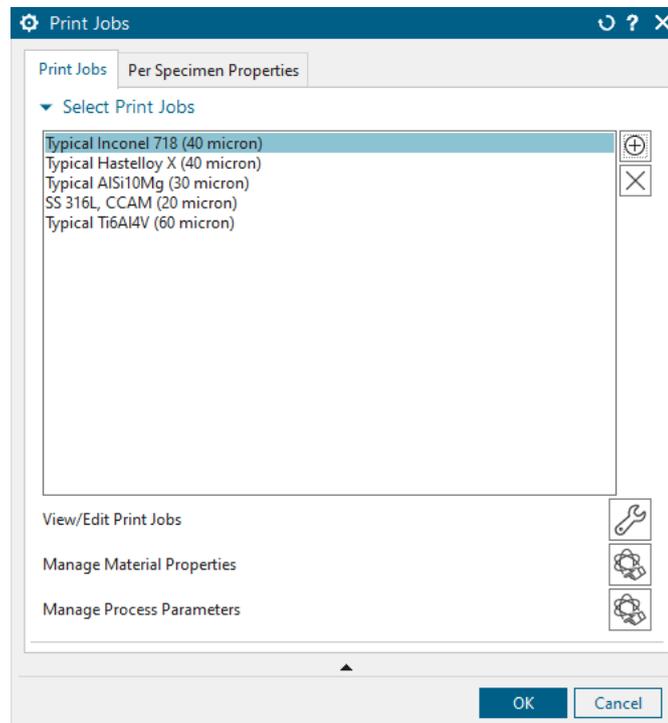


Figura 23 Finestra di dialogo "Print Jobs"

Dalla finestra di dialogo in *Figura 23* è possibile:

- selezionare il lavoro di stampa da applicare ai campioni e ai supporti nel volume di costruzione (build volume);
- visualizzare/modificare i parametri di stampa (*Figura 24*)
- gestire le proprietà del materiale
- gestire le proprietà del processo

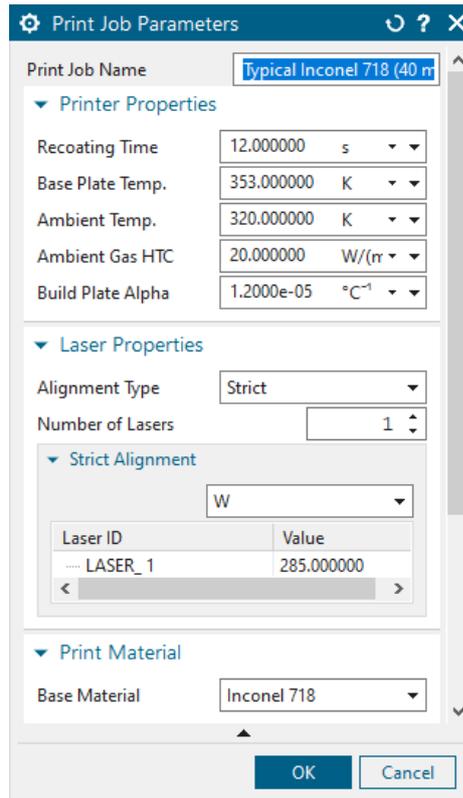


Figura 24 Finestra di dialogo "Print Job Parameters"

Dalla finestra di dialogo in Figura 25 è possibile, invece, visualizzare e gestire tutti i parametri riguardanti i campioni e i supporti all'interno del volume di costruzione.

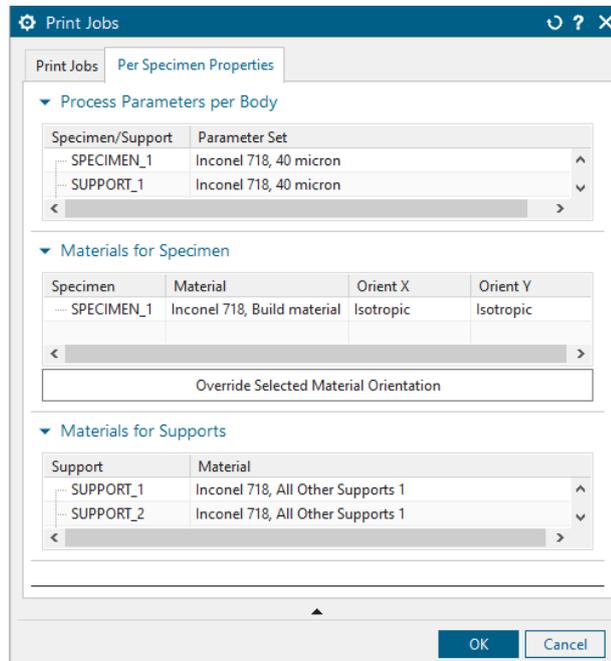


Figura 25 Finestra di dialogo "Per Specimen Properties"

4.2.2.2 FEM Preparation

Dal gruppo "FEM Preparation" si imposta lo slicing termico e meccanico che il software deve eseguire per effettuare i calcoli della simulazione sul componente.



Figura 26 Gruppo FEM preparation

La sezione "definisci slicing termico" permette di generare delle sezioni della geometria della parte dalle quali misurare gli incrementi di temperatura.

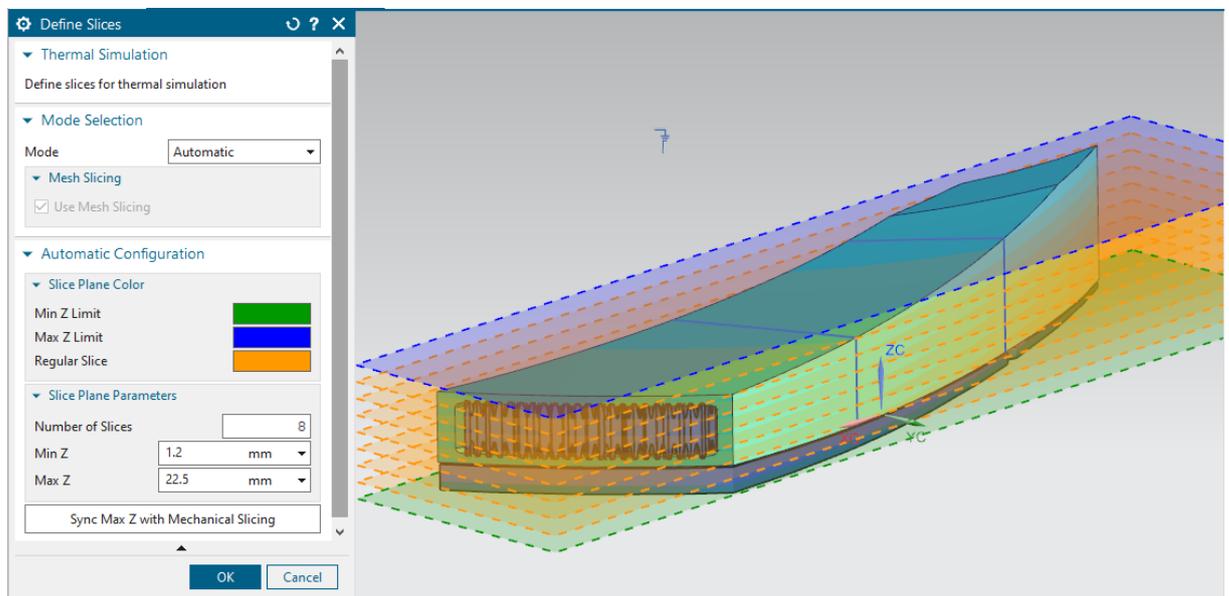


Figura 27 Slicing Termico

Si può scegliere tra tre modalità di sezionamento: automatico, manuale, calcolato.

- Automatico, consente di impostare il numero di sezioni desiderato e il software crea le sezioni utilizzando il numero di sezioni specificato;
- Manuale, consente di importare un file .cuts con le sezioni definite.
- Calcolato, consente di impostare la soglia di spessore per ciascuna fetta. Dopo che il software ha generato le sezioni all'interno di questa soglia, è possibile passare a Manuale e aggiungere o rimuovere sezioni.

La sezione “*definisci slicing meccanico*”, analogamente, permette di impostare il numero di sezioni meccaniche (calcolato dallo spessore delle fette e dall'altezza, compresi i supporti) che determinano il numero di passaggi temporali nella soluzione della distorsione.

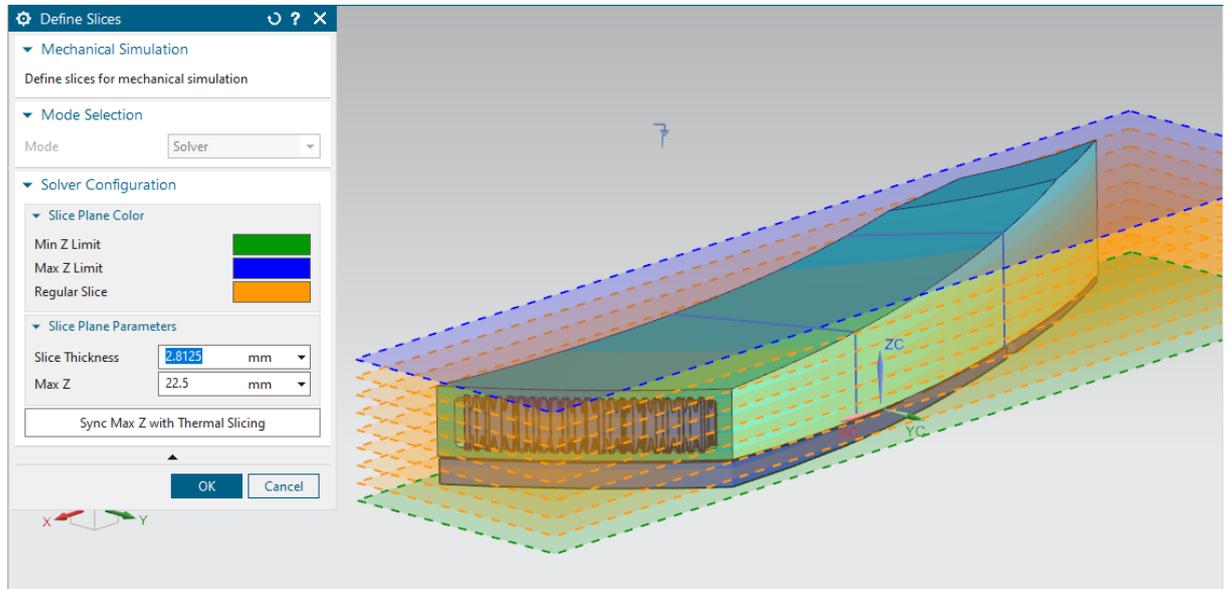


Figura 28 Slicing Meccanico

Anche in questo caso si può scegliere tra tre modalità differenti di sezionamento: automatico, manuale, risolutore.

- Automatico, consente di impostare il numero di sezioni che si desidera creare dal software. Questa opzione affetta la geometria CAD anziché la mesh.
- Manuale, consente di importare un file .cuts con le sezioni definite. Questa opzione affetta la geometria CAD anziché la mesh.
- Risolutore, Consente di impostare la soglia di spessore per ciascuna fetta. Dopo che il software ha generato le sezioni all'interno di questa soglia, è possibile passare a Manuale e aggiungere o rimuovere sezioni. L' opzione Risolutore affetta la mesh anziché la geometria CAD, il che si traduce in sezioni con mesh separate. Per i supporti mesh che non hanno supporti di simulazione corrispondenti, è necessario selezionare questa opzione.

Per impostazione predefinita, il software utilizza la stessa altezza massima delle fette nella direzione dell'asse Z sia per le mesh meccaniche che per quelle termiche. Se si modifica questo valore Z Max , utilizzare “*Sync Max Z con Mechanical Slicing*” per sincronizzare il valore in entrambe le mesh.

4.2.2.3 Model Preparation

Dal gruppo “*Model Preparation*” si genera la mesh tetraedrica della parte e dei supporti da simulare.

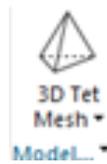
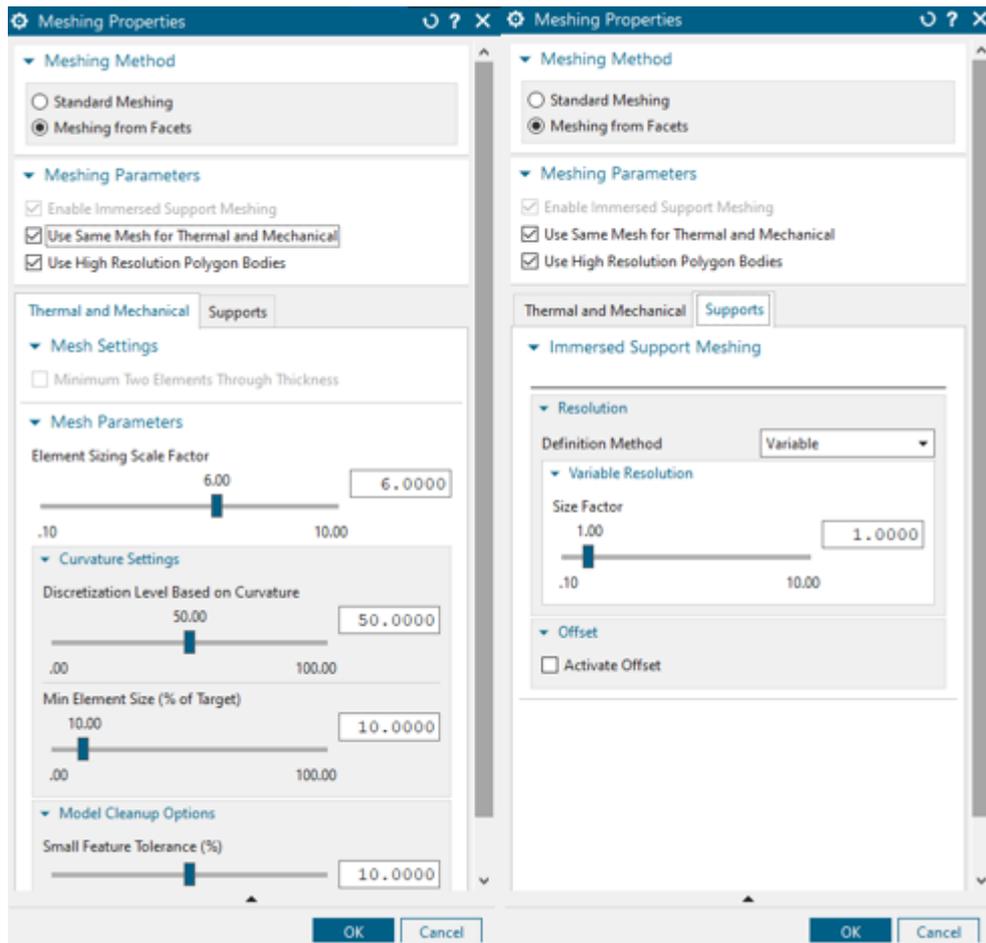


Figura 29 Gruppo "Model Preparation"

NX crea le mesh per tutti i corpi sul vassoio di costruzione (build volume), campioni e supporti, ed, eventualmente, anche della polvere se si sceglie di includere la polvere nella simulazione dai parametri di processo globali, *Figura 22*. Tutte le mesh sono create con elementi tetraedrici lineari 3D, il che rende limitato il processo di meshatura rispetto ad altri software, è però possibile selezionare il metodo di meshing, e si può controllare la risoluzione della mesh e altri fattori, come mostrato nella *Figura 30*.



A

B

Figura 30 Proprietà mesh parte (A) e proprietà mesh del supporto immerso (B)

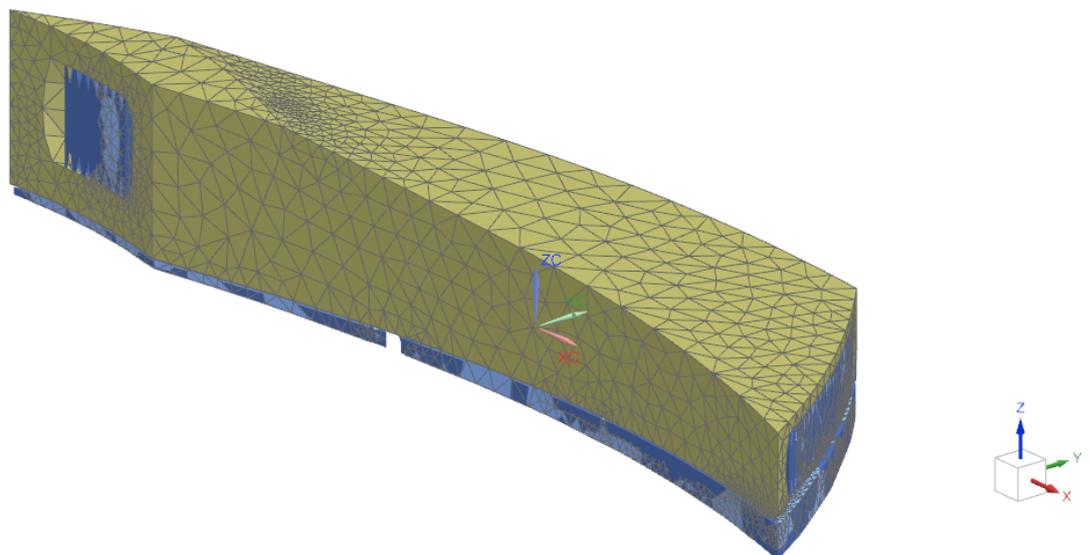


Figura 31 Mesh Vano Singolo della Girante

4.2.2.4 Simulation Process

Dal gruppo "simulation process" si vanno ad impostare le opzioni di calcolo della simulazione per poi mandarla in esecuzione attraverso l'apposito comando.

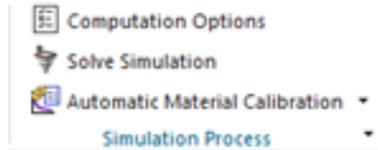


Figura 32 Gruppo "Simulation Process"

Dalla sezione delle opzioni di calcolo si selezionano l'allocazione della memoria della simulazione, la quantità di processori che dovranno simulare il processo e gli incrementi dei risultati in output.

Inoltre, è possibile selezionare anche la modalità con la quale viene calcolata la deformazione dalla sezione "Alpha/Strain" (Figura 33).

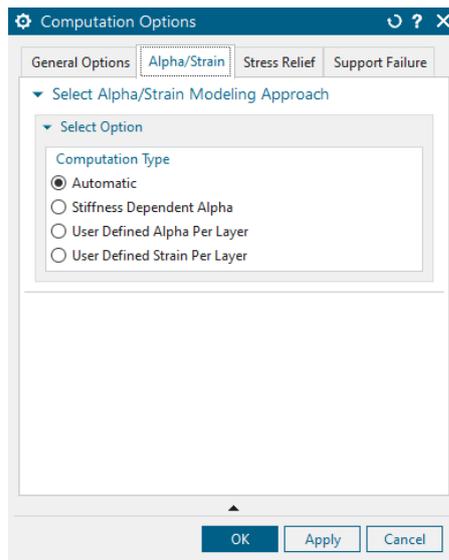


Figura 33 Finestra dialogo "opzioni di calcolo"

A questo punto, dallo stesso gruppo, possiamo mandare in risoluzione la simulazione attraverso il comando "Solve simulation".

4.2.2.5 Post Processing

Dal gruppo post processing possiamo navigare all'interno della simulazione per analizzare nel dettaglio tutti i risultati ottenuti dall'analisi termica e meccanica del componente simulato.

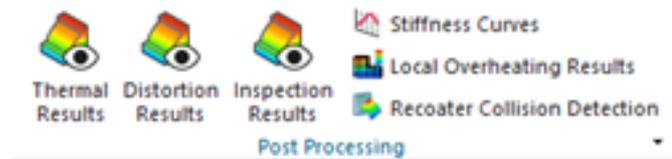


Figura 34 Gruppo "post processing"

Nello specifico, nel nostro caso di studio, focalizzeremo l'attenzione sui risultati termici, risultati di distorsione totale e localizzata lungo l'asse di stampa (Z) e in particolare sulle collisioni con il Recoater.

4.2.2.6 Export

Dal gruppo export abbiamo, infine, la possibilità di esportare in formato PRT o in formato STL la geometria compensata della parte.



Figura 35 Gruppo "Export"

La geometria esportata sarà un modello che presenterà le deformazioni in negativo calcolate dalla simulazione. Questo permette così al progettista di mandare direttamente in stampa questa geometria limitando notevolmente i tempi e i costi di riprogettazione del modello e di reimpostazione della stampante.

5 Caso di studio

Il seguente caso di studio è basato sull'analisi di stampabilità di una girante per compressori centrifughi in Inconel 718. La girante presa in considerazione nel nostro caso di studio, tuttavia, è una geometria approssimata della girante reale da realizzare. La scelta di prendere una geometria semplificata è stata effettuata per limitare i tempi di calcolo nella fase iniziale del caso di studio.

Essa è stata studiata considerando la tecnologia AM denominata "Powder Bed Fusion" (a letto di polvere), nello specifico il processo chiamato "Selective Laser Melting".

Tale analisi è stata intrapresa prendendo in considerazione diversi requisiti e problemi che tipicamente possono insorgere con l'utilizzo di questa tecnologia.

Inizialmente sono state effettuate delle valutazioni, attraverso analisi su modelli comparativi, riguardo i parametri che possono migliorare il processo di stampa.

Una volta definite le condizioni al contorno, è stato impostato il caso studio definitivo che prende in esame tutte le ipotesi fatte.

Su questo sono state tratte le considerazioni finali, analizzando gli obiettivi e le criticità designati inizialmente.

Le fasi dello studio consistono in:

1. Analizzare la stampabilità della girante;
2. Verificare una possibile collisione del job con il recoater durante la fase di stampa;
3. Verificare che la deformazione massima del componente, alla fine del processo di stampa, sia contenuto all'interno dell'intervallo di tolleranza;
4. Utilizzare una struttura di supporto facilmente removibile all'interno dei vani.

Tabella 1 Parametri di processo

<i>Parametri di processo</i>	<i>Valori</i>
<i>Layer thickness</i>	40
<i>Laser power</i>	285 W
<i>Velocity</i>	960 mm/s
<i>Stripe width</i>	10 mm
<i>Hatch Distance</i>	0,11 mm
<i>Stripe overlap</i>	0,8 mm

La geometria della parte utilizzata nel nostro caso di studio, illustrata nella *Figura 36* e *Figura 38*, è stata presa ritagliando un singolo vano dalla girante completa in modo da evitare tempi di calcolo troppo lunghi che renderebbero troppo pesante la simulazione.

Dai risultati ci si aspetta che la deformazione totale massima della girante non superi il valore di 0.5mm; tuttavia, questo valore potrebbe essere alterato dalla semplificazione della geometria inizialmente adoperata in quanto bisogna tener conto degli effetti di bordo causati dagli spigoli vivi dovuti al taglio CAD.

5.1 Modellazione della girante

Per evitare tempi di calcolo eccessivi abbiamo ridotto la geometria della girante completa in una geometria più semplice costituita da un vano singolo 2D in modo da poter avere risultati da poter via via implementare su geometrie più complesse.

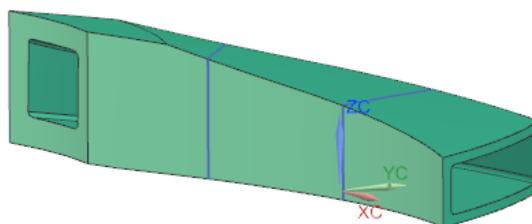


Figura 36 Vista in prospettiva Vano Singolo

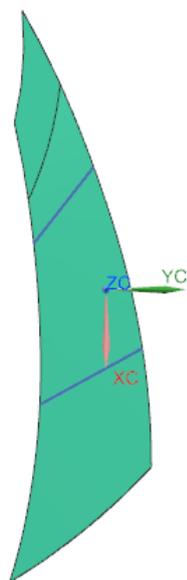


Figura 37 Vista dall'alto Vano Singolo

Presi in considerazione i migliori parametri, si è passati alla simulazione di una seconda geometria costituita da 3 vani adiacenti più i 3 vani opposti, simmetrici rispetto all'asse del canale di aspirazione della girante. Dai risultati ottenuti da queste due geometrie si può, infine, ottenere un comportamento approssimato della girante completa.

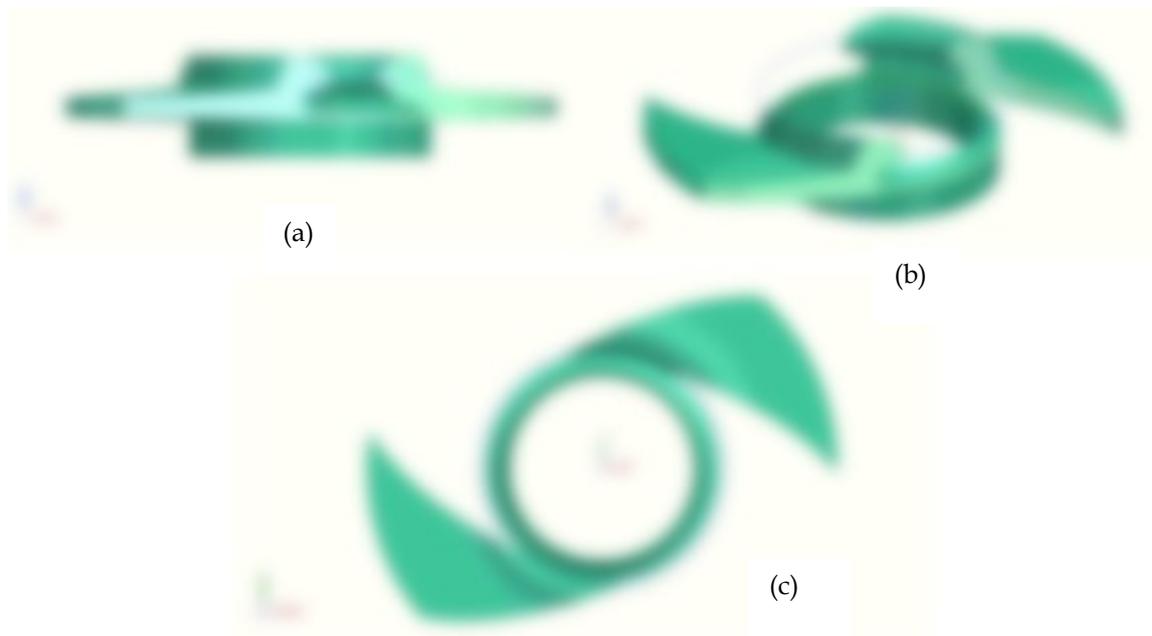


Figura 38(a) Vista frontale girante tagliata; (b) Vista in prospettiva girante tagliata; (c) Vista dall'alto girante tagliata

5.1.1 Scelta dei supporti

La scelta della morfologia dei supporti è stata fatta tenendo conto di due fattori principali:

1. Resistenza alle sollecitazioni meccaniche e termiche
2. Facilità di rimozione dopo il processo di stampa

Per soddisfare questi due requisiti, in questa prima fase del lavoro, si è ritenuto opportuno utilizzare principalmente soltanto due tipi di supporto presenti all'interno del software NX:

1. Supporti a blocco per supportare l'interno della girante

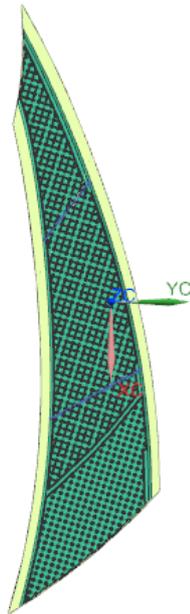


Figura 39 Vano singolo con supporti interni a blocco

2. Supporti di volume per supportare la base della girante

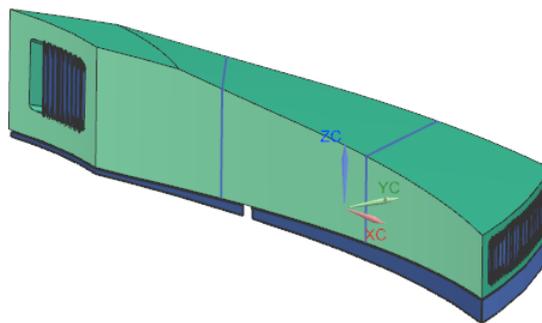


Figura 40 Vano singolo con supporti di volume sulla base

La scelta di queste due tipologie è stata condizionata dal fatto che nonostante siano difficilmente rimovibili dall'interno dei vani, i supporti a blocco, sono caratterizzati comunque da una buona robustezza che permette loro di contenere notevolmente le deformazioni.

5.2 Simulazione della girante

Inizialmente abbiamo simulato il vano singolo 2D della girante con parametri grossolani ottenendo una prima valutazione dei risultati finali, per poi procedere con un miglioramento di tali parametri per migliorare, di conseguenza, anche i risultati del processo.

I parametri di processo utilizzati nella prima prova di simulazione (molto grossolana) sono:

- 8 sezioni termiche in modalità automatico
- Spessore sezione meccanica di 3mm in modalità solutore
- Mesh tetraedrica del vano con fattore di scala di dimensionamento degli elementi impostato su 6 e dimensione minima dell'elemento pari al 10% del target
- Mesh tetraedrica del supporto con fattore di scala di dimensionamento degli elementi impostato su 1

Tabella 2 Parametri della prima simulazione del vano singolo

Parametri	Valore
Sezione termica (modalità automatico)	8
Sezione meccanica (modalità solutore)	3mm
Fattore di scala di dimensionamento degli elementi del vano	6
Dimensione minima dell'elemento (% del target)	10%
Fattore di scala di dimensionamento degli elementi del supporto	1

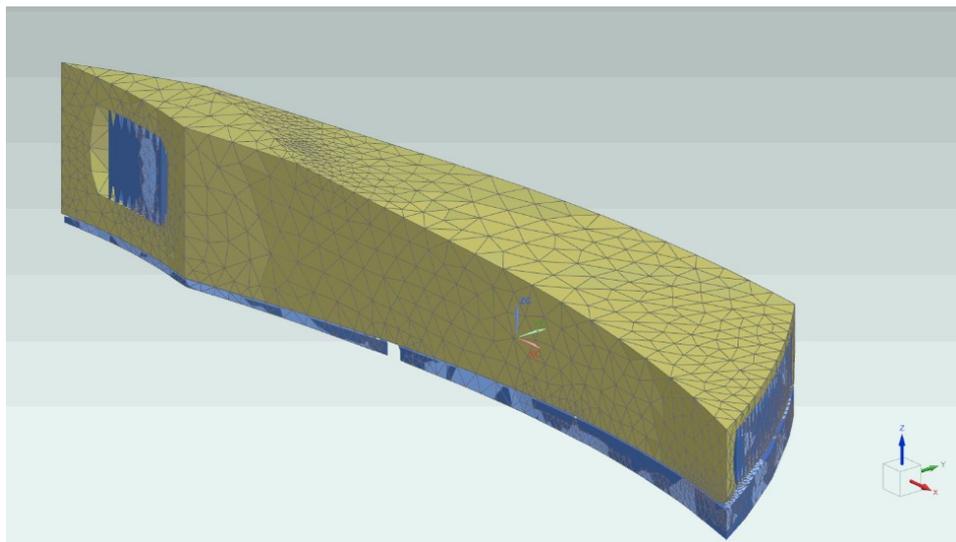


Figura 41 Mesh "grossolana" del vano singolo

Dalla mesh generata (Figura 41) e dai corrispondenti valori di slicing abbiamo ottenuto i seguenti risultati termici, di distorsione e di impatto con il recoater:

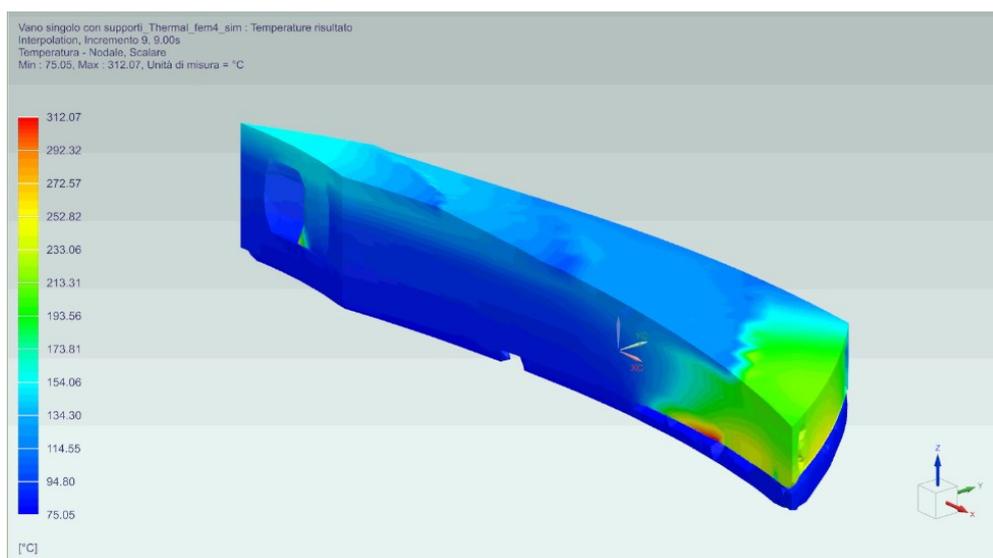


Figura 42 Risultati termici vano singolo con mesh "grossolana"

Dai risultati termici in Figura 42 vediamo che il punto di massimo surriscaldamento sono nelle zone più esterne del vano. Questi risultati sono influenzati dalla presenza degli effetti di bordo dovuti agli spigoli vivi causati dal taglio 2D della geometria CAD semplificata

Tabella 3 Riepilogo risultati termici vano singolo con mesh "grossolana"

Risultati termici	Valore
Surriscaldamento Min	75.05 °C
Surriscaldamento Max	312.07 °C

Dai risultati di deformazione totale in *Figura 43* si può osservare che lo stato deformativo al termine del processo di stampa del vano, supportato all'interno con strutture a blocco, tende ad aumentare all'aumentare del raggio fino a raggiungere un picco in corrispondenza del bordo del vano.

Anche in questo caso dobbiamo tener conto degli effetti di bordo che tenderanno ad aumentare i valori di deformazione in corrispondenza del taglio.

Da questi risultati deduciamo che in fase di stampa la girante tenderà a sollevarsi maggiormente in corrispondenza dei bordi del vano della girante.

Il picco massimo di deformazione totale corrisponde a 1.953mm, mentre il valore massimo della deformazione totale che possiamo considerare accettabile non dovrebbe essere superiore a 0.5mm.

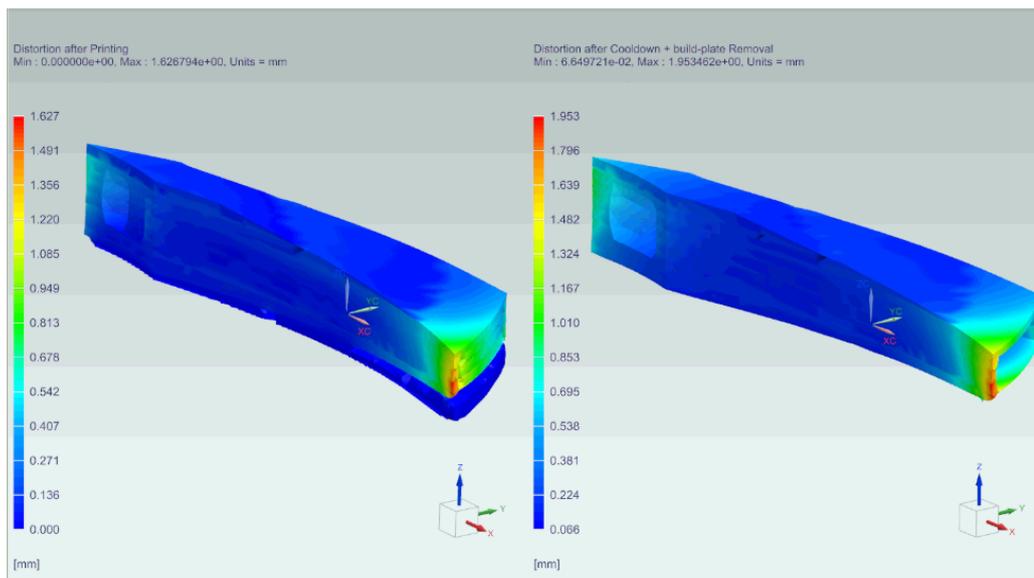


Figura 43 Risultati deformazione totale vano singolo con mesh "grossolana"

Le deformazioni localizzate lungo l'asse Z, mostrate in Figura 44, ci mostrano anche in questo caso come le deformazioni direzionali lungo Z siano molto al di sopra del valore accettabile e corrispondono a 1.799mm.

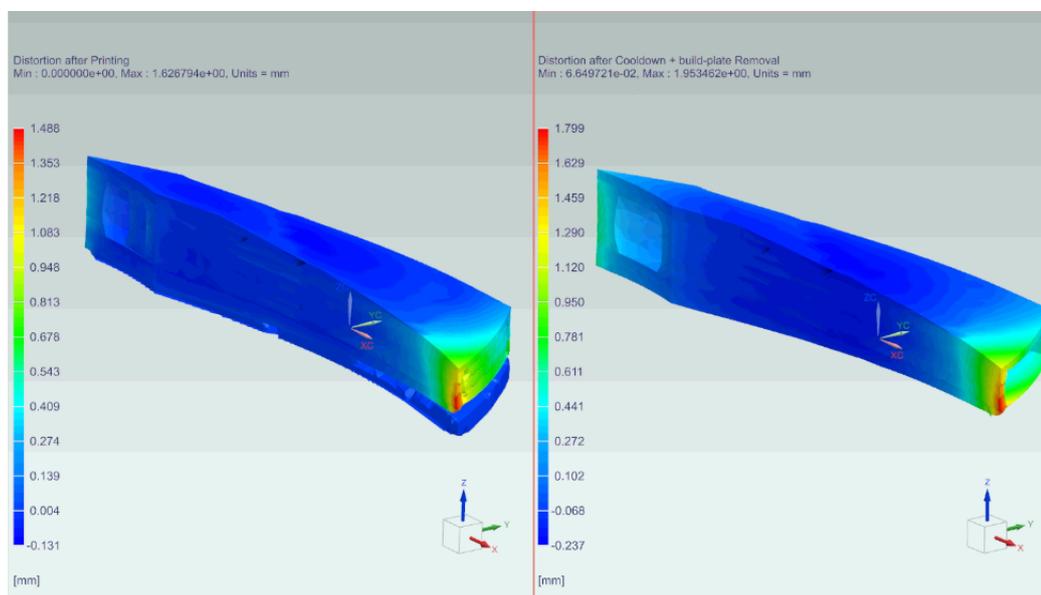


Figura 44 Risultati deformazioni localizzate lungo l'asse z del vano singolo con mesh "grossolana"

Tabella 4 Riepilogo deformazioni vano singolo con mesh "grossolana"

Deformazione	Valore accettabile	Valore ottenuto dopo la stampa	Valore ottenuto dopo il raffreddamento e rimozione supporti
Totale	0.5mm	1.627mm	1.953mm
Localizzate lungo l'asse Z	0.5mm	1.488mm	1.799mm

Per verificare che durante la fase di stampa il recoater non vada ad impattare il materiale appena solidificato, depositato nel layer precedente, bisogna analizzare le collisioni con il recoater che vengono fornite direttamente dal software.

I valori rappresentati nella *Figura 45* rappresentano tutti i layer in cui viene rilevata una deformazione localizzata lungo l'asse z che supera un valore di 0.04mm (40 micron) corrispondente allo spessore del layer (layer thickness).

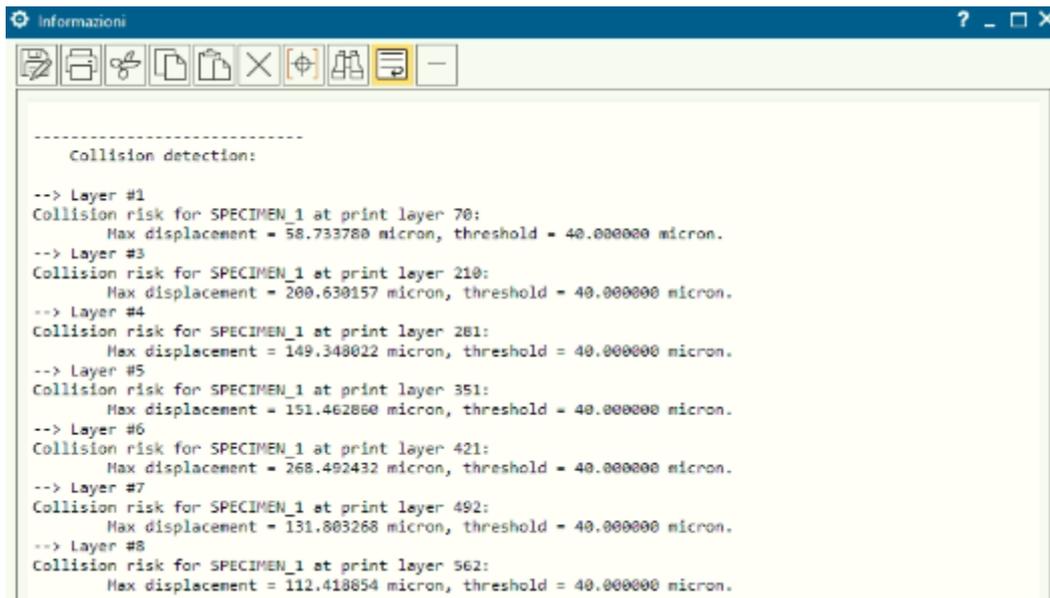


Figura 45 Collisioni recoater vano singolo con mesh "grossolana"

Il punto massimo di deformazione si ha nel layer 421 (evidenziato in rosso nella Tabella 5) dove corrisponde una deformazione di circa 268.50 micron.

Tabella 5 Riepilogo collisioni recoater vano singolo con mesh "grossolana"

Layer	Deformazione per layer (in micron)
70	58.73
210	200.63
281	149.35
351	151.46
421	268.50
492	131.80
562	112.42

Da questo si deduce che durante la fase di stampa ci sono zone in cui la deformazione lungo l'asse z supera il valore massimo consentito provocando un impatto del job con il recoater della stampante che potrebbe interrompere il processo.

Se i valori di deformazione massima si tenessero comunque limitati, tale problema potrebbe essere risolto attraverso l'utilizzo di un soft recoater che riesce a deformarsi quanto basta per non provocare l'interruzione della stampa.

Dai primi risultati, ottenuti simulando un vano singolo con parametri “grossolani”, abbiamo via via migliorato i parametri della mesh e delle sezioni termiche e meccaniche ottenendo miglioramenti anche nei risultati di deformazione e surriscaldamento della simulazione.

Di seguito riporteremo i parametri e i risultati ottenuti dopo vari step di miglioramento.

I parametri di processo utilizzati in questa prova di simulazione (mesh più “fine”) sono:

- 15 sezioni termiche in modalità automatico
- Spessore sezione meccanica di 2.5mm in modalità solutore
- Mesh tetraedrica del vano con fattore di scala di dimensionamento degli elementi impostato su 2 e dimensione minima dell’elemento pari al 8% del target
- Mesh tetraedrica del supporto con fattore di scala di dimensionamento degli elementi impostato su 1

Tabella 6 Parametri della seconda simulazione del vano singolo

Parametri	Valore
Sezione termica (modalità automatico)	15
Sezione meccanica (modalità solutore)	2.5mm
Fattore di scala di dimensionamento degli elementi del vano	2
Dimensione minima dell’elemento (% del target)	8%
Fattore di scala di dimensionamento degli elementi del supporto	1

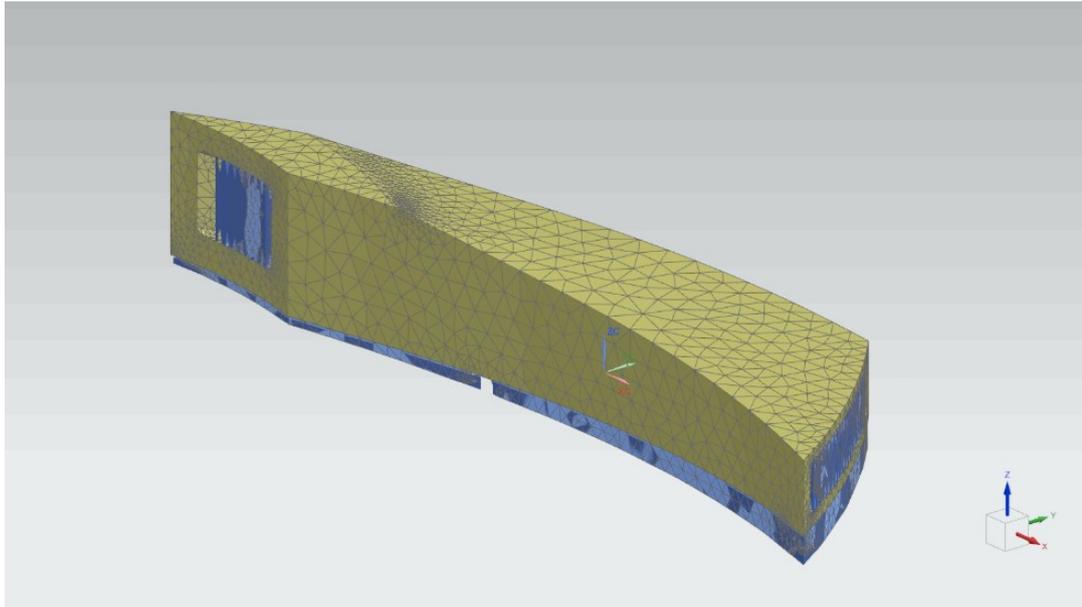


Figura 46 Mesh "fine" del vano singolo

Dalla mesh generata (Figura 46) e dai corrispondenti valori di slicing abbiamo ottenuto i seguenti miglioramenti dei risultati termici, di distorsione e di impatto con il recoater:

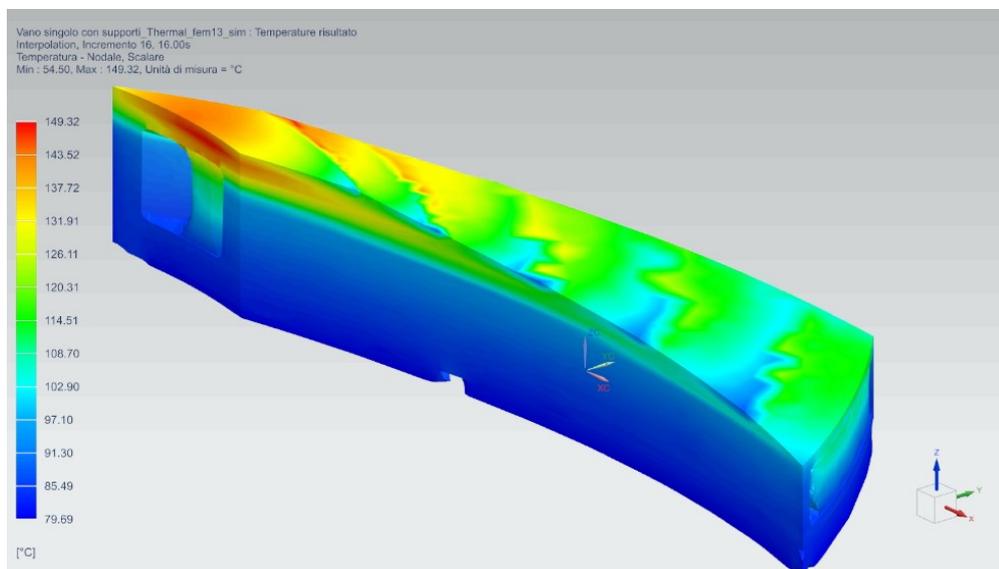


Figura 47 Risultati termici vano singolo con mesh "fine"

Dai risultati termici in Figura 47 vediamo che la temperatura massima di surriscaldamento non è più soltanto sui bordi del vano ma è dislocata su tutta la superficie del vano superiore, sulla parte più vicina al canale di aspirazione.

Anche in questo caso tale risultato è influenzato dalla presenza di spigoli vivi e quindi dagli effetti di bordo dovuti al taglio della girante.

A questo punto è possibile fare un confronto dei risultati ottenuti dalle due simulazioni effettuate, riportando nella *Tabella 7*:

Tabella 7 Risultati termici vano singolo con mesh "fine"

Risultati termici	Valori prima simulazione	Valori seconda simulazione
Surriscaldamento Min	75.05 °C	54.50 °C
Surriscaldamento Max	312.07 °C	149.32 °C

Analizzando i risultati, abbiamo avuto un sensibile miglioramento anche dei risultati relativi alla deformazione del componente.

Infatti, confrontando i risultati ottenuti dalla prima simulazione e dalla seconda simulazione, le deformazioni totali (*Figura 48*) risultano avere un valore minore di deformazione, pari 0.752mm nel punto massimo di deformazione che corrisponde al taglio della girante, dove sono presenti gli effetti di bordo.

Mentre in prossimità del bordo del vano le deformazioni rappresentate in verde si mantengono su un valore compreso tra lo 0.455mm/0.574mm, valori comunque accettabili.

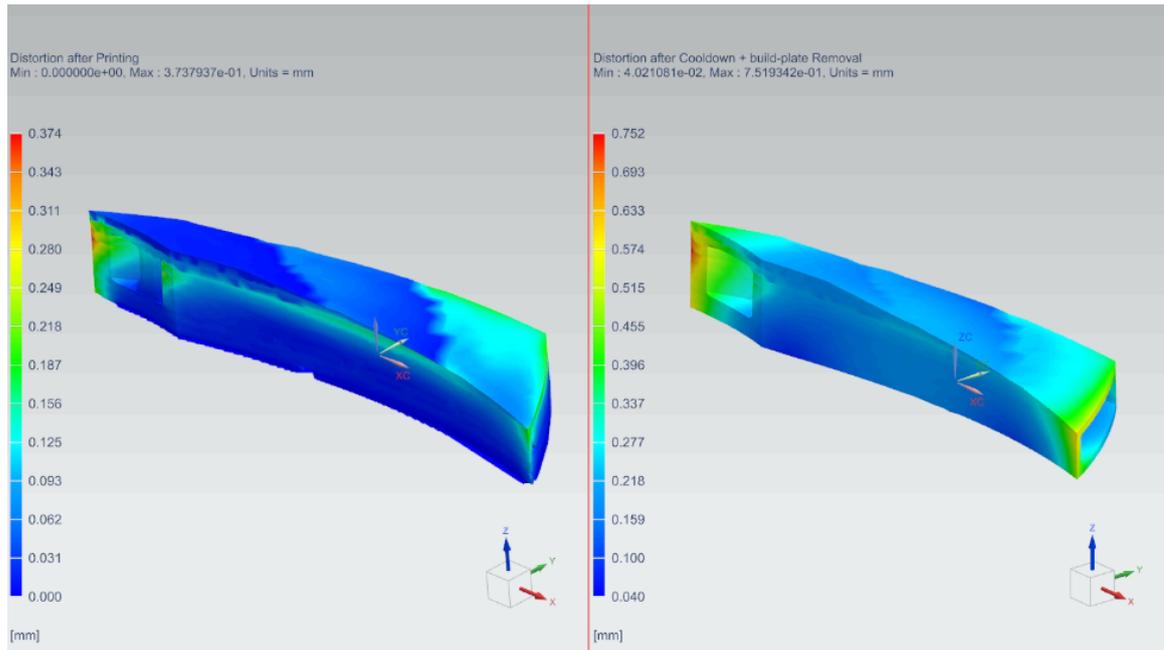


Figura 48 Deformazione totale vano singolo con mesh "fine"

Anche le deformazioni localizzate lungo l'asse Z (Figura 49) presentano valori inferiori di deformazione, raggiungendo lo 0.579mm in prossimità degli spigoli vivi e, comunque, mantenendosi in un intorno tra lo 0.152mm/0.436mm nelle zone più sollecitate.

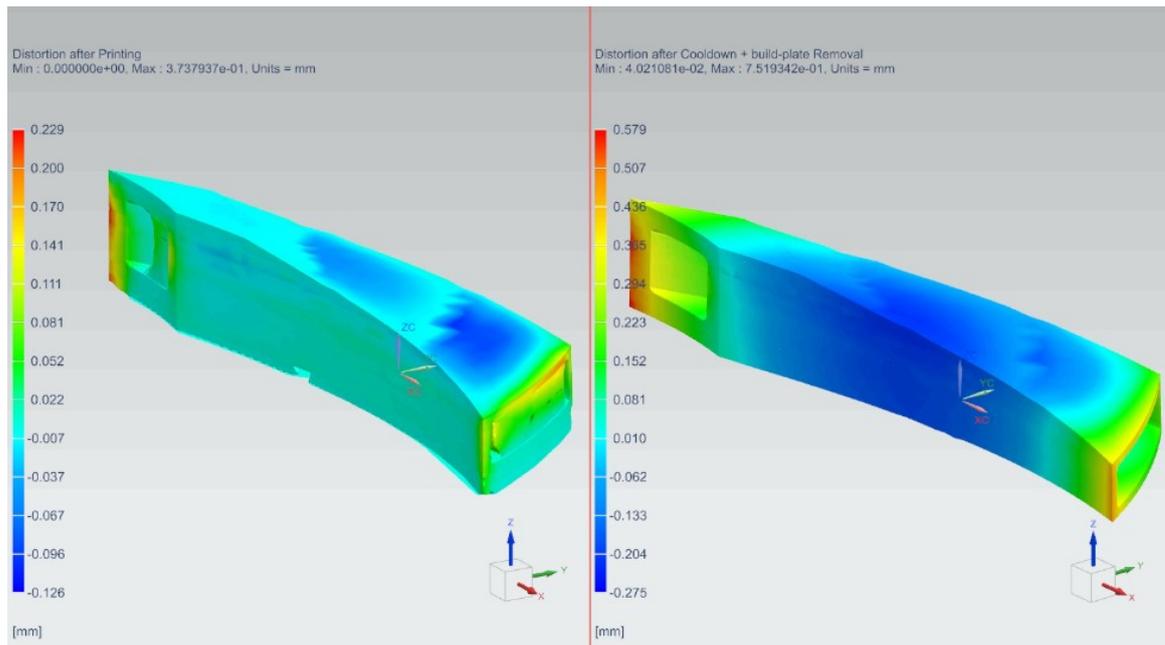


Figura 49 Deformazione localizzata lungo l'asse Z vano singolo con mesh "fine"

Confrontando le due simulazioni:

Tabella 8 Confronto deformazioni tra 1° e 2° simulazione

Deformazione	Valore accettabile	Valore prima simulazione ottenuto dopo il raffreddamento e rimozione supporti	Valore seconda simulazione ottenuto dopo il raffreddamento e rimozione supporti
Totale	0.5mm	1.953mm	0.752mm
Localizzata lungo l'asse Z	0.5mm	1.799mm	0.579mm

Come ultima analisi e confronto, riportiamo di seguito nella *Figura 50* le collisioni rilevate con il recoater nel caso di parametri di simulazione migliorati

```

-----
Collision detection:
--> Layer #6
Collision risk for SPECIMEN_1 at print layer 375:
    Max displacement = 49.597527 micron, threshold = 40.000000 micron.
--> Layer #7
Collision risk for SPECIMEN_1 at print layer 437:
    Max displacement = 60.582645 micron, threshold = 40.000000 micron.
--> Layer #8
Collision risk for SPECIMEN_1 at print layer 500:
    Max displacement = 74.804787 micron, threshold = 40.000000 micron.

```

Figura 50 Collisioni con il recoater vano singolo con mesh "fine"

Questi risultati confermano quanto detto precedentemente infatti si è passati da sette layer che generavano una collisione con il recoater, ad avere soltanto tre layer che impattano il recoater nella seconda prova effettuata migliorando il processo.

Il punto con maggiore deformazione in questo caso è sul layer 500 (valore evidenziato in rosso nella *Tabella 9*) dove si raggiunge una deformazione massima di 74.80 micron rispetto i 40 micron di soglia.

Tabella 9 Riepilogo collisioni recoater vano singolo con mesh "fine"

Layer	Deformazione per Layer (in micron)
375	49.59
437	60.58
500	74.80

Nonostante i risultati ottenuti andando a migliorare i parametri di processo sia più accettabili risultano essere comunque al limite dell'accettabilità.

Questo perché, come ripetuto più volte, stiamo considerando una geometria tagliata che presenta effetti di bordo molto accentuati.

Infine, abbiamo sfruttato questi risultati per implementare i migliori parametri e simulare una geometria contenente 3 vani e 3 vani opposti della girante per valutare le deformazioni effettive sulla girante completa, limitando gli effetti di bordo.

Facendo riferimento ai parametri in *Tabella 6*, si ottiene un mesh come quella in *Figura 51* del nuovo componente

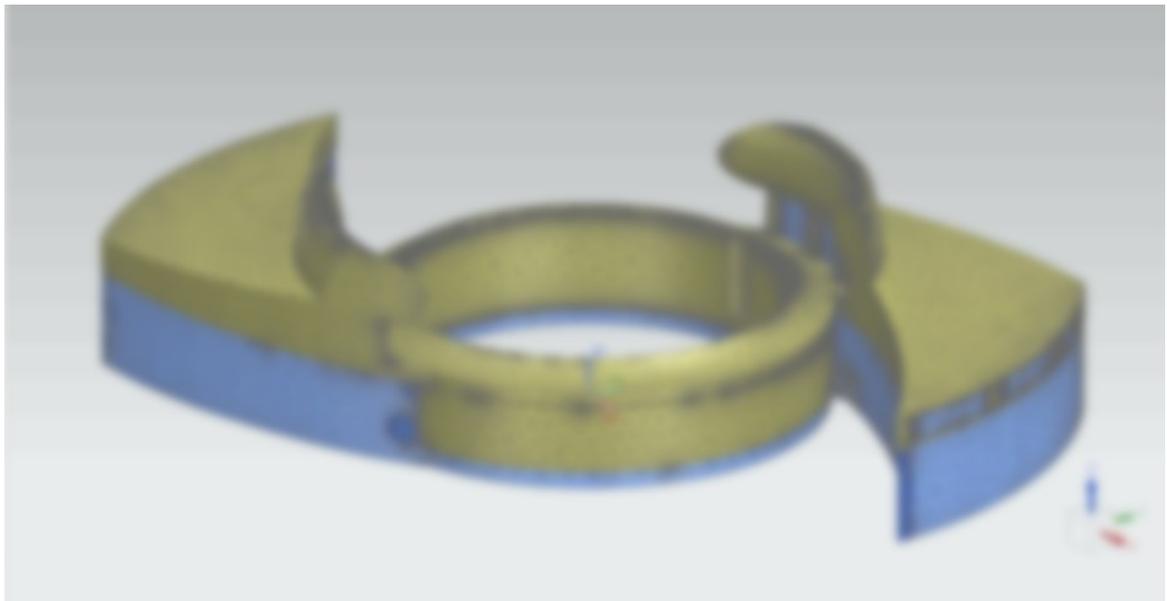


Figura 51 Mesh 3 vani più 3 vani opposti

Dai risultati in *Figura 52* vediamo come le zone che presentano un surriscaldamento elevato sono presenti non più sul bordo del singolo vano, al contrario di come visto invece nella simulazione del vano singolo, questo perché, in questo caso, sono limitati gli effetti di bordo dovuti al taglio della geometria CAD.

Elevati valori di surriscaldamento invece sono presenti sulla parte superiore del canale di aspirazione e rimangono contenuti sulla parte superiore dei vani della girante.

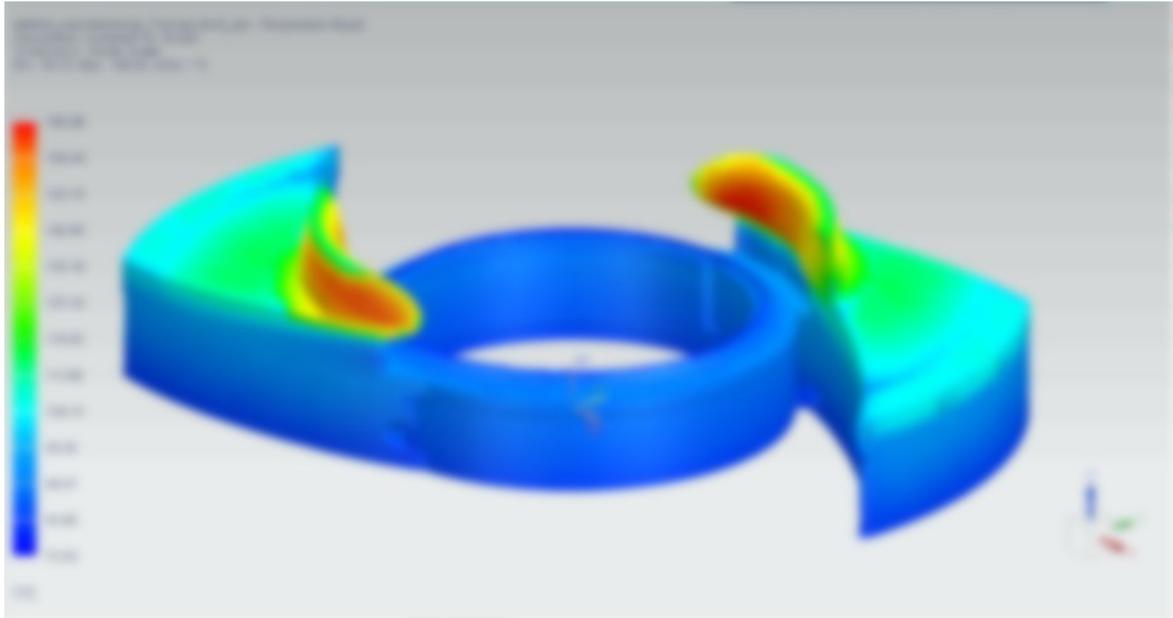


Figura 52 Risultati termici 3 vani più 3 vani opposti

Di seguito, si propone una tabella riepilogativa dove vengono messe a confronto le temperature del vano singolo e quelle della geometria appena simulata ottenuta da tre vani più i tre vani opposti:

Tabella 10 Confronto risultati termici

Risultati termici	Vano singolo	3 vani più 3 vani opposti
Surriscaldamento Min	54.50 °C	49.70°C
Surriscaldamento Max	149.32 °C	166.26°C

Passiamo ora l'analisi delle deformazioni totali dei vani.

Analizzando i risultati mostrati in *Figura 53* vediamo che rimangono elevati valori di deformazione totale, soprattutto, nelle zone sul bordo dei vani della girante.

Tali valori non possono essere considerati idonei in quanto superano il valore massimo accettabile pari a 0.5 mm.

In questo caso sul bordo del vano si ha una deformazione massima pari a 4.694 mm corrispondente alla deformazione totale dopo il raffreddamento e alla rimozione dei supporti.

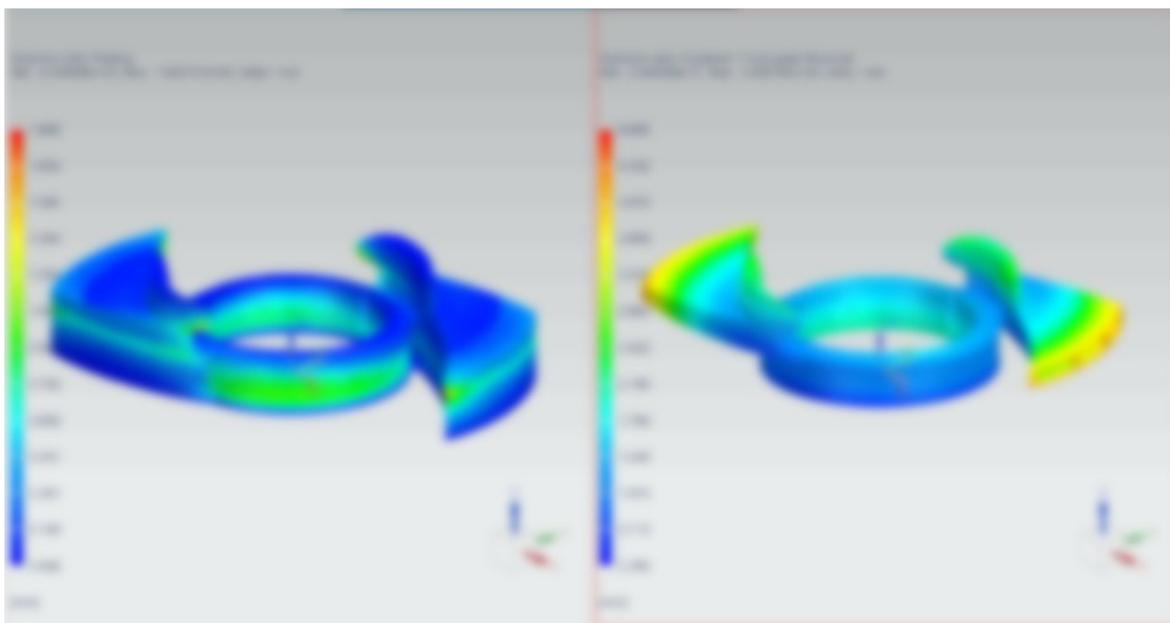


Figura 53 Deformazione totale 3 vani più 3 vani opposti

Anche nel caso delle deformazioni localizzate lungo l'asse Z, mostrate in Figura 54, le deformazioni dei layer rimangono molto elevate e lontane dal valore massimo accettabile.

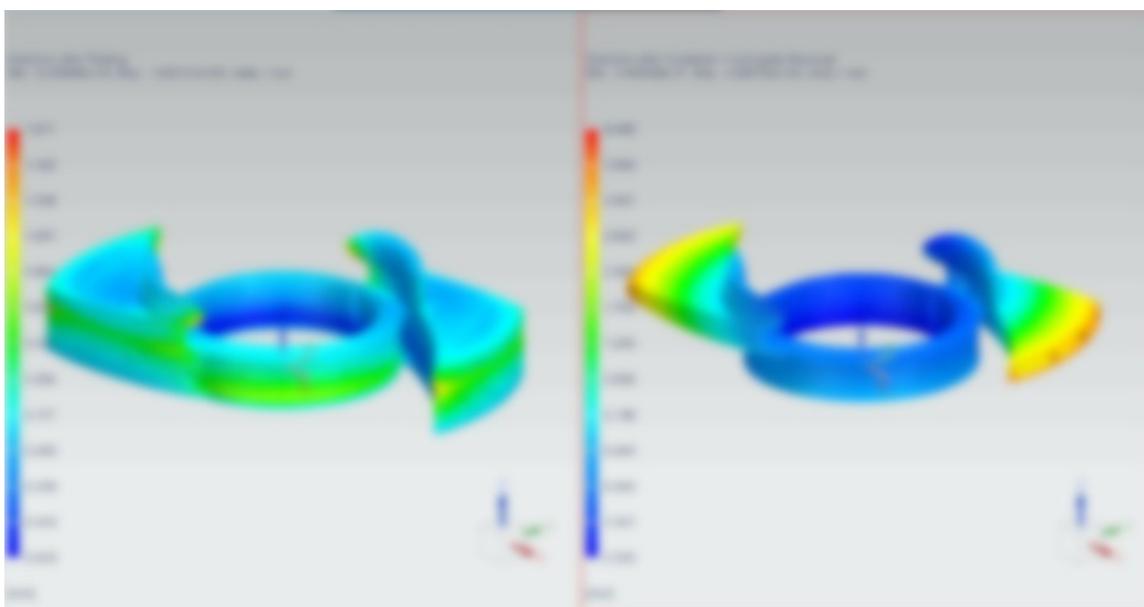


Figura 54 Deformazioni localizzate lungo Z girante con 3 vani più 3 vani opposti

Confrontando i risultati ottenuti, simulando il vano singolo e i tre vani più i tre vani opposti, possiamo ricavarci la *Tabella 11* Confronto deformazioni che riepiloga il valore di tutte le deformazioni totali:

Tabella 11 Confronto deformazioni

Deformazione	Valore accettabile	Vano singolo	3 vani più 3 vani opposti
Totale	0.5mm	0.752mm	4.694mm
Localizzata lungo l'asse Z	0.5mm	0.579mm	4.499mm

Le collisioni con il recoater della stampante in questo caso sono molto elevate; per cui, sicuramente, in condizioni reali la stampa non giungerà a termine.

Data la presenza di molteplici collisioni, nella *Tabella 12* Collisioni recoater di seguito riporteremo soltanto i valori di quelle più accentuate:

Tabella 12 Collisioni recoater

Layer	Deformazione per Layer (in micron)
627	422.85
690	343.74
1004	459.3
1067	390.72
1129	331
1192	218.35

6 Risultati e discussione

Dai risultati ottenuti dalla simulazione della geometria più dettagliata della girante, si osserva una tendenza al sollevamento della corona esterna durante la fase di stampa che porta a numerose collisioni con il recoater della stampante e alla formazione di deformazioni molto elevate che rendono inutilizzabili la geometria ottenuta nella fase finale. Per contenere tali deformazioni bisognerebbe effettuare ulteriori simulazioni individuando i parametri di processo che meglio riescono a contenere quest'ultime. Un'altra soluzione che potrebbe essere adoperata riguarda l'aggiunta di un sovrametallo all'esterno dei vani della girante, in modo tale da poter effettuare un'operazione di sottrazione del materiale dopo la stampa.

Un'altra possibile soluzione è quella di adoperare strutture di supporto più robuste e resistenti o di procedere con un posizionamento della parte all'interno del volume di costruzione a 45° (per le proprietà dell'Inconel 718).

6.1 Possibili sviluppi futuri

Gli sviluppi futuri di questo studio potranno essere realizzati andando ad effettuare uno studio sull'intera geometria della girante, simulando il processo di stampa tenendo come riferimento i parametri forniti dall'azienda produttrice che permettano di ridurre il tempo e i costi di realizzazione.

Un altro punto fondamentale per poter avere maggiori informazioni sul nostro caso di studio è quello di andare a valutare l'introduzione di strutture di supporto "lattice" ed effettuare prove sperimentali di stampa per avere un riscontro diretto sui migliori parametri da utilizzare. Studiare tutte le tecnologie di rimozione dei supporti a disposizione ed individuare quella con compromessi di costo e affidabilità migliore.

Inoltre, sarebbe interessante anche andare ad effettuare uno studio economico dell'iniziativa, tenendo conto di tutti i tempi, materiali e lavorazioni effettuate per la lavorazione del componente.

7 Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di verificare la stampabilità di una girante centrifuga per mezzo della tecnologia denominata Selective Laser Beam Melting.

I punti sui quali si è basato lo studio sono stati:

- Generare una geometria semplificata della girante
- Modellare geometria con supporti facilmente rimovibili all'interno dei vani
- Individuare i migliori parametri di processo
- Verificare che le deformazioni massime del componente siano contenute all'interno dell'intervallo di tolleranza
- Verificare una possibile collisione del job con il recoater durante la fase di stampa
- Implementare i risultati ottenuti su un singolo vano su una geometria più complessa per dedurre delle conclusioni sul comportamento dell'intera girante

In conclusione, si evince che per ottenere i migliori risultati in termini di deformazioni e stress residuo dalla simulazione è opportuno:

- Aumentare il numero di sezioni nella fase di slicing
- Generare una mesh del componente molto fitta che approssimi bene l'andamento della geometria
- Considerare l'introduzione di strutture "lattice" di supporto all'interno dei vani

Durante le prime fasi della stampa si è visto che con molta probabilità il recoater possa impattare con il job nella fase di build, per questo motivo è opportuno utilizzare un soft recoater che si deformi a sufficienza così da non interrompere la stampa.

Inoltre, da altri studi effettuati nel Dipartimento si evince che utilizzando dei supporti di tipo "lattice" si permette la rimozione di essi per mezzo di fluidi di lavoro o elettrodi a favore di operazioni di finitura superficiale nel post processing.

Inoltre, evidenziando un sollevamento della corona in corrispondenza del diametro esterno per effetto di deformazioni crescenti con il raggio si è pensato di utilizzare del sovrametallo in corrispondenza del vano verso l'esterno. Il sovrametallo serve proprio per contenere le deformazioni sul bordo esterno e sarà facilmente rimosso per mezzo di operazioni di taglio convenzionali.

8 Bibliografia e sitografia

- *Figura 1, Figura 2*
https://www.researchgate.net/publication/331313275_Summarization_of_3D-Printing_Technology_in_Processing_Development_of_Medical_Implants/figures?lo=1
- *Figura 3* <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-IT.pdf>
- *Figura 4*
https://www.researchgate.net/publication/303037352_Macroscopic_simulation_and_experimental_measurement_of_melt_pool_characteristics_in_selective_electron_beam_melting_of_Ti-6Al-4V/figures?lo=1
- *Figura 6, Figura 7*, Crialet al., International Journal of Machine Tools and Manufacture 121 (2017)
- [1] Inconel 718,
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580316300031?casa_token=XoL5nO13v2EAAAAA:RIpKucM742vuoJYLPB1dCdkefmkEkvieRsLTtPHT1_IgJ0mVoubpGcknKoearvmTtoVQmiN1WA#bb0015
- Workflow Siemens NX, https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/289054037/doc/PL20200601120302950.am/html/xid1932288_v4
- *Figura 12*, <https://team3d.it/product/nx-siemens/>
- Metodo Inherent-Strain (IS), https://www.additive-lab.com/post/inherent_strain_method,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860417302877>
- Tesi di Laurea Magistrale, Stefano D'Accurzio, 2019-2020, "Tecniche e strumenti per la progettazione di supporti nella realizzazione di componenti in additive manufacturing"