



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**CALIBRAZIONE DEL SOFTWARE SIEMENS
NX PER LA SIMULAZIONE DEL PROCESSO
ADDITIVE L-PBF**

**SIEMENS NX SOFTWARE CALIBRATION FOR
THE SIMULATION OF THE ADDITIVE L-PBF
PROCESS**

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

SIMONE CANTORE

CORRELATORE:

PROF.SSA ELEONORA SANTECCHIA

“Come raggiungere un traguardo? Senza fretta ma senza sosta.”

Johann Wolfgang von Goethe

I. Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Marco Mandolini, che mi ha permesso di intraprendere questo percorso di tirocinio sotto la sua supervisione. Durante tutto il periodo di lavoro non sono mai venute a mancare disponibilità e gentilezza. Porterò con me, sicuramente, la gratificazione per gli attestati di stima elargiti alla fine del lavoro di tirocinio, ma soprattutto per la fiducia che, durante tutto il percorso, è sempre trasversa.

Ringrazio l'ing. Alberto Santoni, sempre al nostro fianco durante il lavoro di tirocinio, disponibile e sempre presente per aiuto, confronto e consigli. È stata sicuramente un'esperienza di arricchimento personale e, soprattutto, ha mostrato, anche se per poco tempo, quanto possa essere stimolante lavorare in un "team", seppur sostanzialmente non lo fosse.

Ringrazio i miei genitori, mio fratello, mia nonna e tutti i membri della mia famiglia che, con consigli o anche, com'è giusto che sia, con duri confronti, mi hanno incoraggiato e gratificato nei momenti sereni di questo lungo percorso, ma soprattutto supportato e sostenuto nei tanti momenti in cui pensavo di non farcela e di non essere adatto per questa facoltà.

Ringrazio tutti quegli amici che in questi anni mi sono stati vicino, amici con cui consigliarsi, con cui sfogarsi, nei quali cercare parole di conforto quando, da solo, non riuscivo a trovarne, amici con cui, semplicemente, passare del tempo libero che, inconsapevolmente, mi ha aiutato a ritrovare equilibrio.

Infine, non per importanza, ringrazio Chiara, la mia ragazza, che da sempre è per me fonte d'ispirazione, per sensibilità, intelligenza, forza di volontà, senso del dovere. Una ragazza che, nonostante gli ostacoli che sul proprio cammino possono essere posti, ha sempre trovato la forza di guardare avanti, senza piegarsi. Nonostante gli ostacoli e i problemi, non ha mai indietreggiato di fronte i miei sfoghi, i miei dubbi, i miei periodi bui di questi anni, riuscendo sempre, con parole di conforto, con lucidità e saggezza e, soprattutto, con l'ascolto, a rasserenarmi ed a tranquillizzarmi, strappandomi sempre, alla fine di tutto, un sorriso, permettendomi di concentrarmi nuovamente sul percorso intrapreso. Se, durante questi anni, sono sempre riuscito a rialzarmi, tantissimo merito va a lei, ai suoi consigli, al suo esempio, al suo appoggio.

II. Sommario

I. Ringraziamenti	1
II. Sommario	i
III. Elenco delle figure	ii
IV. Elenco delle tabelle	iv
1 Introduzione	1
2 Additive manufacturing	3
2.1 Punti di forza e limiti dell'AM	7
2.2 Classificazioni dei processi additive	12
2.2.1 Powder bed fusion	17
2.3 Simulazione dei processi AM	19
2.4 Strutture lattice	21
3 Caso studio	24
3.1 Omogeneizzazione dei supporti di simulazione	27
3.1.1 Procedimento in NX di omogeneizzazione dei supporti	28
3.2 Calibrazione dei provini stampati	36
3.2.1 Procedimento in NX di calibrazione dei provini	42
3.3 Calibrazione dei parametri di stampa in NX	57
4 Risultati e discussione	60
5 Conclusioni	73
6 Bibliografia e sitografia	76

III. Elenco delle figure

Figura 2.1 Postazione stereolitografia.....	3
Figura 2.2 Risultati con variazioni del layer thickness	4
Figura 2.3 Ciclo di produzione additive manufacturing.....	6
Figura 2.4 Geometria generata con additive manufacturing.....	7
Figura 2.5 Telaio bicicletta generato con tecniche AM	10
Figura 2.6 Postazione per material extrusion	13
Figura 2.7 Postazione per material jetting	14
Figura 2.8 Postazione per sheet lamination	15
Figura 2.9 Postazione per directed energy deposition	16
Figura 2.10 Postazione per powder bed fusion	16
Figura 2.11 Struttura supportata e dopo rimozione dei supporti.....	17
Figura 2.12 Semplificazione metodo IS.....	21
Figura 2.13 Struttura lattice	22
Figura 2.14 Celle dominate dalla trazione (sinistra) e celle dominate dall'allungamento (destra)	23
Figura 3.1 Renishaw AM250	24
Figura 3.2 Deformazioni in direzione Z dopo la stampa (sinistra) e dopo rimozione dei supporti e piatto di stampa (destra).....	25
Figura 3.3 Camera interna Renishaw AM 250	26
Figura 3.4 Cella FCCZ: 2x0.5 mm (A), 5x0.5 mm (B)	28
Figura 3.5 Barra a nastro.....	29
Figura 3.6 Finestra corrispondente al comando "Crea FEM"	29
Figura 3.7 Modello termico con presenza di polvere	30
Figura 3.8 Finestra corrispondente al comando "Tetraedro 3D"	31
Figura 3.9 Finestra corrispondente al comando "Modifica visualizzazione"	32
Figura 3.10 Finestra corrispondente al comando "Assegna proprietà"	32
Figura 3.11 Finestra corrispondente al comando "Definisci soluzione"	33
Figura 3.12 Finestra corrispondente al comando "Omogeneizzazione"	34
Figura 3.13 Finestra corrispondente alla sezione "Saving options"	35
Figura 3.14 Foglio XML "parameters_support"	35

Figura 3.15 Curva α -C.....	37
Figura 3.16 Provini di calibrazione in NX	41
Figura 3.17 Provini reali stampati	42
Figura 3.18 Waist in posizione 1; root in posizione 2	43
Figura 3.19 Posizione piani di riferimento superiori	43
Figura 3.20 Distribuzioni di punti su provini con misurazioni 1-3	44
Figura 3.21 Piani zona superiore del provino	45
Figura 3.22 Piani zona inferiore del provino	45
Figura 3.23 Distribuzioni baricentri zona centrale provini.....	46
Figura 3.24 Distribuzione baricentri misurazione 4 e misurazione 5	47
Figura 3.25 Finestra corrispondente al comando “Global Settings”	49
Figura 3.26 Finestra corrispondente al comando “Print Jobs”	50
Figura 3.27 Finestra corrispondente al comando “Definisci sezionamento termico”	50
Figura 3.28 Finestra corrispondente al comando “Definisci sezionamento meccanico”	51
Figura 3.29 Finestra corrispondente al comando “Mesh tetr. 3D”	52
Figura 3.30 Finestra corrispondente al comando “Opzioni calcolo”	53
Figura 3.31 Schermata con valori calibrazione	54
Figura 3.32 Schermata valori curva di calibrazione.....	55
Figura 3.33 Curva di calibrazione caso di studio (EOS M290)	55
Figura 3.34 File XML parametri di processo.....	56
Figura 3.35 Schermata scelta parameter set	58
Figura 3.36 Parametri meshatura caso di studio	59
Figura 4.1 Zone considerate per le misurazioni dei provini.....	61
Figura 4.2 Curva di calibrazione (Renishaw AM250).....	63
Figura 4.3 Misurazioni su superficie superiore bordo e superficie inferiore all’interno del condotto ...	64
Figura 4.4 Modello condotto reale.....	67
Figura 4.5 Deviazioni risultati simulazioni – deformazioni reali.....	70
Figura 5.1 Componente centrifugo con supporti	74
Figura 5.2 Puntone di supporto	75

IV. Elenco delle tabelle

Tabella 3.1 Risultati misurazioni waist (EOS M290).....	48
Tabella 3.2 Risultati misurazioni root (EOS M290)	48
Tabella 3.3 Valori finali (EOS M290)	48
Tabella 4.1 Risultati misurazioni waist (Renishaw AM250)	61
Tabella 4.2 Risultati misurazioni root (Renishaw AM250)	62
Tabella 4.3 Valori finali (Renishaw AM250)	62
Tabella 4.4 Risultati simulazioni materiale non calibrato condotto rettificato.....	65
Tabella 4.5 Risultati simulazioni materiale calibrato condotto rettificato	66
Tabella 4.6 Variazioni percentuali materiale calibrato condotto rettificato.....	66
Tabella 4.7 Variazioni percentuali materiale non calibrato condotto rettificato	67
Tabella 4.8 Risultati simulazioni materiale non calibrato condotto reale	68
Tabella 4.9 Risultati simulazioni materiale calibrato condotto reale.....	68
Tabella 4.10 Variazioni percentuali materiale calibrato condotto reale	69
Tabella 4.11 Variazioni percentuali materiale non calibrato condotto reale	69
Tabella 4.12 Valori seconda misurazione	71
Tabella 4.13 Variazioni percentuali tra le due misurazioni	71
Tabella 4.14 Confronto risultati diverse calibrazioni	72
Tabella 4.15 Confronto variazioni percentuali	72

1 Introduzione

Il seguente lavoro, svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), si pone come obiettivo lo studio del software Siemens NX e, per la precisione, del modulo Additive Manufacturing, adibito all'operazione di simulazione del processo di stampa tramite la tecnica additive L - PBF (Laser - Powder Bed Fusion).

Il primo capitolo sarà incentrato sullo stato dell'arte relativo al mondo dell'Additive Manufacturing, introducendone vantaggi e svantaggi e le varie tipologie di tecniche sviluppate grazie a questo nuovo concetto di lavorazioni.

Nei capitoli successivi, poi, sarà trattato il caso di studio, su cui verte tutto il lavoro descritto in questa tesi.

Dai lavori precedenti è risultato evidente come il software fosse poco sensibile alle variazioni di alcuni parametri di stampa, non ottenendo alcuna differenza nei risultati delle simulazioni. Lo studio sarà incentrato, appunto, sull'applicazione di operazioni come l'omogeneizzazione dei supporti e la calibrazione del materiale in funzione dei parametri di stampa, al fine di apportare un miglioramento al processo di simulazione. La prima parte dello studio è stata incentrata sullo studio e la comprensione del procedimento, all'interno di NX, che caratterizza ciascuna operazione. Si sono rivelate un ottimo supporto le guide, presenti sul sito della Siemens, focalizzate sulla descrizione sia del procedimento che delle peculiarità che caratterizzano le operazioni di omogeneizzazione e di calibrazione.

Una volta appresi tali concetti e aver acquisito dimestichezza con l'utilizzo del software, integrate le precedenti operazioni, si è passato alla seconda parte dello studio, durante la quale si è potuto utilizzare i risultati ottenuti dall'omogeneizzazione e dalla calibrazione all'interno delle varie simulazioni, permettendo quindi il confronto tra i risultati delle simulazioni fatte utilizzando set di parametri calibrati e quelli ottenuti dai set di parametri impostati di default all'interno di NX. In questo modo è stato possibile trarre spunti da questi confronti e maturare delle considerazioni sulle stesse operazioni di calibrazione e omogeneizzazione.

2 Additive manufacturing

Tra le lavorazioni che, nel tempo, si sono rese indispensabili e che sono considerate cardini della storia della tecnologia meccanica, si posizionano sicuramente le lavorazioni con asportazione di truciolo.

Tali lavorazioni, attualmente, vengono identificate con il termine “lavorazioni sottrattive”, in parte per la creazione di scarti durante il processo, ma principalmente per distinguerle da una tipologia di processi che, negli anni '80, ha ottenuto grande consenso, come descritto in [1].

Questa nuova tecnologia prevedeva la costruzione, aggiungendo progressivamente il materiale, del modello interessato, prendendo il nome, appunto, di “lavorazioni additive”. Nacque in America, per la precisione, nel 1986, quando Charles W. Hull depositò il brevetto per la “stereolitografia”, cioè un processo che prevedeva l'utilizzo di una fonte d'energia in grado di polarizzare del materiale monomerico per formare, strato dopo strato, la parte desiderata. In figura 2.1 si può notare la postazione utilizzata. Il primo campo che vide l'adozione di questa nuova tecnologia fu quello legato alla realizzazione di prototipi che potessero essere usati per test visivi o di assemblaggio.

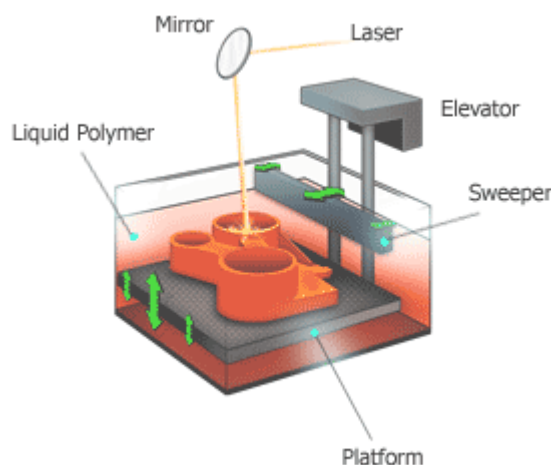


Figura 2.1. Postazione stereolitografia

Con il termine “Additive manufacturing” (AM), ovvero produzione additiva, quindi, ci si riferisce a ciò che veniva chiamato “Rapid prototyping” (RP), un processo atto alla creazione rapida di un modello che rappresentasse la parte o l’insieme e che fungesse da prototipo, prima del rilascio del prodotto finale e successiva commercializzazione. Grazie ai miglioramenti che nel tempo sono stati raggiunti dalle stampanti 3D, quali l’affinamento della qualità dell’output, è stato possibile puntare ad una continuità molto più marcata tra il processo di prototipazione e il prodotto finale, rendendo, in effetti, impropria l’assunzione del concetto di “prototipo” associato a quello che, attualmente, viene riconosciuto come “Additive manufacturing”.

Molti modelli sono infatti ora prodotti direttamente in queste macchine, non potendo quindi attribuirne loro la definizione di "prototipi". Inoltre, con “additive manufacturing”, si riesce ad evidenziare quella che è la tecnologia alla base del processo, che sfrutta un approccio additivo: le parti sono realizzate aggiungendo del materiale su layer precedentemente generati. Ogni layer è una sezione trasversale, di spessore finito preimpostata, del modello derivato dai dati CAD originali. Quest’ultimo sarà un’approssimazione dei dati originali e, più sottile sarà impostato ogni strato, più il risultato corrisponderà al modello originale. In figura 2.2 un esempio di risoluzione con diversi layer thickness.

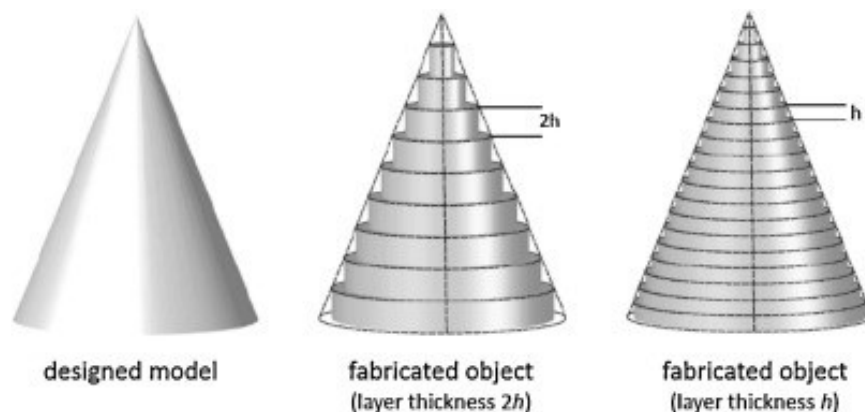


Figura 2.2. Risultati con variazioni del layer thickness

Da ciò ne consegue che l'AM, se combinato con altre lavorazioni, creando effettivamente catene di processo, può essere utilizzato per ridurre significativamente i tempi e i costi di sviluppo del prodotto.

Generalmente, tutti i processi di additive manufacturing sono caratterizzati da 8 fasi, come riportato in [2], descritte di seguito:

1. A tutte le parti deve essere associato un modello CAD che descriva completamente la geometria esterna. L'output deve essere una rappresentazione solida o superficiale 3D caratterizzato da un volume totalmente chiuso;
2. Gran parte delle macchine AM accettano il formato di file STL, adottato come formato standard, che è possibile ottenere ormai da quasi tutti i software CAD in circolazione. Maggiore è la risoluzione del file STL (numero di triangoli maggiore), migliore sarà la sua approssimazione del modello originale. Questo file descrive le superfici chiuse esterne del modello CAD originale e costituisce la base per il calcolo delle sezioni;
3. Il file STL viene trasferito alla macchina AM. Qui, potrebbe subire alcune modifiche generali, in modo tale che si ottengano dimensione, posizione e orientamento adeguati alla costruzione. L'orientamento di stampa può influire sia sulla qualità delle superfici che sulla resistenza della parte finale;
4. Si procede con la configurazione della stampante prima del processo di costruzione settando determinate impostazioni come i vincoli del materiale, la fonte di energia, lo spessore dello strato e così via;
5. La stampa può essere quindi avviata. È principalmente un processo automatizzato e non è strettamente necessaria la supervisione degli addetti. È però importante procedere con il monitoraggio superficiale della macchina, affinché si possa verificare che non si siano verificati errori, come può essere l'esaurimento di materiale;

6. Terminata la stampa, le parti dovranno essere rimosse. Ciò può richiedere l'interazione con la macchina, che può avere interblocchi di sicurezza per garantire, ad esempio, che le temperature di esercizio siano sufficientemente basse o che non vi siano parti in movimento attivo;
7. Una volta rimosse dalla stampante, le parti potrebbero necessitare di una pulizia addizionale prima che siano pronte per l'uso. In questa fase, i modelli potrebbero avere caratteristiche meccaniche non ancora ottimali o potrebbe esserci la presenza di eventuali supporti di stampa che devono essere ancora rimossi. Ciò richiede quindi spesso tempo e una manipolazione manuale attenta ed esperta;
8. I modelli costruiti potrebbero essere adeguati all'utilizzo. Tuttavia, potrebbero anche richiedere un trattamento aggiuntivo prima che siano pronti a tutti gli effetti. I trattamenti potrebbero essere laboriosi e lunghi se i requisiti di finitura sono molto esigenti. Se si tratta di parti di assiemi, potrebbe anche essere richiesto l'assemblaggio degli stessi per formare il prodotto finale.

In figura 2.3 il ciclo di produzione additive.

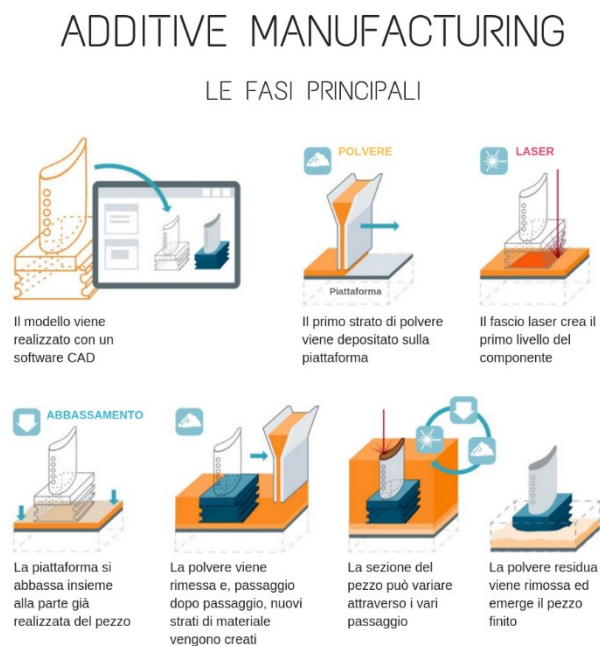


Figura 2.3. Ciclo di produzione additive manufacturing

2.1 Punti di forza e limiti dell'AM

L'adozione di tecnologie di additive manufacturing può portare a notevoli benefici. Come esposto in [3] e [4], consente infatti la creazione di modelli e di parti con caratteristiche geometriche molto complesse, che con lavorazioni tradizionali o con lavorazioni di sottrazione sarebbe stato proibitivo generare. Infatti, con l'aumentare della complessità della geometria del modello, diventa più difficoltoso l'ottenimento delle stesse con le lavorazioni convenzionali, sia a livello di praticità che di aumento di costi di produzione, se non impossibile. Il punto di forza dell'AM è proprio questo: è fortemente adatto alla produzione di modelli complessi, in quanto è possibile raggiungere livelli di precisione elevati per le superfici (interne ed esterne), con miglioramenti anche prestazionali e, inoltre, considerando anche il fattore estetico, risulta vantaggioso ottenere modelli più accattivanti a livello visivo, contando, conseguentemente, anche su un aumento del prezzo di vendita dello stesso. In figura 2.4 un esempio di geometria realizzabile con lavorazioni AM.



Figura 2.4. Geometria generata con additive manufacturing

Di contro, l'AM risulta essere una strada eccessivamente costosa per la creazione di pezzi caratterizzati da geometrie tradizionali o che, comunque, sarebbe possibile ottenere facilmente con l'utilizzo di lavorazioni convenzionali. Deve essere fatta, quindi, un'attenta analisi sulla convenienza, o meno, che la scelta di tecnologie additive potrebbe apportare alla generazione di un determinato componente o assieme.

Di fondamentale importanza è anche la libertà che l'AM, grazie alla capacità di generare delle geometrie molto complesse, riesce ad offrire all'ingegnere progettista nel momento in cui si trova di fronte alla scelta di concepire un determinato componente con una geometria innovativa o, comunque, più complessa delle caratteristiche a cui si poteva aspirare utilizzando lavorazioni convenzionali.

Le tecniche di progettazione sulle quali si basa l'AM vengono riportate nel "Design for additive manufacturing" (DfAM o DFAM), che riporta delle linee guida generali atte a massimizzare la funzionalità della progettazione additive.

Non è escluso che questo nuovo modo di approcciare alla progettazione, comunque, permetta anche di prevedere l'utilizzo di tecniche additive in simbiosi con le lavorazioni convenzionali, per ottenere, nel modo più facile e meno dispendioso, il prodotto finale.

Il DfAM prevede, comunque, come detto precedentemente, un diverso approccio da parte del progettista. Si pensi, ad esempio, come riportato in [5], all'utilizzo degli elementi di giunzione. Nella progettazione tradizionale, generalmente, una fetta importante delle parti da utilizzare per il progetto è costituita dagli elementi di fissaggio e giunzione tra le varie parti. Il DfAM prevede, lì dove vi è la possibilità, lo stampaggio di pezzi unici, formati da più parti, eliminando spesso eventuali elementi di fissaggio che, senza AM, sarebbero stati necessari. Ciò porta benefici anche al consolidamento della parte stessa.

Il design, inoltre, è concentrato ora sull'ottimizzazione della geometria in funzione di ciò a cui sarà finalizzato il modello e non, come con le lavorazioni convenzionali, su cosa sia possibile ottenere con esse.

Inoltre, in questa direzione, come esplicitato in [6], sta acquisendo molta importanza la coesione tra “topology optimization” (TO), cioè ottimizzazione della topologia, e l’AM.

La TO è finalizzata alla creazione di strutture sempre più leggere, ad elevate prestazioni, che garantiscano dei risparmi sull’utilizzo di materiale e, conseguentemente, sui costi di produzione. Si può facilmente comprendere come, l’utilizzo della TO nei processi di AM, possa portare a dei risultati di importanza notevole che, con le lavorazioni convenzionali, sarebbe stato quasi impensabile ottenere.

È però vero che, determinate strategie proposte dalla TO potrebbero non portare necessariamente ad un miglioramento nella fase di sviluppo del processo di AM. Se, infatti, con la TO vi fosse l’introduzione di superfici che, in fase di stampaggio, avessero la necessità di essere supportate, si potrebbe verificare comunque un conseguente aumento dei costi di produzione. Per questo motivo, oggetto di ricerca è il concetto di “sensibilità topologica per le strutture di supporto”, che punta ad un miglioramento della TO in funzione dei supporti presenti, eventualmente, nella fase di produzione additiva.

La produzione additiva non è immune da restrizioni di produzione. Un esempio di tali restrizioni potrebbe riguardare la stampa di elementi cavi completamente chiusi, ermetici. Da un volume completamente chiuso non è infatti possibile andare a rimuovere eventuali scarti di materiale di stampa, come potrebbero essere la stessa polvere utilizzata durante il processo, o resine in eccesso, rimasti all’interno della cava, essendo il volume, come precedentemente detto, completamente sigillato. Per lo stesso motivo, nel caso in cui fosse stato necessario l’inserimento di supporti all’interno della cavità, non sarebbe possibile la rimozione degli stessi.

Per poter ovviare a questo problema, quindi, potrebbe risultare necessario, ad esempio, la creazione di un foro nella geometria del modello che possa rendere possibile la rimozione di eventuali scarti o supporti.

Questo esempio, però, dimostra come alcuni di questi limiti creatisi per le tecnologie additive risultino essere comunque meno vincolanti delle restrizioni che possono essere imposte dalle lavorazioni convenzionali.

Un ulteriore vantaggio dell'AM, come detto in precedenza, è la possibilità di stampare elementi che nella realtà farebbero parte di un assieme e potrebbero risultare collegati fra loro. In figura 2.5 il telaio di una bicicletta stampato con tecniche AM. Con lavorazioni convenzionali vi sarebbe stata la necessità di saldare i vari componenti del telaio.



Figura 2.5. Telaio bicicletta generato con tecniche AM

Infatti, se con le lavorazioni tradizionali vi sarebbe la necessità di creare ogni singolo componente separatamente, per poi assemblarlo, tramite la stampa 3D è possibile trattare l'assieme come un unico modello da realizzare. Dove vi fosse la necessità di movimenti relativi tra i componenti, durante la stampa gli interstizi verrebbero comunque riempiti con del materiale, che però successivamente verrebbe rimosso, con i dovuti trattamenti, rispettando i calcoli e le tolleranze precedentemente considerati durante la fase di progettazione.

L'AM viene caratterizzato anche da quella che viene comunemente detta "produzione su richiesta". Tale nome viene giustificato dalla eliminazione del bisogno di possedere scorte di pezzi di ricambio, che risultano necessari per far fronte ad un eventuale richiesta futura. Ciò è conseguenza della riduzione dei tempi di produzione dei pezzi, ottenuta con l'adozione di tecnologie additive, che rende possibile generare in maniera veloce la parte anche in un secondo momento, quando la richiesta sarà effettivamente pervenuta all'azienda. Conseguenza di ciò è, naturalmente, anche una riduzione dei costi di mantenimento dei magazzini delle scorte.

La "produzione su richiesta" rende possibile anche la "personalizzazione" dei componenti, non dovendo far fronte a produzioni di massa e scorte di componenti uniformati. Ciò permette quindi, a richiesta di specifiche caratteristiche, di poter rispondere facilmente, grazie ai motivi di cui sopra, con una particolare caratterizzazione del componente. I dati specifici e personalizzati vengono settati precedentemente la fase di stampa grazie ai software CAD presenti in commercio.

Gran parte dei processi additive sono impiegati nella generazione della geometria del modello da stampare. Contestualmente, però, vedono svilupparsi quelle che sono le caratteristiche proprie della parte, come caratteristiche meccaniche, fisiche e così via, legate direttamente alla geometria e ai parametri caratterizzanti il processo utilizzato. Conseguentemente è fondamentale l'elevata attenzione che i progettisti devono adottare in fase di progettazione, sia nel valutare quale geometria sia la più adeguata al caso in questione, ma anche come la geometria scelta vada ad influenzare le caratteristiche fisiche e meccaniche del modello finale.

Inoltre, come precedentemente detto, le caratteristiche finali del prodotto sono strettamente legate al processo scelto. Difatti, vi è un'elevata specificità, nelle linee guida, nel caratterizzare processi portati avanti con determinate macchine, piuttosto che la presenza di linee guida generali che siano in grado di standardizzare i risultati in funzione di determinati parametri, non delle macchine utilizzate. Questa mancanza di standardizzazione è uno dei limiti sul quale si sta concentrando la ricerca.

Può essere ritenuto un limite, nelle fasi decisionali, la mancanza di una selezione molto varia di materiali da poter utilizzare con determinati processi.

Infatti, se dal punto di vista della modellazione non ci sono tendenzialmente limiti alle geometrie da poter generare, la scelta dei materiali (e le loro caratteristiche) di cui poi dovranno essere costituiti i modelli, che è fondamentale, potrebbe risultare potenzialmente più complicata del previsto. Inoltre, le caratteristiche dei materiali tabulate risultano fungere, più che altro, da riferimento che possa instradare la scelta, rendendo però necessari, in ogni caso, controlli ausiliari durante il processo.

Vi sono, infatti, diversi fattori che possono influenzare le caratteristiche geometriche e meccaniche del modello finale. Un esempio, considerando una lavorazione a letto di polvere, potrebbe essere il gradiente termico sviluppato durante la fase di stampa. Esso influenza la geometria e le caratteristiche sviluppate dal materiale durante la creazione del modello.

Un gradiente termico elevato, infatti, potrebbe generare delle tensioni residue importanti che, a loro volta, potrebbero condurre alla formazione di distorsioni termiche non previste dalla geometria del modello.

Come detto in precedenza, vi sono conseguenze anche sulle caratteristiche del materiale. Il letto di polvere, infatti, ha una conduttività termica inferiore rispetto al materiale solido generato dal processo. Ciò porta alla tendenza della conduzione del calore primario di procedere verso il basso, sottoponendo gli strati, precedentemente costruiti, a subire processi di riscaldamento e raffreddamento che, fungendo da trattamenti termici, potrebbero variare la microstruttura del materiale.

2.2 Classificazioni dei processi additive

Con “additive manufacturing”, come descritto in [5], ci si riferisce in generale a quella categoria di processi che hanno come concetto di fondo la lavorazione additiva. Nonostante tali processi abbiano molti aspetti comuni, si è ritenuto necessario classificare l’additive manufacturing in sotto-lavorazioni, per evitare confusione tra i vari processi.

Le categorie di processi riconosciute attualmente sono:

1. Material extrusion (ME), un processo che prevede l'erogazione selettiva del materiale grazie l'utilizzo di un ugello o un orifizio. Il materiale, che si trova in uno stato semi-liquido, viene forzato attraverso l'ugello, mentre la testa di estrusione (una o più teste) o la piattaforma di costruzione si muove nel piano di stampa. Ad ogni livello completato, o la piattaforma si sposta verso il basso o la testa di estrusione si sposta verso l'alto, di modo che sia possibile l'estrusione del livello seguente, che si lega al precedente. Il materiale utilizzato è solitamente un filamento di termoplastico arrotolato su una bobina. Lo stesso viene poi fuso contestualmente all'estrusione. In figura 2.6 la postazione per il processo ME;

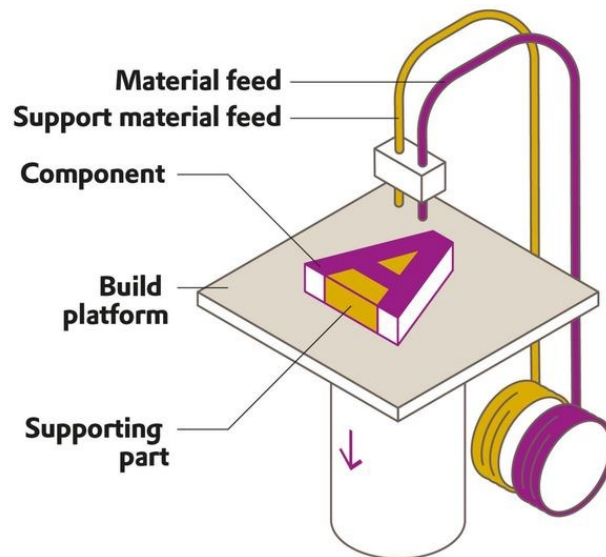


Figura 2.6. Postazione per material extrusion

2. Material jetting (MJ), che prevede l'utilizzo di testine di stampa addette all'erogazione di goccioline di materiale da costruzione. Queste ultime vengono erogate selettivamente durante il movimento delle testine sul piano di costruzione. Solitamente questo processo prevede l'utilizzo di fotopolimeri o materiale simile alla cera. Possono essere presenti testine di stampa munite di più ugelli, al fine di aumentare la velocità di stampa oppure per l'erogazione di materiali di origine diversa. Quest'ultima funzione risulta utile, per esempio, per creare supporti di materiale differente da quello usato per la creazione del modello da stampare. In figura 2.7 la postazione per il processo MJ;

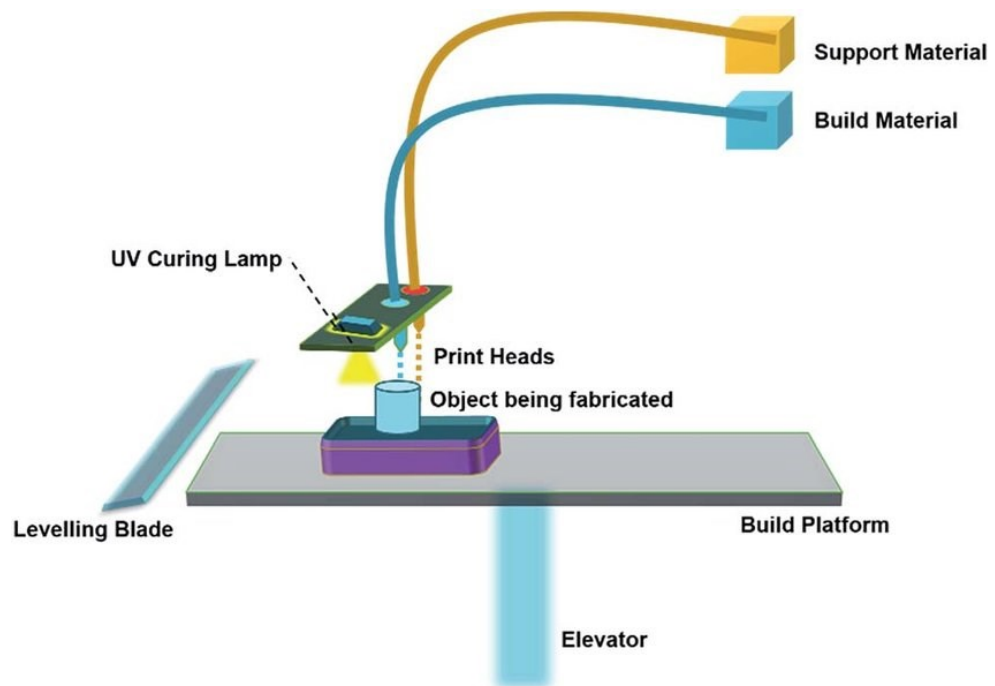


Figura 2.7. Postazione per material jetting

3. Binder jetting (BJ), processo con funzionamento molto simile al MJ, con la differenza che il materiale erogato dalle testine di stampa non è il materiale da costruzione, quanto un legante per permettere il collegamento fra le particelle dello strato di polvere ed ottenere la parte desiderata;
4. Sheet lamination (SL), che consiste nell'unione di lamine di materiale, metallico e non, che vengono incollate per poter generare la geometria desiderata. In figura 2.8 la postazione per il processo SL;

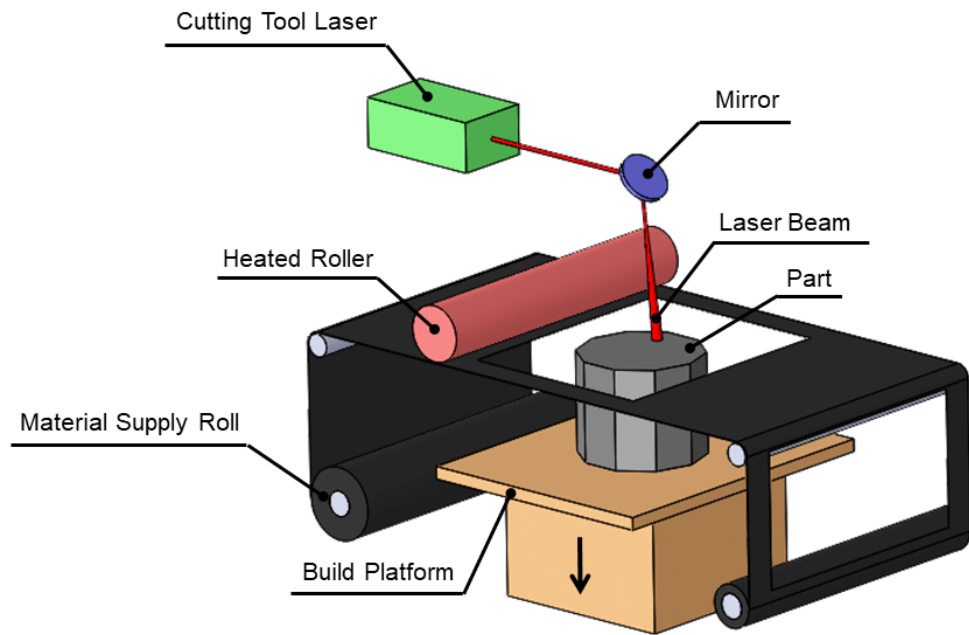


Figura 2.8. Postazione per sheet lamination

5. Vat photopolymerization (VP), chiamato anche “stereolitografia”, consiste nella polimerizzazione selettiva di materiale monomerico per formare la parte desiderata, costituita ora da materiale polimerico;
6. Directed energy deposition (DEP), che sfrutta l’energia termica, sviluppata da un fascio di elettroni o di un laser. Questo fascio, venendo concentrato sul materiale che, contemporaneamente, viene depositato sul piatto di stampa, va a fondere la polvere metallica o, in generale, il materiale utilizzato, generando così la parte desiderata. In figura 2.9 la postazione per il processo DEP;

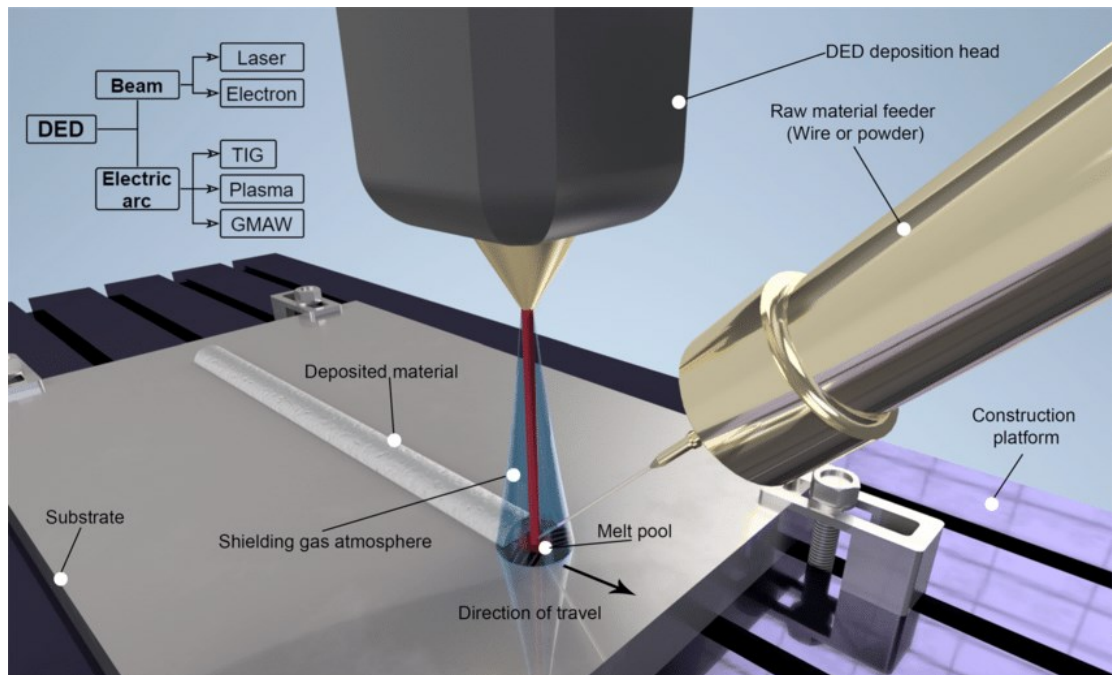


Figura 2.9. Postazione per directed energy deposition

7. Powder bed fusion (PBF), processo che sfrutta l'energia termica di uno o più fasci laser per fondere le particelle del letto di polvere posto sul piatto di stampa, generando così il modello. In figura 2.10 la postazione per il processo PBF. Nel paragrafo seguente si tratta una descrizione più dettagliata di tale processo.

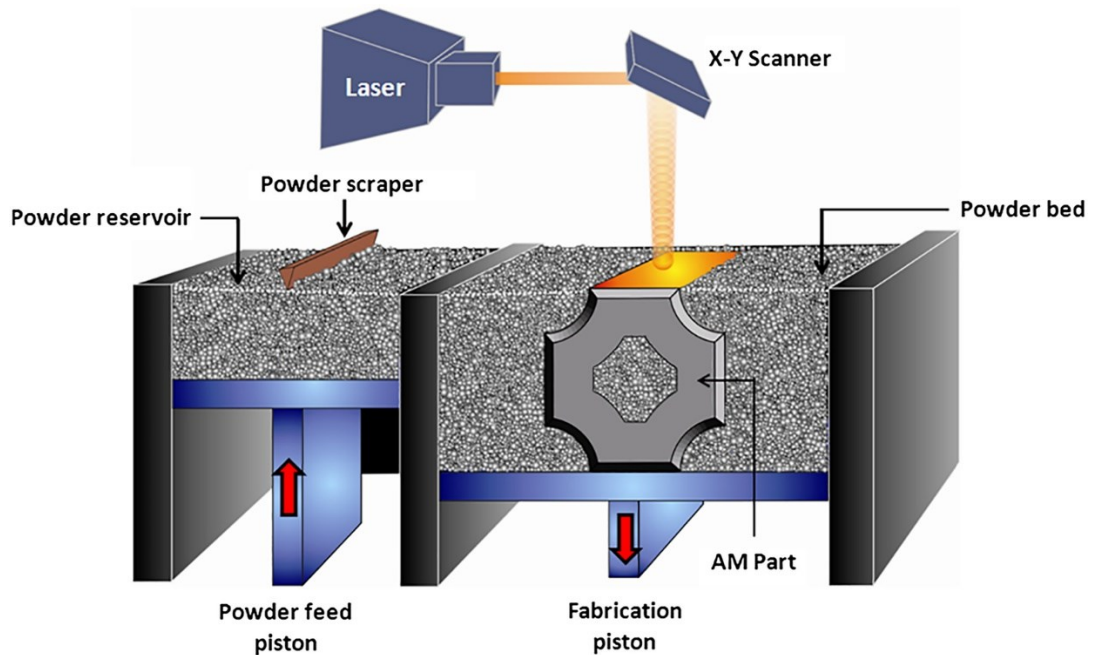


Figura 2.10. Postazione per powder bed fusion

2.2.1 Powder bed fusion

La fusione a letto di polvere, come esposto nel precedente paragrafo, è un processo in cui si sfrutta l'energia termica per fondere selettivamente determinate zone del letto di polvere posto sul piatto di stampa. Il materiale fuso, durante la fase di raffreddamento, solidifica.

Durante il processo di PBF, spesso, si rende necessaria l'introduzione di supporti, i quali, come descritto in [7], sono fondamentali in presenza di sbalzi. È necessario, infatti, andare a supportare la superficie che presenta un'inclinazione superiore ai 45° , in quanto risulterebbe una zona critica durante la fase di sinterizzazione, fase durante la quale il materiale non possiede ancora proprietà meccaniche ottimali. La violazione del limite dell'angolo di sbalzo non è comunque l'unico motivo che giustifichi l'utilizzo di supporti. In figura 2.11 un esempio di struttura supportata.

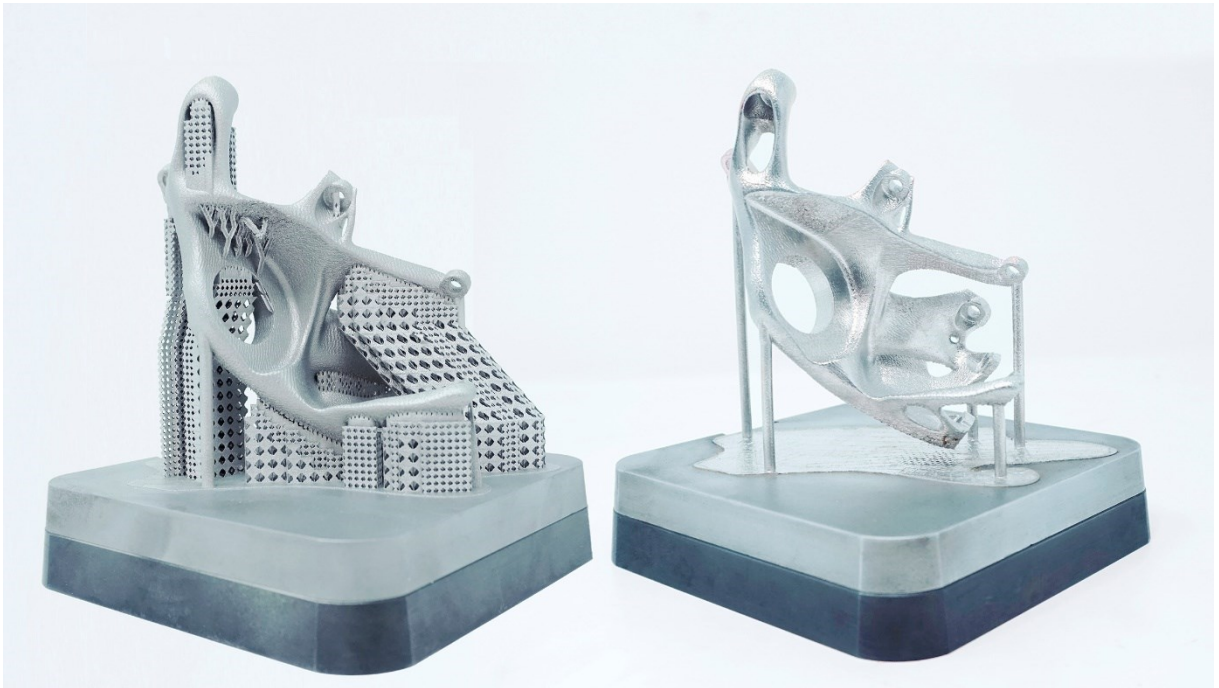


Figura 2.11. Struttura supportata e dopo rimozione dei supporti

Naturalmente sarà necessario considerare un aumento dei costi, a causa dell'utilizzo di materiale ausiliario, dell'aumento dei tempi di produzione e delle lavorazioni che saranno necessarie, post-stampa, per la rimozione dei supporti.

Per materiali polimerici, come esposto in [5], la polvere che non è stata fusa tende a stabilizzare e sostenere quella fusa, rendendo quindi spesso obsoleti supporti aggiuntivi. Essa, inoltre, può essere riutilizzata per lavorazioni successive, facendo però attenzione al numero di volte che essa viene utilizzata in quanto, a causa delle elevate temperature che vengono raggiunte all'interno della camera di stampa, tende a degradarsi col tempo.

Per il metallo, le strutture di supporto sono fondamentali in quanto, a causa degli elevati gradienti termici raggiunti durante la stampa, potrebbero crearsi tensioni residue e, quindi, deformazioni elevate che danneggerebbero la geometria. I supporti andrebbero invece ad ancorare la zona, evitando deformazioni troppo accentuate.

La fonte di energia utilizzata è generalmente un laser o un fascio di elettroni.

Con l'utilizzo del laser solitamente si riesce ad ottenere una migliore finitura superficiale e dettagli più fini rispetto ai sistemi a fascio di elettroni. Questi ultimi, sono sì più costosi, ma a loro favore vi è una maggiore velocità di produzione e una generazione di tensioni residue più contenuta, con la diminuzione conseguente di deformazioni e di utilizzo di supporti.

Generalmente i costi di un processo di PBF e delle macchine necessarie sono più elevati rispetto le altre lavorazioni additive. I costi sono principalmente legati ai materiali utilizzati e ai requisiti di sicurezza dell'impianto.

I prodotti realizzati però, spesso, risultano essere in grado di essere utilizzati, a meno di rifiniture superficiali, anche subito dopo la loro creazione.

2.3 Simulazione dei processi AM

Nei processi additive, concentrandosi sul risultato finale della stampa, per riuscire ad ottenere un'ottimizzazione di più variabili contestualmente, come possono essere, ad esempio, come da [8], la presenza di tensioni residue, porosità, qualità delle superfici, sarebbe necessario iterare più volte il processo di stampa, variando determinati parametri di stampa, per individuare quella che è la combinazione più adatta al caso di studio.

I parametri di stampa (e non) a cui ci si riferisce sono, ad esempio:

- Strategia di scansione;
- Temperatura di preriscaldamento;
- Layer thickness;
- Dimensione e potenza del laser;
- Caratteristiche della polvere.

Sicuramente, la soluzione sperimentale precedente, ovvero iterare il processo, sarebbe la più accurata in assoluto, ottenendo risultati direttamente dalla stampa del materiale, ma si capisce bene che, nella realtà, sarebbe proibitivo stampare volta per volta un modello per confrontarlo con quello precedente e successivo per individuare tali combinazioni, in quanto servirebbe una quantità importante di materiale, con conseguente aumento del costo, ed anche un aumento del tempo di produzione.

Premesso ciò, risulta giustificato l'interesse sempre più crescente del mondo ingegneristico verso software CAD in grado di generare delle simulazioni del processo di stampa.

In questo modo, infatti, si potrebbe simulare, per ogni combinazione di parametri che si è interessati a valutare, il processo di stampa, ottenendo la previsione dei risultati termici e meccanici, che serviranno poi a valutare quale possa essere la combinazione più vantaggiosa.

Una volta individuata, poi, si procede ad eseguire un'unica stampa, settata con la combinazione scelta, ottenendo di conseguenza il modello nella sua forma ottimizzata. Non vi sarebbe utilizzo di materiale ausiliario che poi verrebbe sacrificato per la simulazione di combinazioni di parametri inadeguate, come si otterrebbe anche un guadagno di tempo, avendo la simulazione, sicuramente, una durata inferiore rispetto ad un processo iterativo come quello di cui sopra.

Alla base delle simulazioni di processi additive vi possono essere diversi modelli di calcolo, tutti con i propri punti di forza e limiti.

I modelli in microscala, ad esempio, si sono rivelati utili, grazie all'analisi di più fenomeni termo-fluidodinamici, per il calcolo della formazione di eventuali difetti e instabilità (porosità per esempio). Hanno però la necessità di un'elevata potenza di calcolo.

I modelli FEM eseguono un'analisi termica e meccanica in maniera accoppiata, riuscendo a derivare quelle che sono le deformazioni indotte dal processo termico, considerando, inoltre, gli effetti delle deformazioni plastiche sul campo termico stesso. È comunque un modello di calcolo che richiede anch'esso una grande potenza computazionale ed è, inoltre, da implementare ulteriormente, vista la complessità del problema termico, dovuto alla forte influenza del comportamento fluidodinamico del metallo liquido.

Per riuscire a procedere con simulazioni di geometrie più grandi, una soluzione, utilizzata anche all'interno del software NX, è il metodo "Inherent strain" (IS), cioè metodo della deformazione intrinseca. Questo metodo, adattato e modificato per simulazioni di processi PBF, procede col simulare l'accumulo di stress termico, grazie all'utilizzo di un tensore di deformazione residua, che viene poi applicato alle regioni del modello meccanico strato per strato. In figura 2.12 un esempio semplificato del metodo IS.

Two-layer deposition modeling:

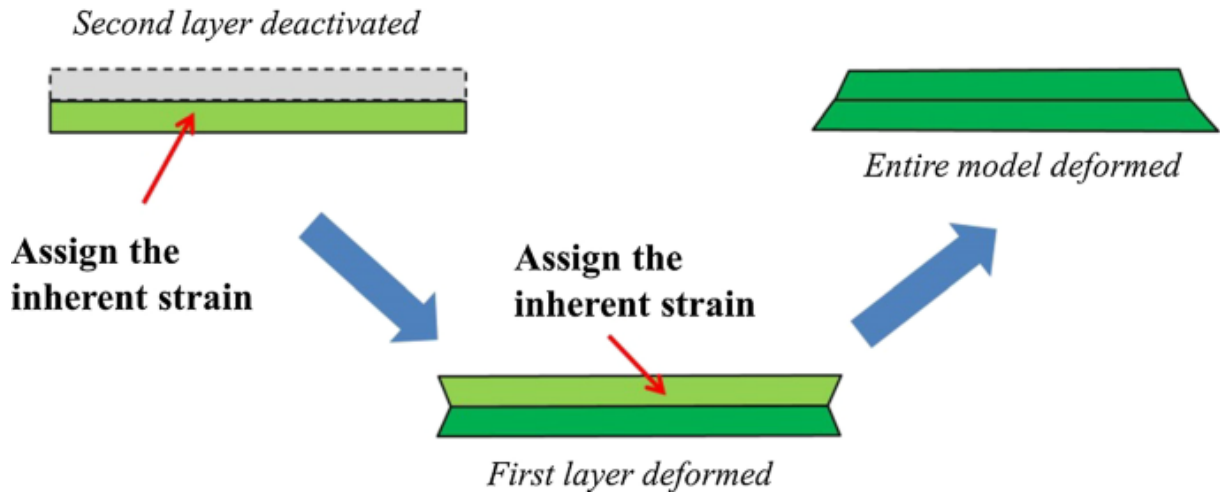


Figura 2.12. Semplificazione metodo IS

Nonostante sia una tecnica meno complessa dei metodi esposti precedentemente, ha portato comunque ad una correlazione tra i risultati previsti dalle simulazioni e le deformazioni reali.

2.4 Strutture lattice

Tramite le tecniche AM è possibile ottenere strutture molto complesse, come, ad esempio, le strutture reticolari, dette "lattice structures".

Queste strutture, come esposto in [9], sono caratterizzate dalla presenza di celle unitarie, ripetute continuamente nello spazio, a formare un reticolo complesso con particolari caratteristiche strettamente legate alla geometria della cella unitaria. Infatti, variando quest'ultima, nonostante l'utilizzo dello stesso materiale, si è notato come la struttura completa fosse caratterizzata da proprietà meccaniche, termiche e dielettriche differenti. In figura 2.13 un esempio di struttura lattice.



Figura 2.13. Struttura lattice

Le celle unitarie che compongono una struttura lattice possono essere studiate con la meccanica classica, prendendo in considerazione la loro geometria, a differenza invece della struttura reticolare stessa, che viene considerata come una vera e propria tipologia di materiale, per poterne comparare le caratteristiche con quelle di altri metalli (e materiali in generale). Il confronto può avvenire anche con lo stesso materiale, detto materiale genitore, nella sua composizione standard, di cui sono composte le celle unitarie.

Le celle unitarie si differenziano anche in funzione della loro risposta meccanica alla sollecitazione. Esistono infatti strutture dominate dallo stretching assiale, più rigide, che resistono a carichi assiali. Altre strutture invece sperimentano, all'interno della stessa, momenti di flessione. In figura 2.14 delle celle unitarie caratterizzate per risposta meccanica.




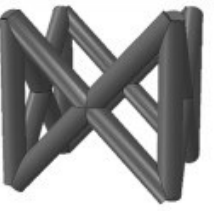
<i>Bending-Dominated Unit Cell Topologies</i>		<i>Stretch-Dominated Unit Cells Topologies</i>	
<i>BCC</i>	<i>FCC</i>	<i>BCCZ</i>	<i>FCCZ</i>
			

Figura 2.14. Celle dominate dalla trazione (sinistra) e celle dominate dall'allungamento (destra)

Anche alle strutture reticolari vengono associati concetti come modulo di Young, tensione di snervamento ed altre proprietà meccaniche. Esse sono definite come proprietà meccaniche macroscopiche apparenti, che sono caratterizzate da determinati valori per un numero abbastanza elevato di celle unitarie. Solitamente esse sono funzione della densità relativa della struttura reticolare, che è definita come il rapporto tra densità apparente della struttura cellulare e la densità del materiale genitore. Tendenzialmente, le proprietà meccaniche sono direttamente proporzionali alla densità relativa.

La tecnica che riesce ad ottimizzare le caratteristiche delle strutture lattice è la PBF, grazie alla sua precisione nella generazione di queste geometrie. Come per qualsiasi modello creato con PBF, anche per le strutture lattice assume un'importanza fondamentale il settaggio dei parametri di stampa in modo da ottimizzarne le proprietà meccaniche.

3 Caso studio

Lo studio seguente si prefigge come obiettivo principale la valutazione della sensibilità del software Siemens NX ad eventuali variazioni quali, ad esempio, potrebbero essere la variazione delle dimensioni della cella unitaria di cui è costituito un supporto di tipo blocco.

Nello specifico, le simulazioni sono state svolte su un condotto singolo rettificato che ben approssimasse le dimensioni e la geometria di un singolo condotto, facente parte di una geometria più complessa, come quella di un componente centrifugo completo di una turbomacchina. Aver lavorato su una geometria che potesse avvicinarsi il più possibile a quella reale del condotto singolo rende i risultati dello studio attendibili e “traslabili” anche su quest’ultimo.

È stato possibile valutare le deformazioni reali del componente centrifugo, successive alla stampa, grazie alla disponibilità di una stampante 3D (nel caso specifico si è usufruito di una Renishaw AM250), con la quale è stato ricostruito il modello. In figura 3.1 possiamo trovare un’immagine della Renishaw AM250, utilizzata per portare avanti lo studio.



Figura 3.1. Renishaw AM250

È stato notato come le deformazioni di entità maggiore si ottenessero sul bordo esterno della superficie superiore del componente centrifugo e sul bordo esterno della superficie interna del condotto. La zona soggetta a deformazioni più marcate è quella del bordo esterno a causa della presenza di evidenti spigoli vivi, che causano un aumento della concentrazione di tensioni. In figura 3.2 sono indicate le posizioni in cui si verificano le deformazioni di maggiore entità.

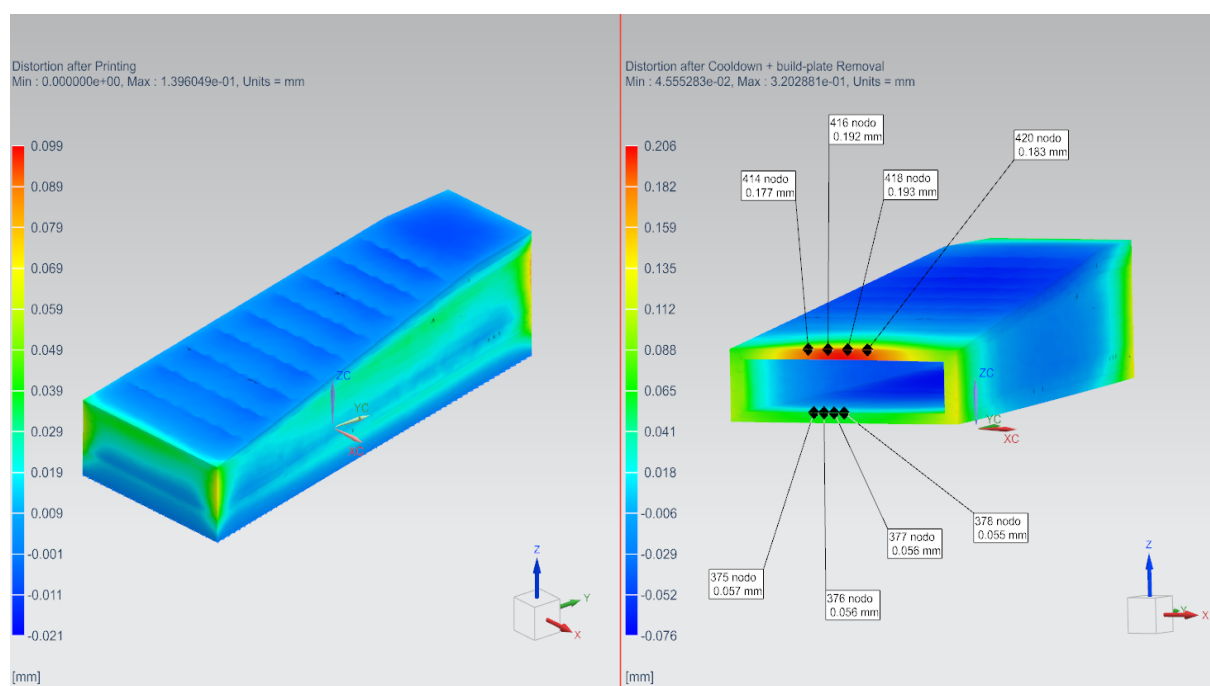


Figura 3.2. Deformazioni in direzione Z dopo la stampa (sinistra) e dopo rimozione dei supporti e piatto di stampa (destra)

La presenza di queste deformazioni porta ad un inarcamento lungo la direzione Z (direzione di stampa) del componente centrifugo, più marcato nelle zone in cui l'entità delle deformazioni risulta essere maggiore. Come conseguenza, la zona che subisce un inarcamento verso l'alto più significativo è proprio la zona del bordo esterno del componente. Le tensioni sul bordo esterno risultano essere talmente elevate da portare alla rottura ed al distaccamento dei supporti (precedentemente inseriti nel vano) dalla

superficie superiore all'interno del condotto, risultando, quindi, impossibilitati a limitare la tendenza all'inarcamento della zona interessata.

Inoltre, le deformazioni lungo Z, portano anche ad inevitabili collisioni con il recoater.

In figura 3.3 si può osservare la camera di stampa della Renishaw AM250.

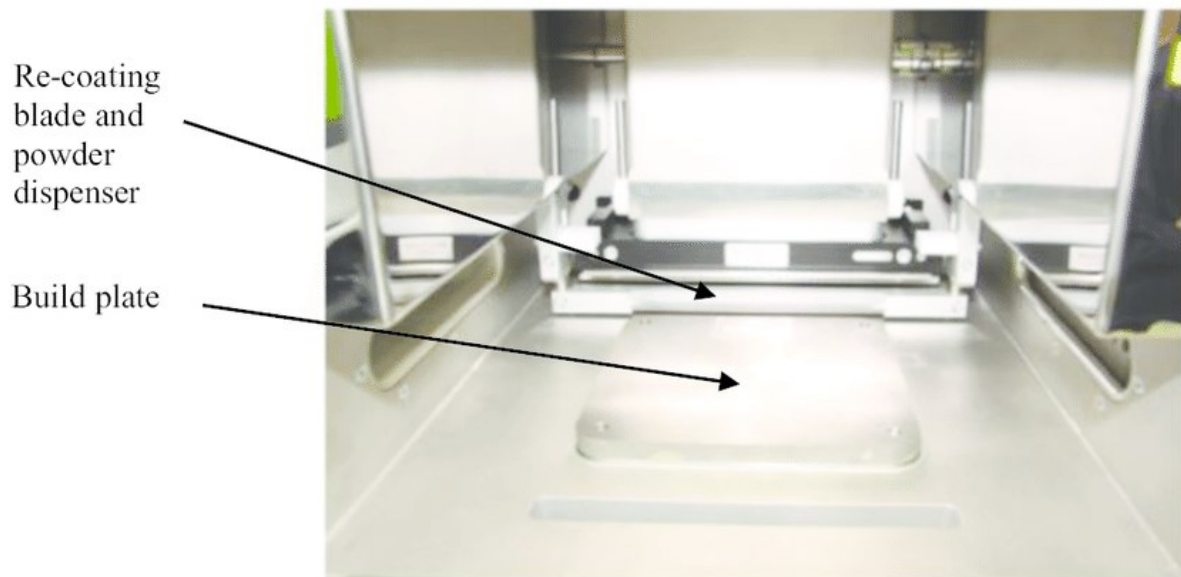


Figura 3.3. Camera interna Renishaw AM 250

Si è inoltre notato come, la variazione all'interno del condotto del tipo di supporti utilizzati (grazie alla variazione della cella elementare degli stessi), causasse una variazione significativa dell'entità delle deformazioni presenti in fase di stampa.

Dalla conoscenza maturata grazie all'osservazione di questi fenomeni, è risultato evidente comprendere come il software Siemens NX avesse bisogno di ulteriori operazioni ausiliarie, indispensabili per il raggiungimento di un livello di sensibilità e precisione tali da garantire, dopo aver effettuato le simulazioni del caso, risultati attendibili e riscontrabili poi nella realtà, tramite la stampa del modello. Il software, infatti, privo di settaggio delle operazioni di omogeneizzazione dei supporti e di calibrazione dei provini, è risultato inidoneo ai fini di una valutazione realistica delle deformazioni del componente centrifugo, presentando, come risultati, delle

deformazioni sottostimate ed evidenziando una marcata insensibilità alla variazione dei supporti.

3.1 Omogeneizzazione dei supporti di simulazione

L'operazione di omogeneizzazione è necessaria, come esposto in [10], quando è previsto l'utilizzo di strutture di supporto ripetitive, con volume non completamente denso, formate da celle unitarie periodiche (periodic unit cell – PUC), che dovranno essere costituite da geometrie tridimensionali periodiche. Le caratteristiche di queste celle, essendo funzione della geometria, hanno quindi la necessità di essere, appunto, derivate e calcolate tramite l'operazione di omogeneizzazione, che risulta essere non necessaria per i supporti di tipo volume, essendo formati da build material estruso per il volume necessario per la creazione di tale supporto. Inoltre, l'eventuale omogeneizzazione di un materiale di tipo volume non è assolutamente prevista all'interno del software NX, essendo, come detto precedentemente, ridondante.

Questi supporti, formati da celle unitarie periodiche, sono comunemente chiamati “block supports” (supporti a blocco). Essi risultano essere certamente meno compatti di un supporto di tipo volume, portando quindi a deformazioni maggiori durante la fase di stampa, ma, al contempo, anche più facilmente estraibili dal modello stesso in fase di raffreddamento. Nel caso di studio, sono stati utilizzati block supports con celle unitarie FCCZ di diverse dimensioni e con spessore costante (diametro 0,5 mm). In figura 3.4 alcuni esempi di cella FCCZ.

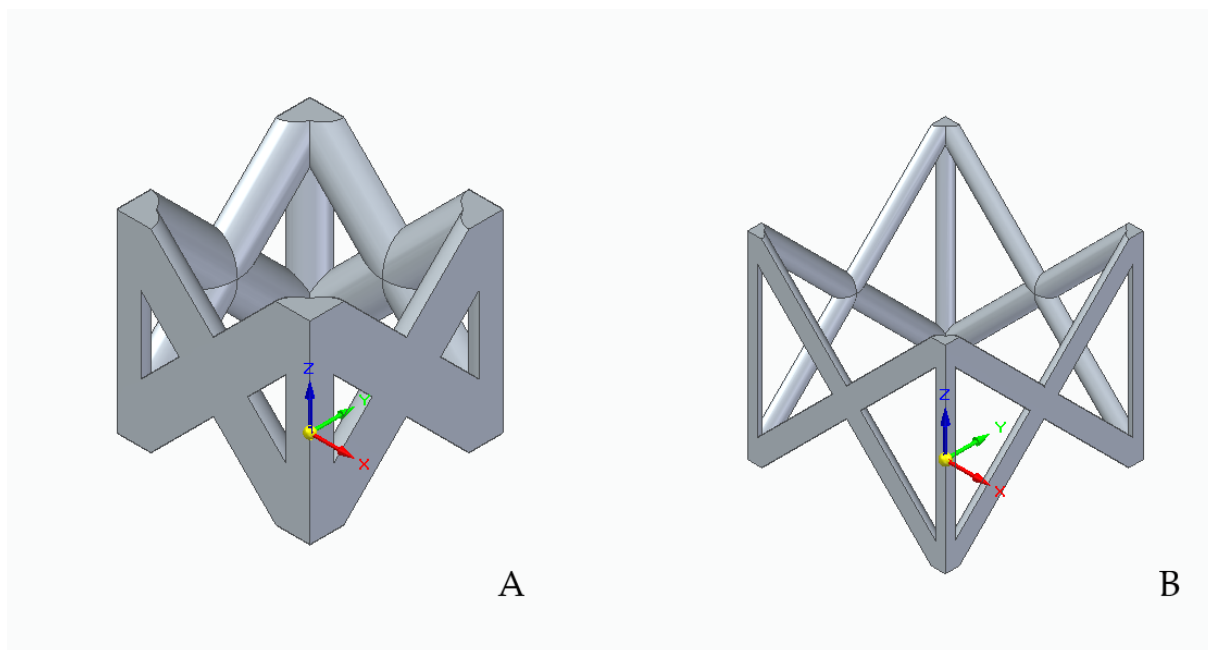


Figura 3.4. Cella FCCZ: 2x0.5 mm (A), 5x0.5 mm (B)

L'omogeneizzazione prevede il calcolo separato, in un primo momento, delle caratteristiche strutturali e delle caratteristiche termiche della cella per poi, successivamente, andarle, appunto, ad omogeneizzare affinché sia possibile ottenere le caratteristiche meccaniche generali della cella (modulo di Young, coefficiente di Poisson ecc. lungo le direzioni principali).

3.1.1 Procedimento in NX di omogeneizzazione dei supporti

Il processo, come riportato in [11], trascrive le caratteristiche omogeneizzate in un database di materiali, in formato XML, al quale si rifà Simcenter 3D, sfruttando i dati dei materiali salvati durante le simulazioni.

I database di cui sopra consistono in due file, di cui un file XML denominato "parameters" ed uno denominato "parameters_support".

È necessario copiare e incollare i file XML, presenti nel percorso file di NX, in una nuova cartella, creata in precedenza, che possa avere un percorso file più facilmente accessibile. A questo punto, nelle proprietà del file, deselezionare la voce "Solo lettura", per far sì che il software possa effettivamente trascrivere le nuove caratteristiche al suo interno.

Di seguito sono riportati quindi gli step da seguire per portare a termine l'omogeneizzazione di celle unitarie:

1. Aprire Siemens NX;
 2. In alto, sulla sinistra del display, selezionare la casella "Apri". Tra le opzioni, impostare "caricamento completo" e scegliere quindi la geometria della cella che si vuole sottoporre ad omogeneizzazione. Aprire la stessa;
 3. Nel gruppo "omogeneizzazione supporti" selezionare la casella "Crea FEM".
- In figura 3.5 la barra a nastro, dove sono presenti le varie sezioni di NX.

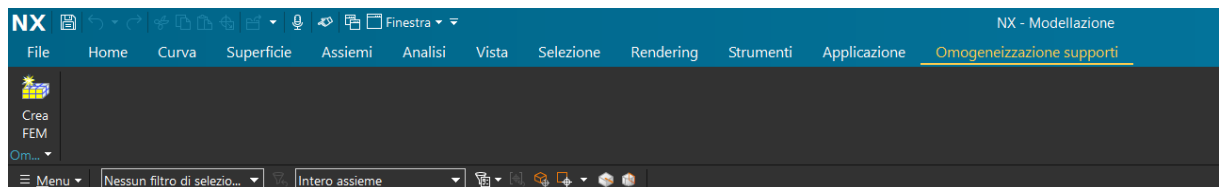


Figura 3.5. Barra a nastro

Si aprirà una finestra che permetterà quindi di scegliere che tipo di simulazione si intende avviare, in che cartella salvare successivamente la simulazione e se usufruire o meno della creazione automatica delle mesh della cella. In figura 3.6 è riportata tale schermata.

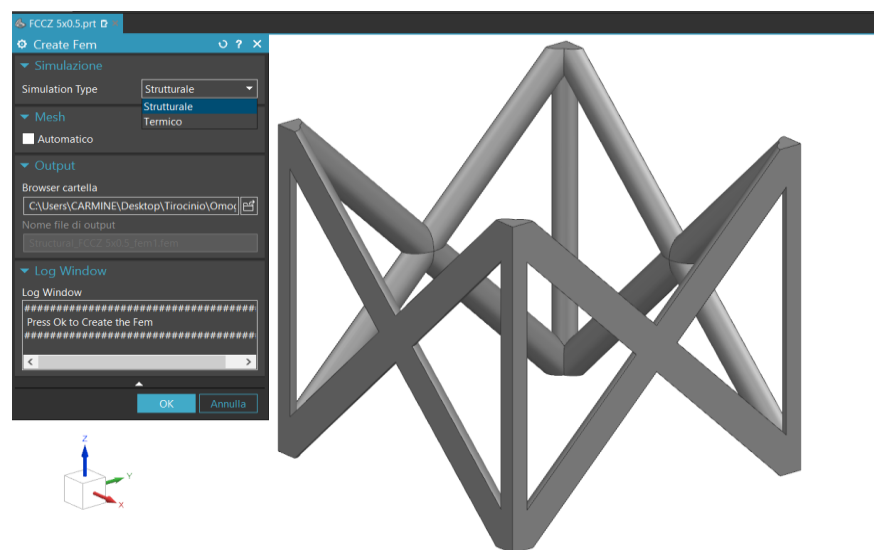


Figura 3.6. Finestra corrispondente al comando "Crea FEM"

La simulazione strutturale non ha la necessità di considerare il corpo poligonale corrispondente al volume occupato dalla polvere, per cui si dovrà costruire la mesh solo della geometria della cella.

La simulazione termica, invece, necessita della creazione della geometria della polvere, che dovrà, quindi, anche essere meshata successivamente. La creazione della polvere viene effettuata in maniera autonoma dal software. La mesh, invece, sarà creata dall'utente. In figura 3.7 un esempio di cella FCCZ immersa nel volume di polvere corrispondente;

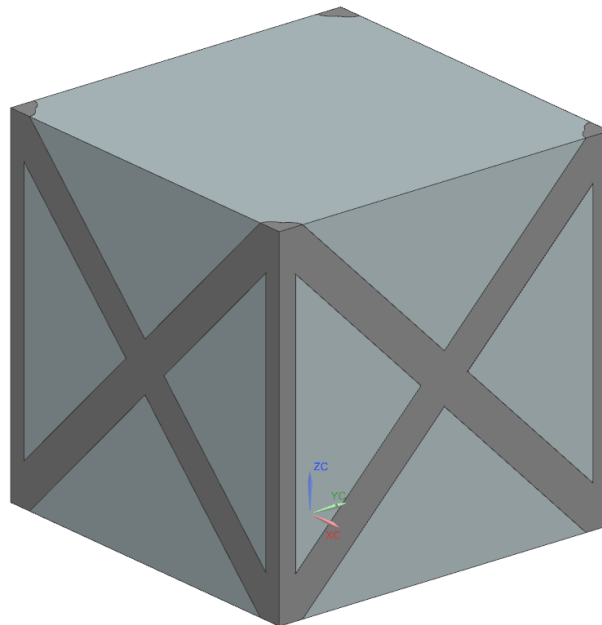


Figura 3.7. Modello termico con presenza di polvere

4. Scelta la tipologia di simulazione da avviare, il software creerà automaticamente un modello strutturale o termico (vedere figura 3.7) ed aprirà il modulo "Pre/Post";
5. Per creare le mesh del modello, nel caso in esame, si è scelta l'opzione "Tetraedro 3D", che usa esclusivamente elementi tetraedrici durante l'operazione, impostando le "dimensioni elemento" su 0,1 mm.

Come precedentemente detto, nel caso del modello termico, si dovranno creare le mesh della geometria della cella e del volume della polvere. Nel caso di studio, si è usato un elemento di 0,1 mm, come per la geometria della cella, per meshare la polvere. In figura 3.8 la finestra del comando “Tetraedro 3D”.

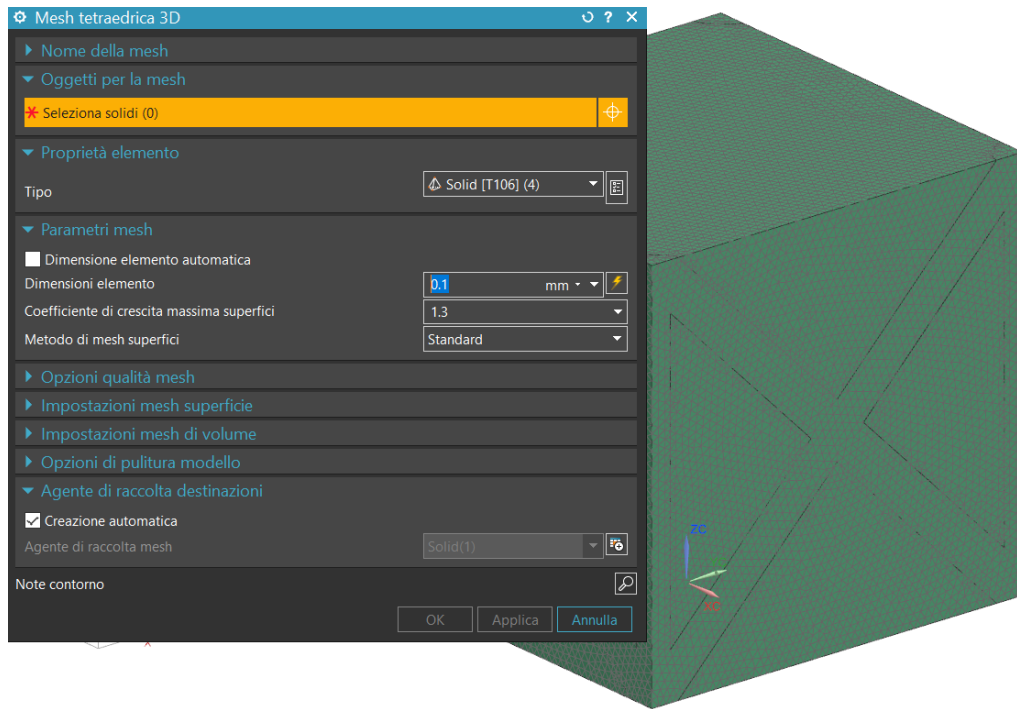


Figura 3.8. Finestra corrispondente al comando “Tetraedro 3D”

Risulta comodo, una volta create, diversificare il colore della mesh della cella da quello della mesh della polvere. Per fare ciò, bisogna selezionare nel menù a tendina del “Navigatore di simulazione” (a sinistra del display) la voce “Agenti di raccolta 3D”. Individuato il solido corrispondente alla polvere, rinominarlo (cliccare f2), cliccare con il tasto destro del mouse e selezionare “Modifica visualizzazione”. A questo punto, cliccare sulla casella di fianco a “Colore” e scegliere il colore per la mesh della polvere. In figura 3.9 un esempio della schermata e del risultato ottenuto;

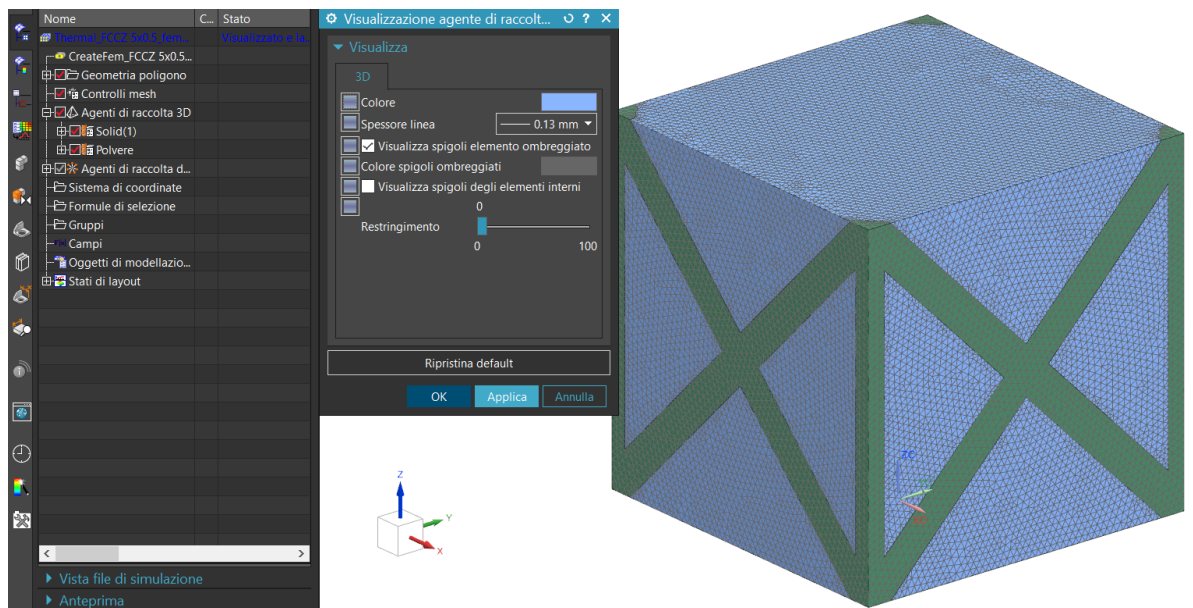


Figura 3.9. Finestra corrispondente al comando “Modifica visualizzazione”

6. Nel gruppo “Omogeneizzazione supporti” si seleziona la casella “Assegna proprietà” dove è possibile scegliere il file XML (che contiene le caratteristiche dei materiali da utilizzare per l’omogeneizzazione) e il materiale di cui saranno costituite la cella e la polvere. In figura 3.10 la schermata corrispondente;

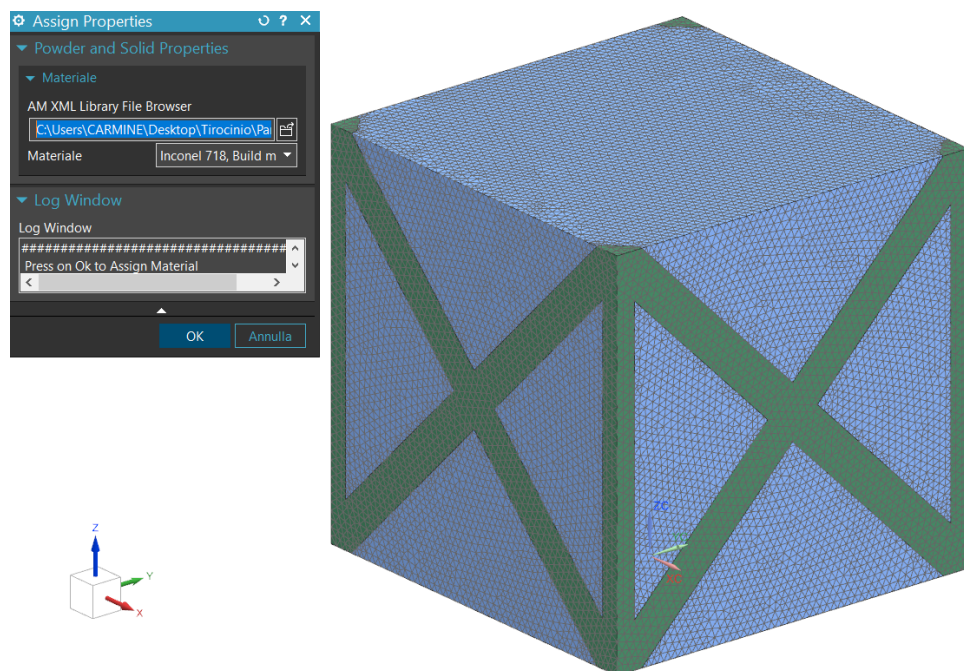


Figura 3.10. Finestra corrispondente al comando “Assegna proprietà”

7. Selezionare “Definisci soluzione”. Aperta la finestra, spuntare “Solve simulation” e, infine, avviare la simulazione. In figura 3.11 la finestra di cui sopra.

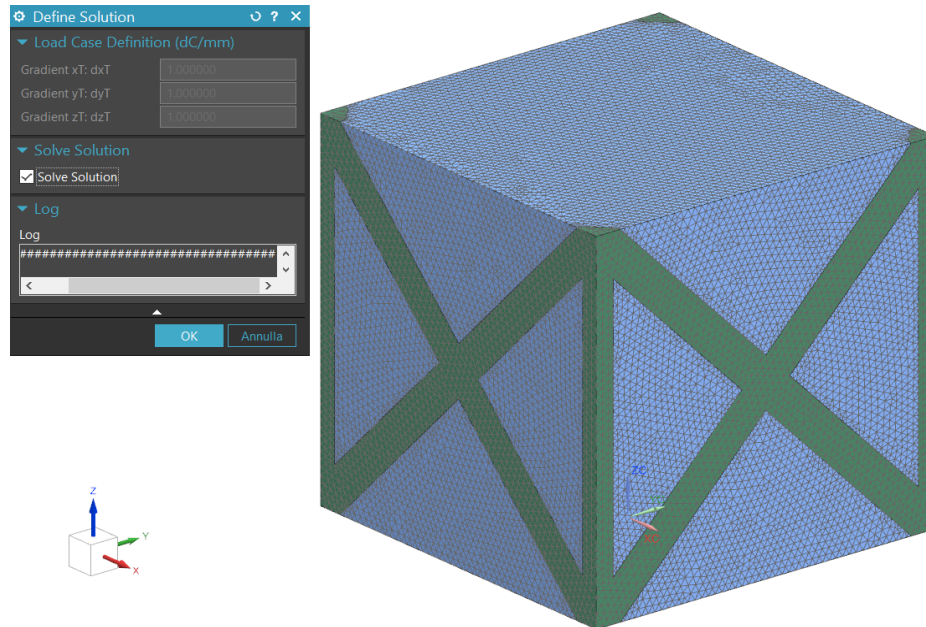


Figura 3.11. Finestra corrispondente al comando “Definisci soluzione”

Per l’omogeneizzazione, come detto precedentemente, sono necessarie sia la simulazione strutturale che la simulazione termica. Conseguentemente, i passaggi precedenti saranno ripetuti due volte, scegliendo nel primo caso, al punto n°4, di avviare una simulazione termica (o anche strutturale, non c’è un ordine obbligatorio da seguire) e procedere come sopra descritto dal punto n°5 al n°7. Nel secondo caso, al punto n°4, si sceglierà di avviare una simulazione strutturale (o termica, dipende da quale delle due è stata svolta in precedenza). Anche qui si procederà come descritto dal punto n°5 al n°7. L’unica differenza, come detto precedentemente, sarà la mancanza della geometria della polvere nella simulazione strutturale.

Completate entrambe le simulazioni, in alto a sinistra del display, selezionare “File” e, nella sezione “Salva”, selezionare “Salva tutto”.

Salvate quindi le simulazioni, selezionare “Omogeneizzazione”. In questa sezione si potranno scegliere il tipo di simulazione strutturale e termica da utilizzare come input. La prima sarà inserita nel menù a tendina presente in “Structural input data”, la seconda in quello presente in “Thermal input data”. In figura 3.12 la schermata corrispondente.

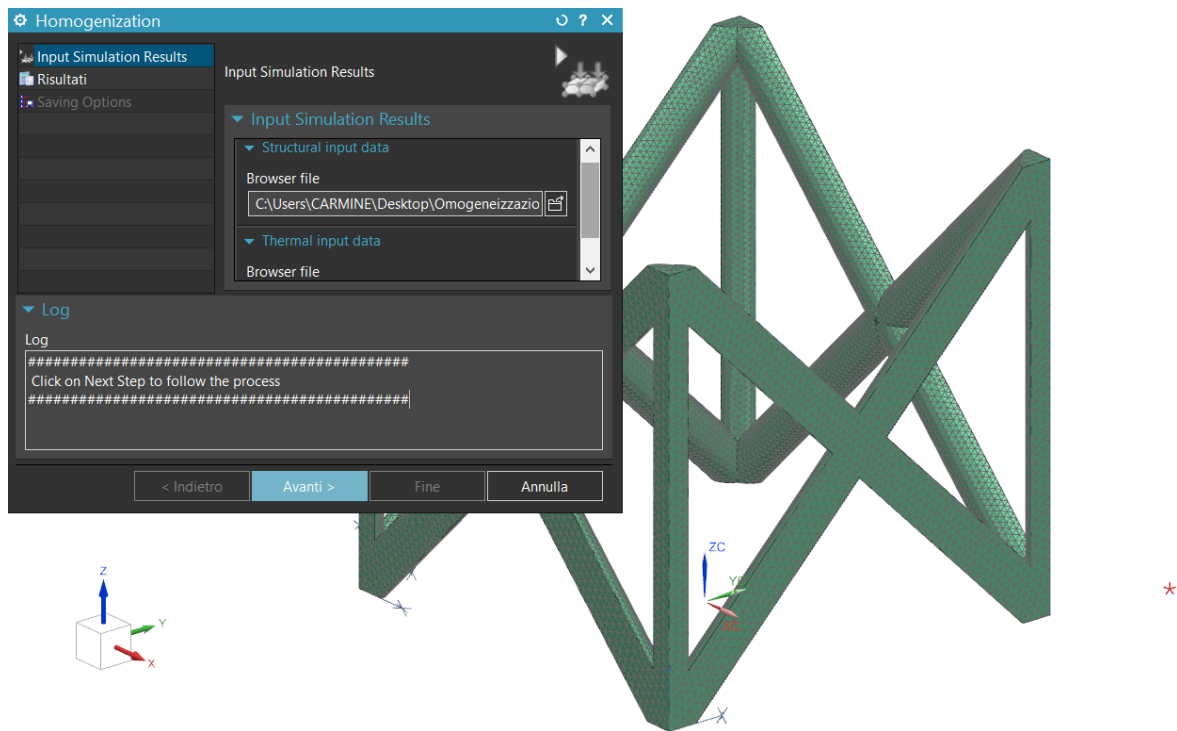


Figura 3.12. Finestra corrispondente al comando “Omogeneizzazione”

A questo punto cliccare “Avanti” per dare avvio all’operazione di omogeneizzazione. Terminata l’operazione, cliccare nuovamente “Avanti” per accedere alla sezione “Saving options”, dove poter scegliere il file XML dove trascrivere le caratteristiche omogeneizzate ottenute, il tipo di materiale e il nome dello stesso nella sezione “Descrizione materiale”. A questo punto selezionare “Fine” per completare il processo. In figura 3.13 la schermata corrispondente.

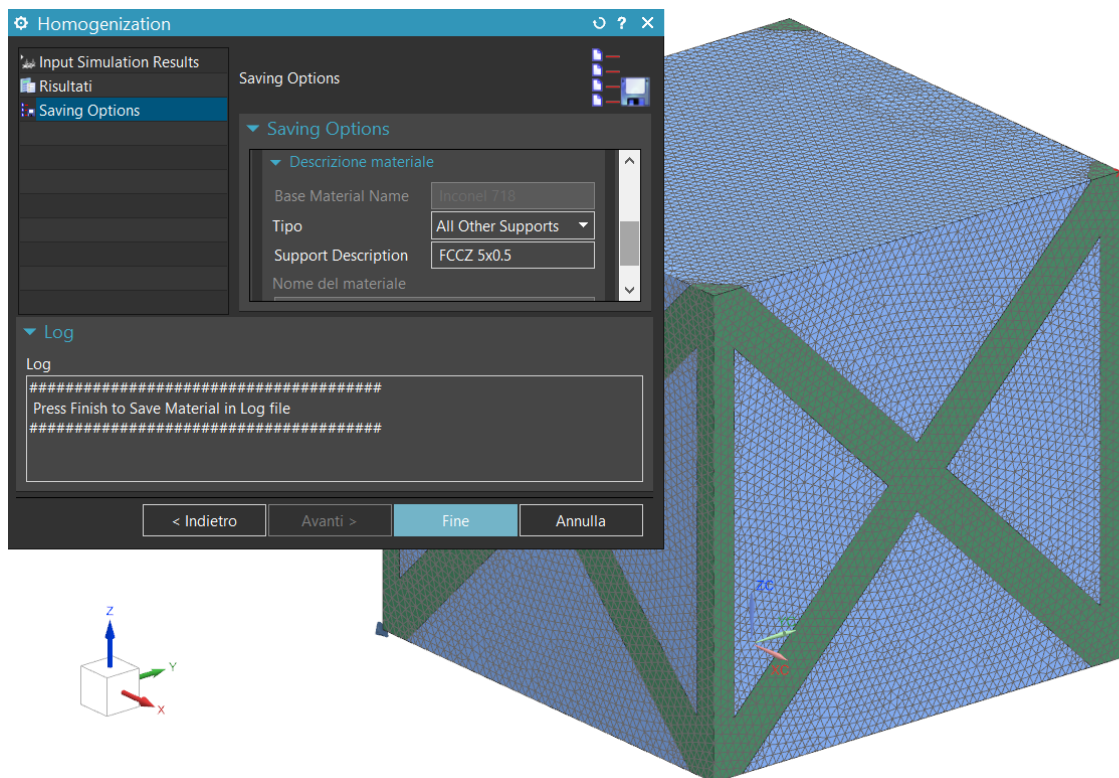


Figura 3.13. Finestra corrispondente alla sezione "Saving options"

Per poter visualizzare le nuove caratteristiche ottenute, bisogna semplicemente aprire il database XML "parameters_support". A questo punto saranno disponibili tutte le caratteristiche dei materiali salvati fino a quel momento. In figura 3.14 un esempio del foglio XML.

```

▼ <HOMOGENIZED name="Inconel 718, All Other Supports FCCZ 3x0.5">
  <BASE_MATERIAL name="Inconel 718"/>
  <TYPE name="All Other Supports"/>
  <PROPERTIES AMAT1="1.600e-05" AMAT1_UNIT="1/dK" AMAT2="1.600e-05" AMAT2_UNIT="1/dK" AMAT3="1.600e-05" AMAT3_UNIT="1/dK" CP="4.350e+02" CP_UNIT="J/kg-dK" E12="3.275e+03" E12_UNIT="N/mm^2(MPa)"
  E13="3.272e+03" E13_UNIT="N/mm^2(MPa)" E23="7.570e+03" E23_UNIT="N/mm^2(MPa)" G12="8.740e+01" G12_UNIT="N/mm^2(MPa)" G13="3.313e+03" G13_UNIT="N/mm^2(MPa)" G23="3.313e+03" G23_UNIT="N/mm^2(MPa)"
  K1="1.100e+00" K1_UNIT="W/m-dK" K2="1.100e+00" K2_UNIT="W/m-dK" K3="1.965e+00" K3_UNIT="W/m-dK" NU12="-2.454e-01" NU13="3.265e-01" NU23="3.266e-01" ORIENT_X="1,0,0" ORIENT_Y="0,1,0" RHO="5.306e+03"
  RHO_UNIT="kg/m^3"/>
</HOMOGENIZED>
▼ <HOMOGENIZED name="Inconel 718, All Other Supports FCCZ 8x0.5">
  <BASE_MATERIAL name="Inconel 718"/>
  <TYPE name="All Other Supports"/>
  <PROPERTIES CP="4.350e+02" CP_UNIT="J/kg-dK" E12="2.978e+02" E12_UNIT="N/mm^2(MPa)" E13="2.978e+02" E13_UNIT="N/mm^2(MPa)" E23="7.117e+02" E23_UNIT="N/mm^2(MPa)" G12="1.285e+00" G12_UNIT="N/mm^2(MPa)"
  G13="4.526e+02" G13_UNIT="N/mm^2(MPa)" G23="4.526e+02" G23_UNIT="N/mm^2(MPa)" K1="3.571e-01" K1_UNIT="W/m-dK" K2="3.571e-01" K2_UNIT="W/m-dK" K3="5.007e-01" K3_UNIT="W/m-dK" AMAT1="1.600e-05"
  AMAT1_UNIT="1/dK" AMAT2="1.600e-05" AMAT2_UNIT="1/dK" AMAT3="1.600e-05" AMAT3_UNIT="1/dK" NU12="-3.824e-01" NU13="4.002e-01" NU23="4.002e-01" RHO="4.978e+03" RHO_UNIT="kg/m^3" ORIENT_X="1,0,0"
  ORIENT_Y="0,1,0"/>
</HOMOGENIZED>
▼ <HOMOGENIZED name="Inconel 718, All Other Supports FCCZ 5x0.5">
  <BASE_MATERIAL name="Inconel 718"/>
  <TYPE name="All Other Supports"/>
  <PROPERTIES CP="4.350e+02" CP_UNIT="J/kg-dK" E12="8.671e+02" E12_UNIT="N/mm^2(MPa)" E13="8.670e+02" E13_UNIT="N/mm^2(MPa)" E23="2.064e+03" E23_UNIT="N/mm^2(MPa)" G12="9.336e+00" G12_UNIT="N/mm^2(MPa)"
  G13="1.170e+03" G13_UNIT="N/mm^2(MPa)" G23="1.170e+03" G23_UNIT="N/mm^2(MPa)" K1="5.346e-01" K1_UNIT="W/m-dK" K2="5.347e-01" K2_UNIT="W/m-dK" K3="8.837e-01" K3_UNIT="W/m-dK" AMAT1="1.600e-05"
  AMAT1_UNIT="1/dK" AMAT2="1.600e-05" AMAT2_UNIT="1/dK" AMAT3="1.600e-05" AMAT3_UNIT="1/dK" NU12="-3.433e-01" NU13="3.798e-01" NU23="3.798e-01" RHO="5.068e+03" RHO_UNIT="kg/m^3" ORIENT_X="1,0,0"
  ORIENT_Y="0,1,0"/>
</HOMOGENIZED>

```

Figura 3.14. Foglio XML "parameters_support"

3.2 Calibrazione dei provini stampati

Il processo di calibrazione dei provini, come descritto in [12] e [13], ha come funzione il calcolo dei valori necessari a prevedere le linee di restringimento dei campioni stampati, in base alla stampante e al materiale utilizzati.

Come risultato dei calcoli della calibrazione si ottiene la curva α -C, che fornisce il coefficiente di dilatazione termica del materiale in funzione della rigidità, andando a prevedere le linee di restringimento nei campioni stampati. La curva α -C è costituita da cinque valori:

- Cmax, valore massimo della rigidezza;
- Cmin, valore minimo della rigidezza;
- n, ordine della curva di calibrazione;
- Alpha max, il coefficiente massimo di dilatazione termica;
- Alpha min, il coefficiente minimo di dilatazione termica.

Questi valori vengono utilizzati durante il processo di simulazione di stampa di Simcenter 3D, per regolare le linee di restringimento.

Per calibrare il materiale, è possibile utilizzare uno dei seguenti strumenti:

1. Calibrazione automatica del materiale (Automatic Material Calibration), che va a calibrare tutti i campioni contemporaneamente. Applica automaticamente i valori di α appropriati a ciascun ponte (provini) e aggiorna automaticamente i parametri di processo e il processo di stampa;
2. Calibrazione manuale del materiale (Manual Material Calibration), che va a calibrare un solo campione alla volta e richiede la post-elaborazione manuale dei risultati per ottenere la rigidità Cmin, l'aggiornamento manuale di un foglio di calcolo e l'aggiornamento manuale del "Computation dialog box" (prima di far partire l'operazione di calibrazione sul software) per ogni ponte. Il processo di calibrazione manuale del materiale offre una maggior precisione, a scapito, conseguentemente, del tempo impiegato per completare l'operazione.

Per calcolare la deformazione di contrazione tra la temperatura del materiale (temperatura del solidus) e la temperatura esterna al pool di fusione (temperatura di riferimento), il processo di calibrazione del materiale utilizza un coefficiente di restringimento termico dipendente dalla rigidità, chiamato anche curva α -C.

La curva α -C considera l'effetto della rigidità degli strati stampati precedentemente sul restringimento effettivo di uno strato appena stampato. Poiché i valori misurati possono essere ottenuti solo dopo il raffreddamento, e quindi includendo nella misurazione anche le deformazioni causate dal raffreddamento, il processo di calibrazione del materiale definisce tre deformazioni per calibrare la curva α -C:

- Deformazioni misurate (dm);
- Deformazioni calcolate dopo la stampa (dAP);
- Deformazioni calcolate dopo il raffreddamento (dAC).

In figura 3.15 un esempio di curva di calibrazione α -C.

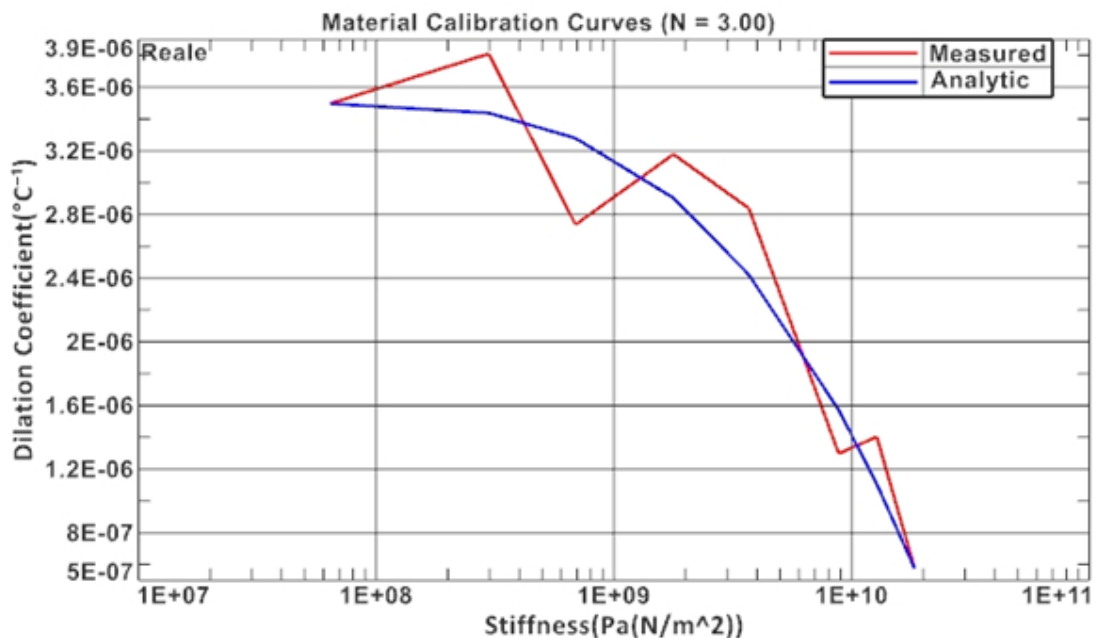


Figura 3.15. Curva α -C

La calibrazione del materiale inizia calcolando la differenza tra lo spostamento nella posizione della linea di restringimento (waist) e del primo strato (root), utilizzando la seguente espressione:

$$\delta_m^{wr} = d_m^{waist} - d_m^{root}$$

dove:

Lo spostamento misurato (d_m) è la metà della larghezza misurata della linea di restringimento o del primo strato.

L'apice "wr" è definito come:

$$wr = waist - root$$

Le differenze calcolate tra la larghezza della linea di restringimento e del primo strato sono:

- Per il caso post-stampa:

$$\delta_{AP}^{wr} = d_{AP}^{waist} - d_{AP}^{root}$$

- Per il caso post-raffreddamento:

$$\delta_{AC}^{wr} = d_{AC}^{waist} - d_{AC}^{root}$$

Il processo di calibrazione del materiale confronta la differenza misurata δ_m (dopo il raffreddamento) con la differenza calcolata δ_{AC} . Entrambe le differenze sono compensate, per considerare il restringimento conseguente al raffreddamento termico:

$$\delta_{SHR} = \delta_{AC}^{wr} - \delta_{AP}^{wr}$$

Il processo di calibrazione del materiale ottiene le deformazioni calcolate per un dato valore del coefficiente di restringimento termico α_{i+1} . Pertanto, il valore successivo di $\alpha_i + 1$ si ottiene usando:

$$\alpha_{i+1} = \frac{\delta_m^{wr} - \delta_{SHR}}{\delta_{AC}^{wr} - \delta_{SHR}} \cdot \alpha_i$$

Ciò si traduce in una nuova fase di calcolo e nuove deformazioni utilizzando $\alpha_i + 1$. Questo processo viene ripetuto (manualmente o automaticamente, a seconda del metodo utilizzato) fino a quando la differenza tra δ_m (differenza misurata) e δ_{AC} (differenza calcolata) è inferiore al livello di precisione che ci si era prefissati di raggiungere.

Le deformazioni degli oggetti di stampa, utilizzando la tecnologia additiva “Powder bed fusion”, dipendono dal tipo di materiale utilizzato per la stampa, dai parametri caratterizzanti il processo e dalla geometria della parte stessa.

Generalmente, strutture flessibili presentano deformazioni di maggior entità, rispetto a strutture caratterizzate da più elevata stabilità e rigidità. Come conseguenza, l'obiettivo che si prefigge la calibrazione del materiale è l'adattamento dei parametri del materiale e del processo, nel modello di simulazione, affinché la deformazione di

ritiro prodotta dalla simulazione, risulti uguale al valore di contrazione misurato nella parte stampata nella realtà.

La deformazione intrinseca (ϵ_{th}) è funzione della rigidità della struttura. Essa viene accumulata durante la stampa ed è responsabile del restringimento termico dell'oggetto stampato. Può essere valutata come:

$$\epsilon_{th} = \alpha(C) * \Delta T$$

dove:

- C [N/m²] è la rigidità della parte sotto l'attuale strato di polvere;
- α [1/°C] è il coefficiente di restringimento termico dipendente dalla rigidità;
- ΔT [°C] è la differenza tra la temperatura di solidificazione e la temperatura di riferimento (stampa).

Il risultato finale del processo di calibrazione del materiale è, come detto in precedenza, l'ottenimento dei valori di C_{max} , C_{min} , n , α_{max} e α_{min} , che sono fondamentali al fine di garantire che, dalla simulazione, si possano ottenere delle deformazioni dai valori attendibili, equivalenti al restringimento fisico della parte stampata nella realtà.

Prima di iniziare il processo di calibrazione sul software NX, è necessario stampare, con la stampante interessata, i provini per la calibrazione, utilizzando, naturalmente, il materiale di cui è necessario conoscere la curva α - C .

Una volta ultimata la stampa e raffreddati i provini, bisogna procedere con le misurazioni nei punti specifici precedentemente descritti. Le misurazioni possono essere fatte utilizzando un micrometro digitale, un software di scansione 3D ad alta precisione o un sistema di misurazione tramite software.

I provini di calibrazione consistono in una parete (wall) e otto ponti (bridge), ognuno con un diverso spessore della gamba. Inoltre sono provvisti di:

- Una piattaforma di 5 mm, che aiuta a prevenire le deformazioni conseguenti la rimozione dei provini dal piatto di stampa;

- Uno strato di materiale alto 1 mm, superiormente il punto di chiusura (punto in cui si ricongiungono le gambe del ponte), che è l'altezza dei layer che sarà impostata nella simulazione meccanica su NX successivamente.

In figura 3.16 un'immagine dei vari provini dove, da sinistra verso destra, si susseguono la parete (estrema sinistra) e i ponti, con larghezza delle gambe crescente.

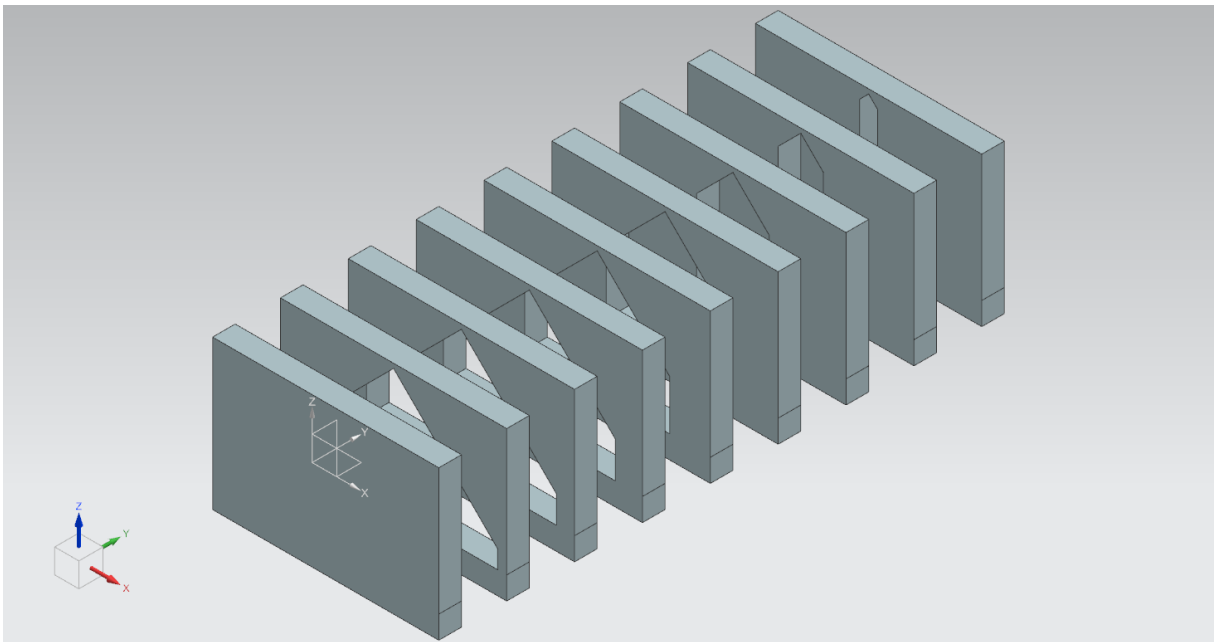


Figura 3.16. Provini di calibrazione in NX

In figura 3.17 possiamo osservare, invece, i provini reali stampati.

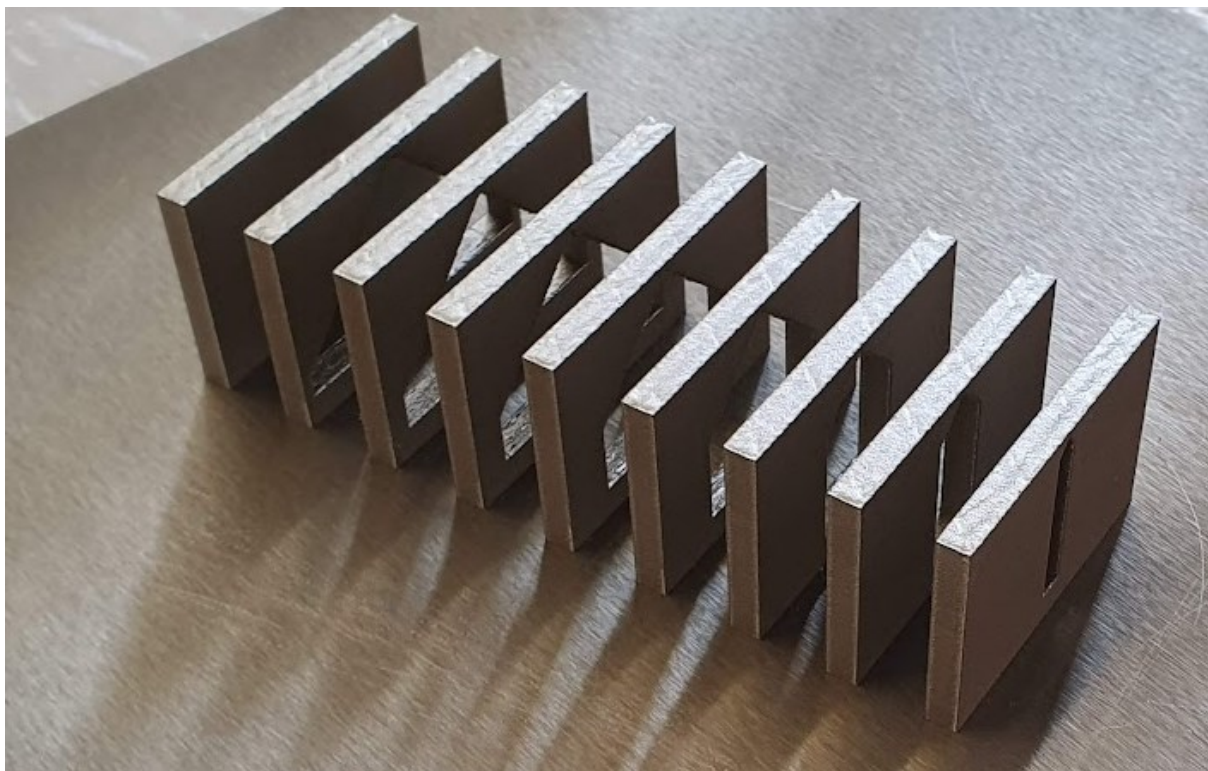


Figura 3.17. Provini reali stampati

3.2.1 Procedimento in NX di calibrazione dei provini

Nel caso di studio, i provini sono stati stampati con una EOS M290.

Le misurazioni sono state effettuate su un modello .step, grazie l'utilizzo del software 3D Rhinoceros. Tale modello era costituito da una rete mesh completa del piatto di stampa e dei provini stampati.

L'obiettivo principale è stato cercare di raggiungere la maggior precisione possibile. Per questo motivo, per poter trascurare in tutte le misurazioni la rugosità superficiale dei provini ed evitare di sfalsare in qualche modo le misurazioni della dimensione della larghezza minima (in vita, waist) e della larghezza del fondo (radice, root), che sono evidenziate in figura 3.18, sono state svolte 5 misurazioni, di cui 3 eseguite ad altezze sfalsate di circa 0,10 mm.

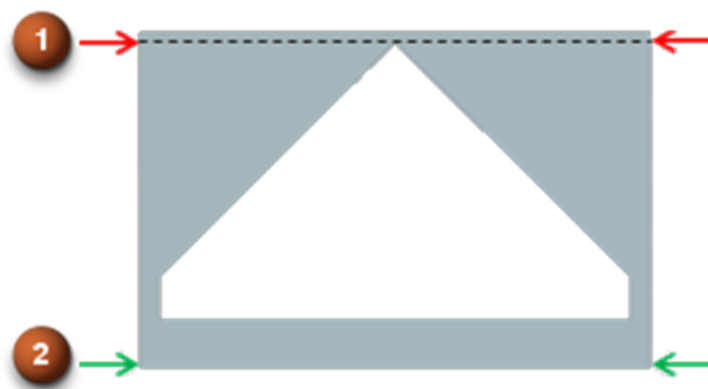


Figura 3.18. Waist in posizione 1; root in posizione 2

Le 2 misurazioni rimanenti sono state prese nelle zone anteriore e posteriore della faccia laterale del provino.

Per le prime 3 misurazioni:

1. Sono stati creati dei piani orizzontali per ogni altezza (3 piani superiori per il calcolo della larghezza minima (waist), 3 piani inferiori per il calcolo della larghezza del fondo (root)) da usare come riferimento per la creazione di distribuzioni di punti. In figura 3.19 la posizione dei piani di riferimento superiori utilizzati.

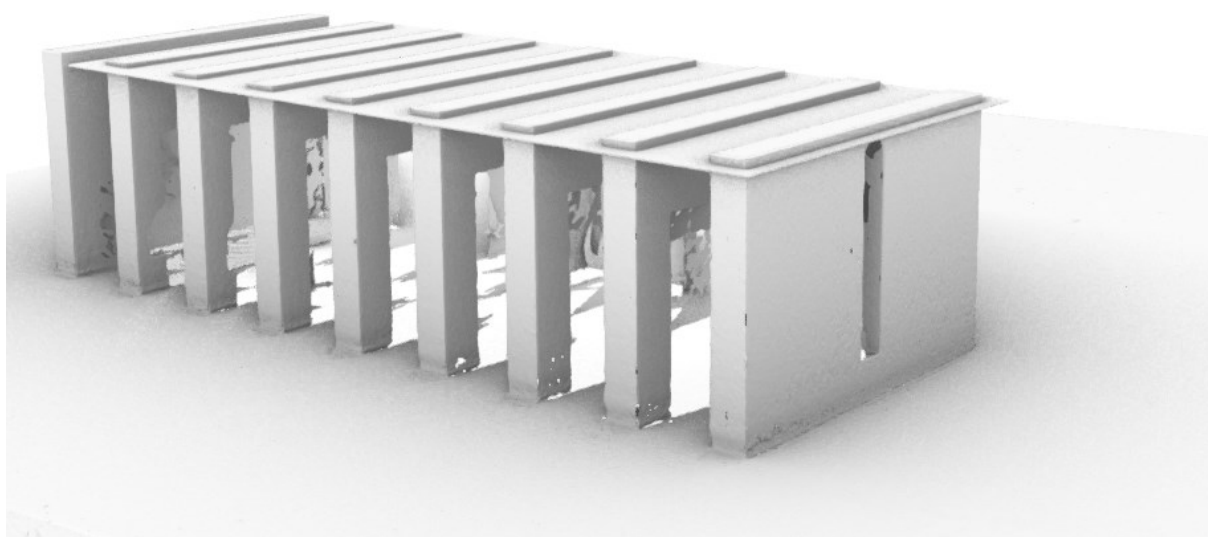


Figura 3.19. Posizione piani di riferimento superiori

Ciò ha permesso di ottenere tali distribuzioni sulle superfici del provino (in quanto tutti i punti delle distribuzioni si trovavano sulla superficie del provino interessato) diverse per ogni prova, essendo l'altezza presa come riferimento leggermente sfalsata, ma comunque tutte estremamente vicine all'altezza interessata per la misurazione, cioè quella del punto di chiusura delle gambe del provino.

Per la prima misurazione i piani di riferimento sono stati, nella parte superiore, il piano posto ad una z di circa 31.90 mm, mentre, nella parte inferiore, il piano posto ad una z di circa 0.44 mm.

Per la seconda misurazione, superiormente, il piano era posto ad una z di circa 31.80 mm, mentre, inferiormente, il piano era ad una z di circa 0.34 mm.

Infine, per la terza misurazione, superiormente, il piano era ad una z di circa 32.02 mm, mentre, inferiormente, il piano era ad una z di circa 0.56 mm. In figura 3.20 si possono osservare le diverse distribuzioni di punti, in vita e sul fondo, identificate con colori differenti per distinguerle in base all'altezza del piano preso come riferimento;



Figura 3.20. Distribuzioni di punti su provini con misurazioni 1-3

2. Per ogni distribuzione di punti è stato creato il piano passante per essa. Ne si è poi calcolato il baricentro. In figura 3.21 la posizione dei piani passanti per le distribuzioni dei punti nella zona superiore. In figura 3.22 la posizione dei piani passanti per le distribuzioni dei punti nella zona inferiore.



Figura 3.21. Piani zona superiore del provino

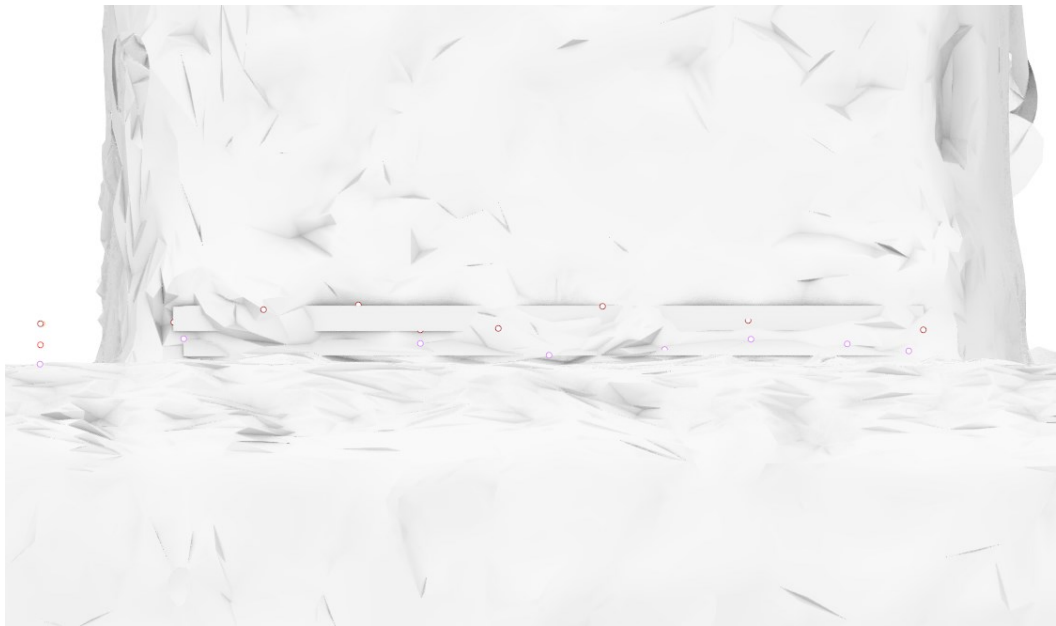


Figura 3.22. Piani zona inferiore del provino

Questa operazione è stata svolta su entrambe le superfici laterali dei provini, portando quindi ad avere, per ogni provino, 6 baricentri (n° delle distribuzioni e piani creati) sulla zona centrale della superficie laterale destra (3 in vita e 3 sul fondo) e 6 baricentri sulla zona centrale della superficie laterale sinistra (3 in vita e 3 sul fondo). In figura 3.23 si può notare la distribuzione dei baricentri sulla superficie laterale dei provini;

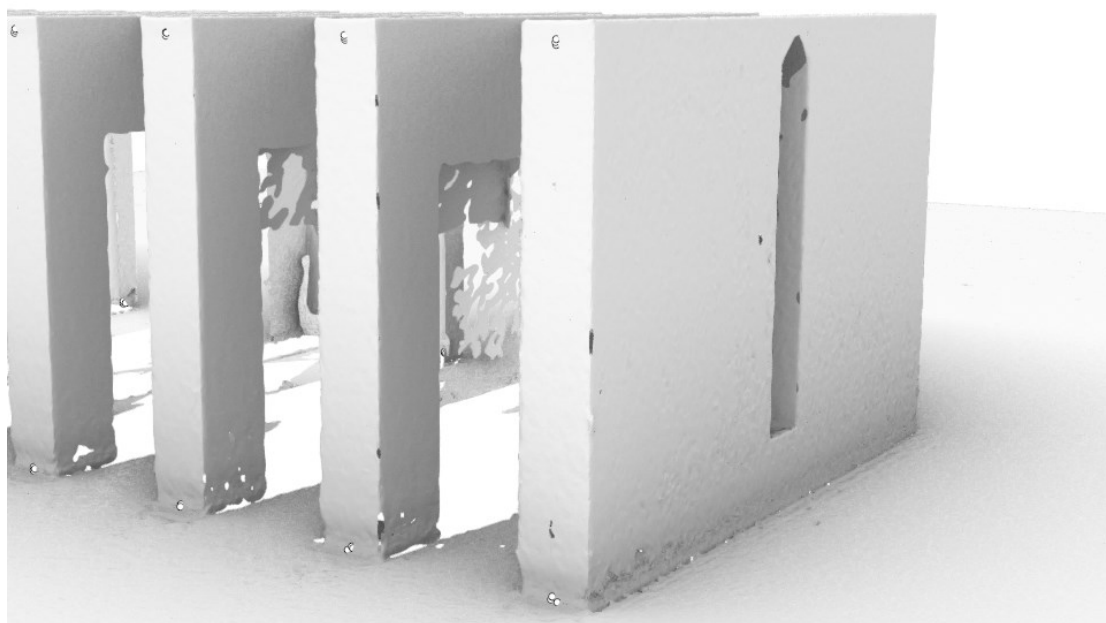


Figura 3.23. Distribuzioni baricentri zona centrale provini

3. Si è calcolata quindi la distanza tra i baricentri superiori sinistro e destro e, ugualmente, tra quelli inferiori.

Le rimanenti 2 misurazioni, come precedentemente detto, sono state eseguite creando una distribuzione di punti nella zona anteriore e posteriore della superficie laterale del provino, sia ad altezza vita che ad altezza fondo del provino. Creando il piano passante per ogni distribuzione si è calcolato quindi il baricentro dello stesso. In questo modo sono stati ottenuti altri 8 baricentri per provino (4 sulla superficie sinistra e 4 sulla superficie destra). Anche in questo caso si è calcolata la distanza tra di essi. In figura 3.24 la distribuzione di baricentri ottenuta con le ultime 2 misurazioni.

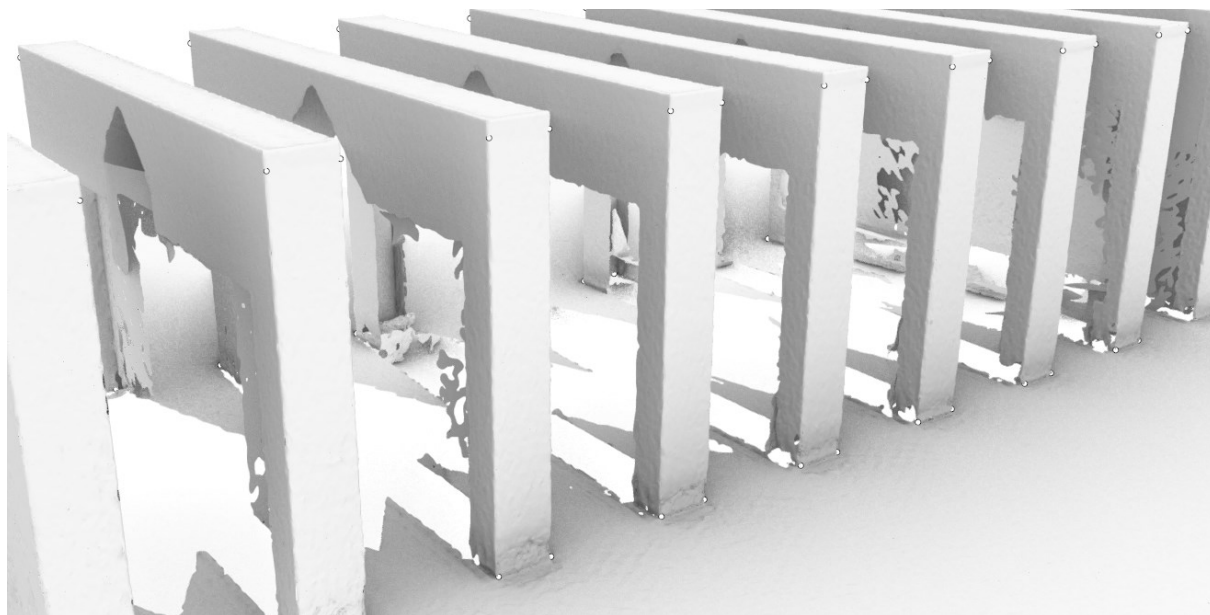


Figura 3.24. Distribuzione baricentri misurazione 4 e misurazione 5

In totale quindi, per ogni provino, sono state ottenute 5 misurazioni in corrispondenza della linea di restringimento (waist) e 5 in corrispondenza della larghezza sul fondo (root). Si è proceduto poi a farne una media, ottenendo, quindi, il valore della larghezza della linea di restringimento e quello della larghezza sul fondo.

A questo punto, i valori necessari da inserire all'interno dell'operazione di calibrazione in NX sono pari alla metà della differenza tra la larghezza del fondo e della linea di restringimento.

Essendo stata fatta manualmente, bisogna, come specificato nel paragrafo precedente, aggiornare autonomamente il foglio di calcolo.

Di seguito, la tabella 3.1, che riporta i risultati delle misurazioni della larghezza della linea di restringimento, la tabella 3.2, che riporta i risultati delle misurazioni della larghezza sul fondo e la tabella 3.3., che riporta le medie dei valori precedenti e ne calcola la metà della differenza. Tutte le misurazioni riportate sono in mm.

Tabella 3.1. Risultati misurazioni waist (EOS M290)

Bridge leg width	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5
23 mm	49,83203	49,82678	49,84985	49,78045	49,7088
20 mm	49,79701	49,78439	49,81495	49,75653	49,69742
17 mm	49,79526	49,74147	49,79772	49,66382	49,63083
12 mm	49,75777	49,70647	49,79509	49,6696	49,64709
9 mm	49,74216	49,70831	49,78667	49,59224	49,65771
6 mm	49,74694	49,72309	49,77843	49,63296	49,65271
4 mm	49,77391	49,72858	49,80936	49,62663	49,65387
2 mm	49,7704	49,73587	49,78135	49,55809	49,72116

Tabella 3.2. Risultati misurazioni root (EOS M290)

Bridge leg width	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5
23 mm	49,8898	49,90603	49,85026	49,72708	49,78809
20 mm	49,83112	49,92214	49,86191	49,79784	49,62804
17 mm	49,81228	49,90551	49,84692	49,68015	49,64369
12 mm	49,89103	49,90593	49,87709	49,64706	49,63651
9 mm	49,93109	49,91393	49,87415	49,70542	49,82991
6 mm	49,97355	49,85816	49,87205	49,68582	49,78125
4 mm	49,993	49,95741	49,94225	49,86479	49,76335
2 mm	49,99525	49,89613	49,94743	49,85454	49,77819

Tabella 3.3. Valori finali (EOS M290)

Bridge leg width	Root	Waist	Differenza/2
23 mm	49,832252	49,799582	0,016
20 mm	49,80821	49,77006	0,019
17 mm	49,77771	49,72582	0,026
12 mm	49,791524	49,715204	0,038
9 mm	49,8509	49,697418	0,077
6 mm	49,834166	49,706826	0,064
4 mm	49,90416	49,71847	0,093
2 mm	49,894308	49,713374	0,090

I valori sotto la voce “Bridge leg width” corrispondono, appunto, alla larghezza delle gambe del provino a cui si rifanno la misura del root e del waist.

A questo punto si è proceduto con la simulazione dei provini su NX.

Si avvia il modulo “Additive manufacturing” di NX e si apre il file .part dei provini. Una volta posizionati sul piatto di stampa, nel gruppo “Simulazione processo” si seleziona “Avvia simulazione processo”, facendo attenzione a selezionare tutti i provini. A questo punto, nel gruppo “Additive manufacturing”, si impostano tutti i parametri di simulazione:

1. In “Impostazioni globali” si sceglie il tipo di simulazione da avviare. Si spuntano le caselle “Thermal + Mechanical” e “Simulate powder”. In figura 3.25 la finestra corrispondente;

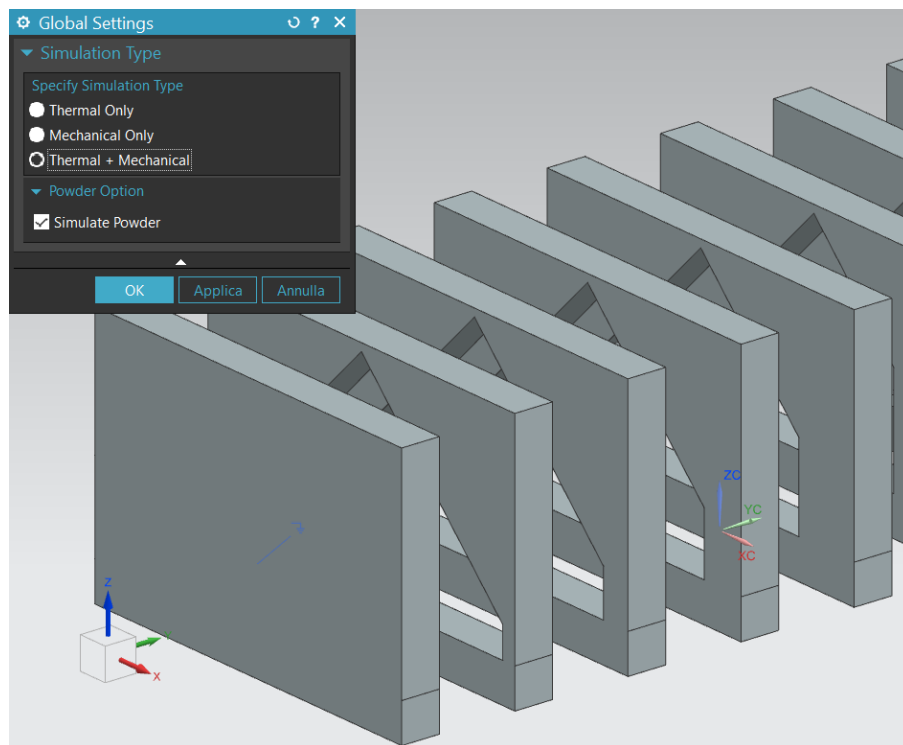


Figura 3.25. Finestra corrispondente al comando “Global Settings”

2. In “Parametri processo/materiale” si settano tutti i parametri di processo della stampa. Nel nostro caso si sceglie, nel menù “Select print jobs”, “Typical Inconel 718 (40 micron)”. È di fondamentale importanza assicurarsi che i parametri di processo settati e i “parameter set” scelti durante questa fase siano gli stessi utilizzati durante la stampa dei provini, affinché i risultati della calibrazione stessa non risultino falsati. In figura 3.26 la schermata corrispondente;

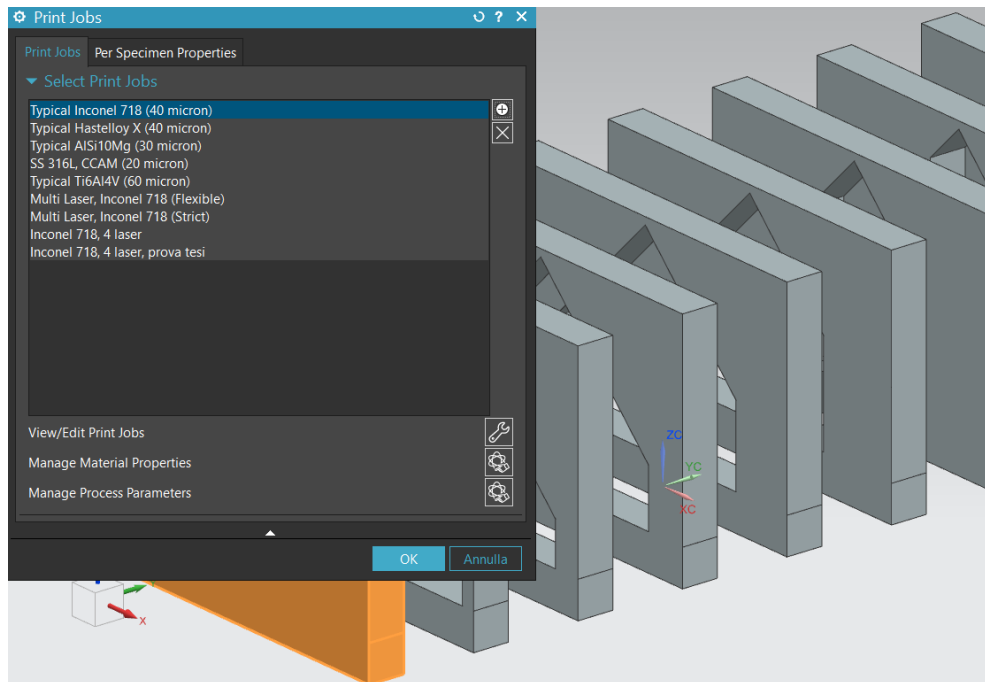


Figura 3.26. Finestra corrispondente al comando "Print Jobs"

3. In "Definisci sezionamento termico" si inserisce il valore dello slicing termico richiesto. In questo caso, si inserisce 5 nella casella "Number of slices". In figura 3.27 i parametri utilizzati;

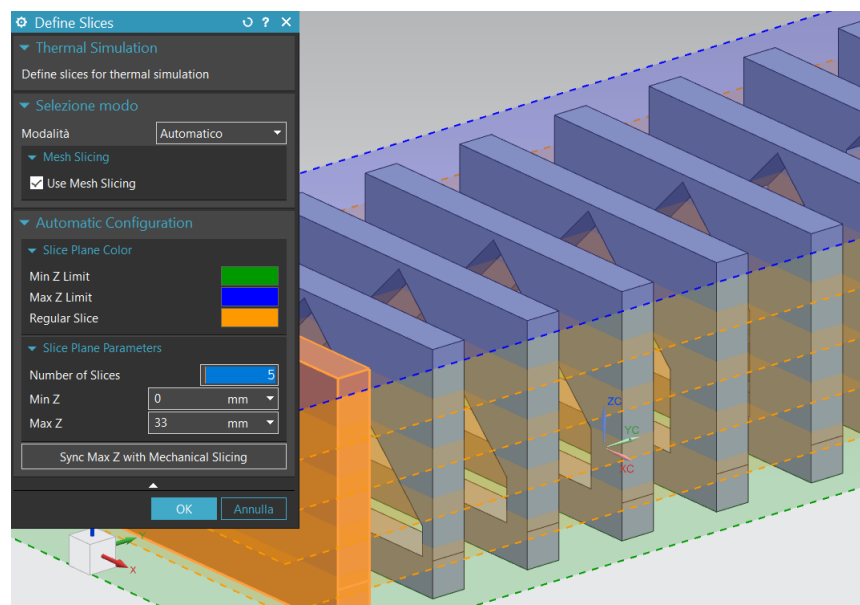


Figura 3.27. Finestra corrispondente al comando "Definisci sezionamento termico"

4. In “Definisci sezionamento meccanico” si inserisce il valore dello spessore desiderato per ogni layer. In questo caso, si inserisce 1 mm nella casella “Slice thickness”. In figura 3.28 i parametri utilizzati;

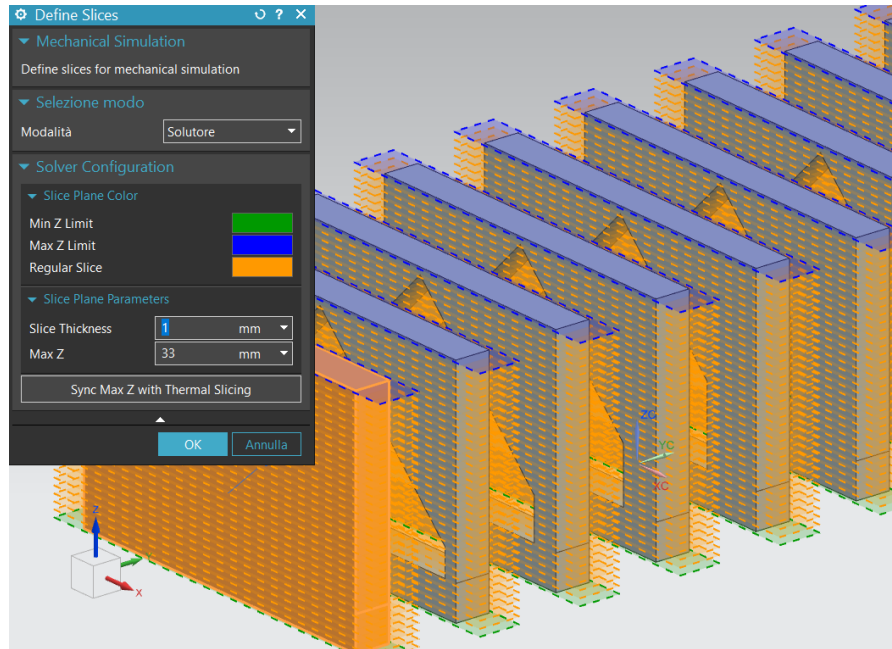


Figura 3.28. Finestra corrispondente al comando “Definisci sezionamento meccanico”

5. In “Mesh tetr. 3D” si settano i parametri di meshatura. In questo caso, si spunta la casella “Standard meshing”, mentre non vengono modificati gli altri valori. In figura 3.29 la schermata corrispondente;

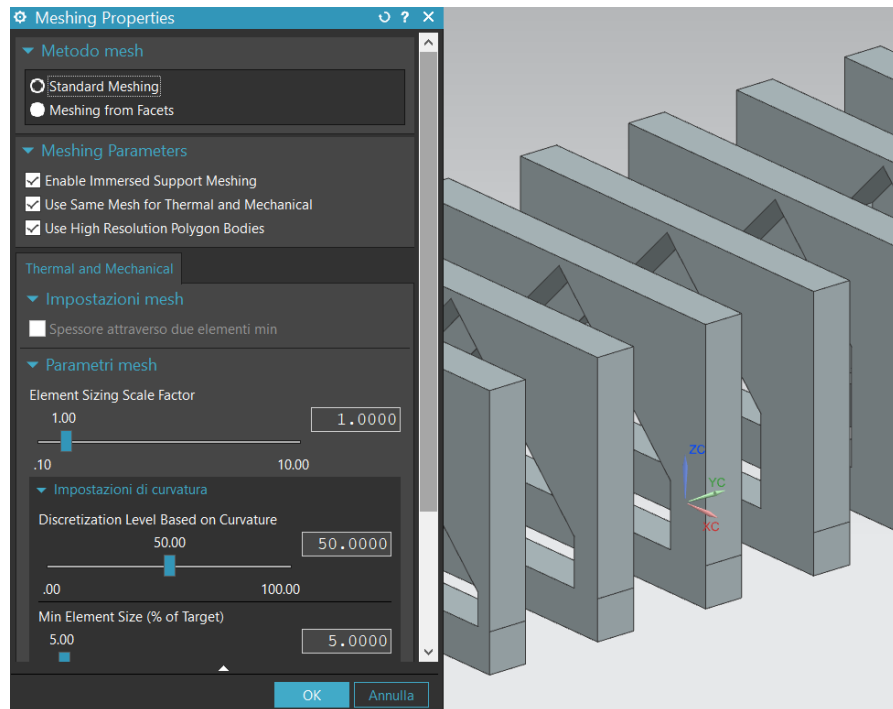


Figura 3.29. Finestra corrispondente al comando "Mesh tetr. 3D"

6. In "Opzioni calcolo" si impostano tutti i parametri di calcolo (n° di processori, memoria utilizzata ecc.). In questo caso, nella sezione "Opzioni generali", si imposta 2 come "Multiplicity value". Nella sezione "Alpha/strain", si spunta "User defined alpha per layer". Nel menù sottostante, in corrispondenza di "SPECIMEN_1", si cambia il valore di Alpha da 6.2550e-06 a 1e-06. Cliccando poi con il tasto destro del mouse su "SPECIMEN_1", si seleziona "Copy value to all rows", per copiare il valore di Alpha in tutti gli altri layer. In figura 3.30 la schermata corrispondente;

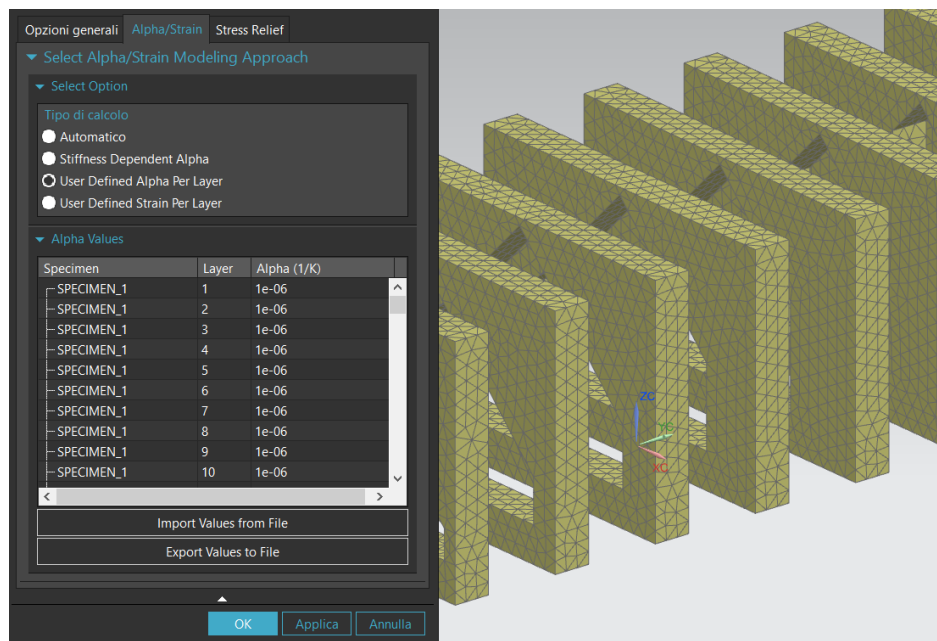


Figura 3.30. Finestra corrispondente al comando “Opzioni calcolo”

7. Si avvia la simulazione;
8. Terminata la simulazione, nel gruppo “File simulazione processo”, si seleziona “Salva processo di simulazione” per salvare tutti i file creati;
9. Si seleziona “Calibrazione materiale automatica”.

In corrispondenza della casella “Precisione” si inserisce il valore massimo di differenza che può esserci tra le misurazioni sul campione stampato e quello simulato. In questo caso, è stata scelta una precisione di 0.1 μm .

Come “Numero massimo di iterazioni” si inserisce il numero massimo di volte che la soluzione delle distorsioni può essere ripetuta prima che il processo converga. In questo caso sono state impostate 10 iterazioni.

A questo punto, sotto la voce “Specimen ID” in “Dati modello”, cliccando con il tasto destro del mouse su 1 (corrispondente alla parete tra i provini), si seleziona “exclude specimen”, in quanto trascurabile ai fini dei risultati della calibrazione del Inconel 718. A questo punto, si inseriscono i valori in precedenza misurati sotto la voce “D measured [micron]”, prestando attenzione al provino corrispondente ad ogni casella. I valori dovranno essere inseriti in micron. In figura 3.31 la schermata corrispondente.

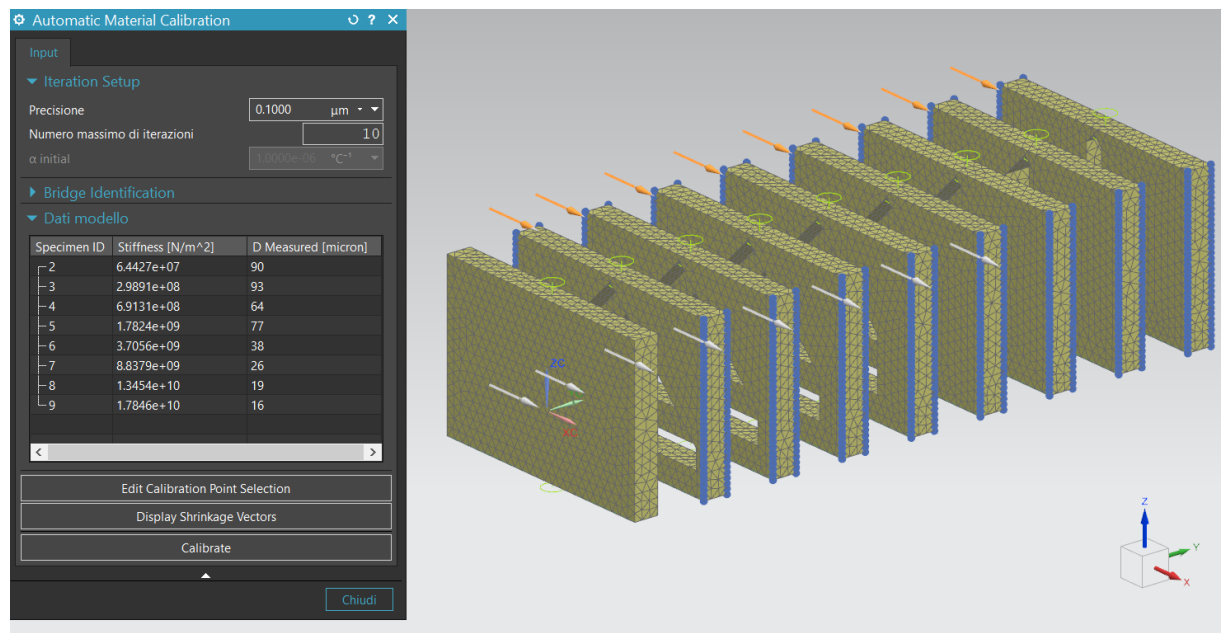


Figura 3.31. Schermata con valori calibrazione

Le frecce arancioni (notare in figura 3.31) indicano i punti considerati come waist e root durante le misurazioni. Nel caso in cui si volessero cambiare, ciò è possibile con “Edit calibration point selection”.

Se i punti considerati come waist e root sono stati selezionati in maniera corretta, si può procedere con la calibrazione, selezionando “Calibrate”;

- Terminata la calibrazione, si otterranno i valori di C_{max} , C_{min} , α_{max} e α_{min} . In figura 3.32 la schermata corrispondente.

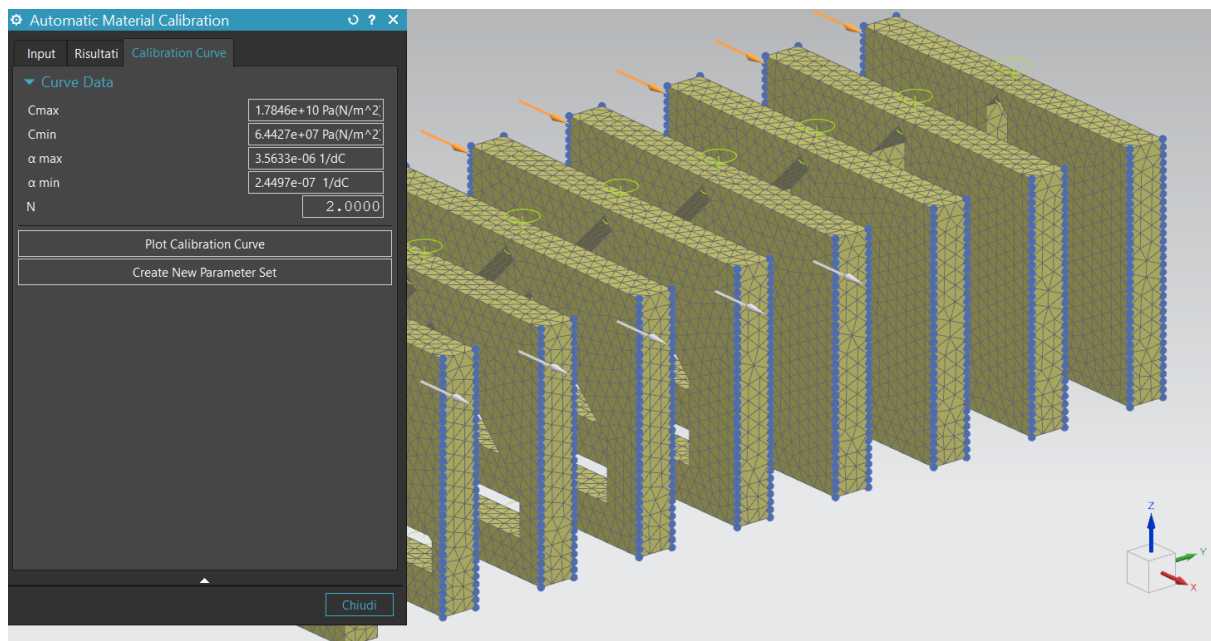


Figura 3.32. Schermata valori curva di calibrazione

Inoltre si può impostare l'ordine N della curva di calibrazione, in modo che si possa ottenere una curva analitica che sia in grado di approssimare al meglio la curva misurata. In questo caso, un N pari a 2 è sembrato la soluzione che potesse adattarsi meglio alla curva misurata. Per ottenere la curva di calibrazione selezionare "Plot calibration curve". In figura 3.33 la curva di calibrazione ottenuta per il caso di studio.

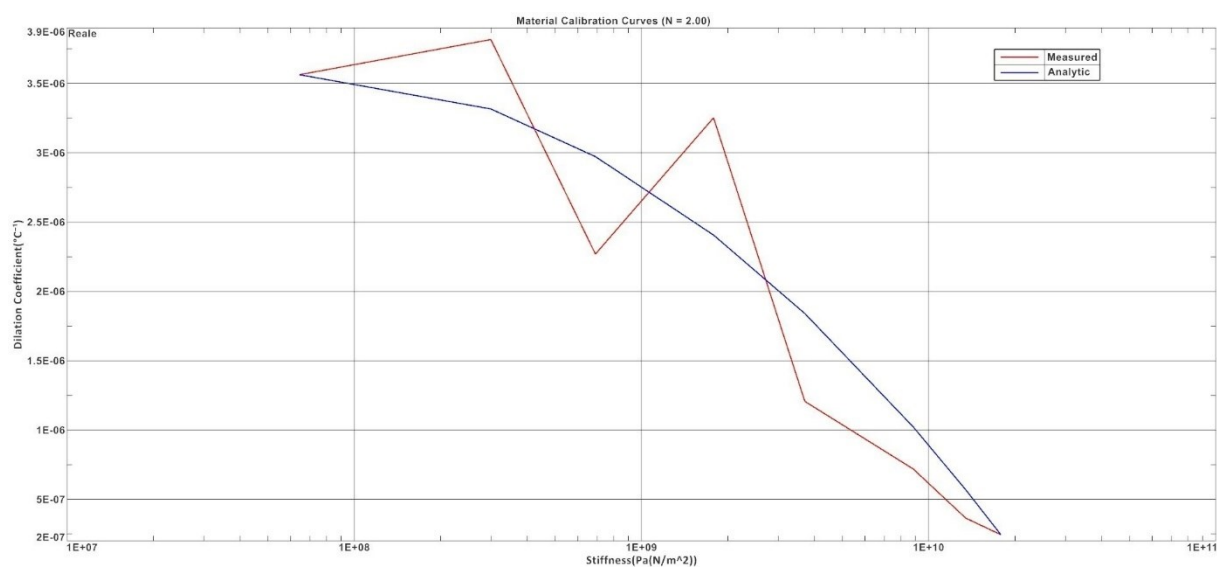


Figura 3.33. Curva di calibrazione caso di studio (EOS M290)

11. Come ultimo step, si seleziona “Create new parameter set” per creare un nuovo set di parametri da applicare poi ad ogni corpo o supporto da stampare, specificando in “Parameter set name” il nome con cui si vuole salvare il processo di calibrazione appena terminato. Nel caso di studio, è stato inserito, per un riconoscimento più immediato, il nome della stampante utilizzata (EOS M 290).

I risultati ottenuti dalla calibrazione vengono trascritti nel file XML denominato “parameters”, descritto nel paragrafo 3.1.1. In figura 3.34 possiamo trovare un esempio di parametri trascritti nel file XML.

```
<PARAMETER_SET name="Inconel 718, Calibration 1.2, 40 micron, EOS M 290">
  <PrintJob name="Typical Inconel 718 (40 micron)" />
  <OVERHEATING CHARACTERISTIC_LENGTH="-2.7000" CHARACTERISTIC_LENGTH_UNIT="mm" CHARACTERISTIC_TEMPERATURE="690.1500" CHARACTERISTIC_TEMPERATURE_UNIT="K" CHARACTERISTIC_TIME="0.0041"
  CHARACTERISTIC_TIME_UNIT="sec" SCAN_SPEED="1.0000" SCAN_SPEED_UNIT="m/sec" />
  <STIFFNESS AMAX="3.5833e-06" AMAX_UNIT="1/dC" AMIN="2.4499e-07" AMIN_UNIT="1/dC" CMAX="1.8806e+10" CMAX_UNIT="Pa(N/m^2)" CMIN="6.5347e+07" CMIN_UNIT="Pa(N/m^2)" N="2.0000" />
  <PROPERTIES HATCH_DISTANCE="100.0000" HATCH_DISTANCE_UNIT="micron" HATCH_PATTERN_LENGTH="5.0000" HATCH_PATTERN_LENGTH_UNIT="mm" LAYER_THICKNESS="40.0000" LAYER_THICKNESS_UNIT="micron" POWER="290.0000"
  POWER_UNIT="W" REFLECTIVITY_OF_MELT="0.6600" SELECTED_LASER="LASER_1" SKYWRITING_TIME="0.0008" SKYWRITING_TIME_UNIT="sec" />
</PARAMETER_SET>
<PARAMETER_SET name="Inconel 718, Calibration 1.2, 40 micron, Renishaw AM 250">
  <PrintJob name="Typical Inconel 718 (40 micron)" />
  <OVERHEATING CHARACTERISTIC_LENGTH="-2.7000" CHARACTERISTIC_LENGTH_UNIT="mm" CHARACTERISTIC_TEMPERATURE="690.1500" CHARACTERISTIC_TEMPERATURE_UNIT="K" CHARACTERISTIC_TIME="0.0041"
  CHARACTERISTIC_TIME_UNIT="sec" SCAN_SPEED="1.0000" SCAN_SPEED_UNIT="m/sec" />
  <PROPERTIES HATCH_DISTANCE="100.0000" HATCH_DISTANCE_UNIT="micron" HATCH_PATTERN_LENGTH="5.0000" HATCH_PATTERN_LENGTH_UNIT="mm" LAYER_THICKNESS="40.0000" LAYER_THICKNESS_UNIT="micron" POWER="290.0000"
  POWER_UNIT="W" REFLECTIVITY_OF_MELT="0.6600" SELECTED_LASER="LASER_1" SKYWRITING_TIME="0.0008" SKYWRITING_TIME_UNIT="sec" />
  <STIFFNESS AMAX="6.3634e-06" AMAX_UNIT="1/dC" AMIN="2.7420e-06" AMIN_UNIT="1/dC" CMAX="1.8338e+10" CMAX_UNIT="Pa(N/m^2)" CMIN="6.5165e+07" CMIN_UNIT="Pa(N/m^2)" N="1.2000" />
</PARAMETER_SET>
<PARAMETER_SET name="Inconel 718, Calibration 1.2, 60 micron, Renishaw AM 250, 4 laser">
  <PrintJob name="Typical Inconel 718 (40 micron)" />
  <OVERHEATING CHARACTERISTIC_LENGTH="-2.7000" CHARACTERISTIC_LENGTH_UNIT="mm" CHARACTERISTIC_TEMPERATURE="690.1500" CHARACTERISTIC_TEMPERATURE_UNIT="K" CHARACTERISTIC_TIME="0.0041"
  CHARACTERISTIC_TIME_UNIT="sec" SCAN_SPEED="1.0000" SCAN_SPEED_UNIT="m/sec" />
  <PROPERTIES HATCH_DISTANCE="100.0000" HATCH_DISTANCE_UNIT="micron" HATCH_PATTERN_LENGTH="5.0000" HATCH_PATTERN_LENGTH_UNIT="mm" LAYER_THICKNESS="40.0000" LAYER_THICKNESS_UNIT="micron" POWER="290.0000"
  POWER_UNIT="W" REFLECTIVITY_OF_MELT="0.6600" SELECTED_LASER="LASER_1" SKYWRITING_TIME="0.0008" SKYWRITING_TIME_UNIT="sec" />
  <STIFFNESS AMAX="6.4837e-06" AMAX_UNIT="1/dC" AMIN="2.7139e-06" AMIN_UNIT="1/dC" CMAX="1.8370e+10" CMAX_UNIT="Pa(N/m^2)" CMIN="6.5045e+07" CMIN_UNIT="Pa(N/m^2)" N="1.2000" />
</PARAMETER_SET>
</PARAMETER_SETS>
```

Figura 3.34. File XML parametri di processo

3.3 Calibrazione dei parametri di stampa in NX

I risultati ottenuti, grazie le operazioni di omogeneizzazione delle celle unitarie e di calibrazione dei provini, vengono introdotti all'interno della simulazione nella sezione "Parametri processo/materiale". Ogni calibrazione è associata allo specifico print job utilizzato durante la fase di simulazione dei provini. Di seguito gli step seguiti nel caso di studio trattato:

1. Aperto il file .part del condotto rettificato nel piatto di stampa e posta la superficie inferiore del vano ad una altezza pari a 15 mm dal piatto, si creano i supporti all'interno del vano e dalla superficie inferiore al piatto di stampa. Entrambi i supporti sono stati creati come "block support". Nella sezione "Simulazione processo" si seleziona la voce "Genera supporti di simulazione", andando quindi a creare i modelli di simulazione di entrambi i supporti. A questo punto si seleziona "Avvia simulazione processo" per aprire il modulo "Pre/post" e, nel gruppo "Additive manufacturing", settare tutti i parametri di simulazione;
2. In "Impostazioni globali" si è scelto di avviare una simulazione termica e meccanica, senza però simulare il volume della polvere (per restringere i tempi di simulazione);
3. In "Parametri processo/materiale" si è selezionato "Typical Inconel 718 (40 micron)". Passando poi alla sezione "Per specimen properties", sotto la voce "Process parameters per body", si settano per ogni corpo i parametri di processo. Per ogni corpo, nel menù a tendina, si possono trovare i parametri creati con la calibrazione. Nel caso di studio, per tutti i corpi, è stato settato il set di parametri ottenuti precedentemente per la EOS M290. In figura 3.35 la schermata corrispondente.

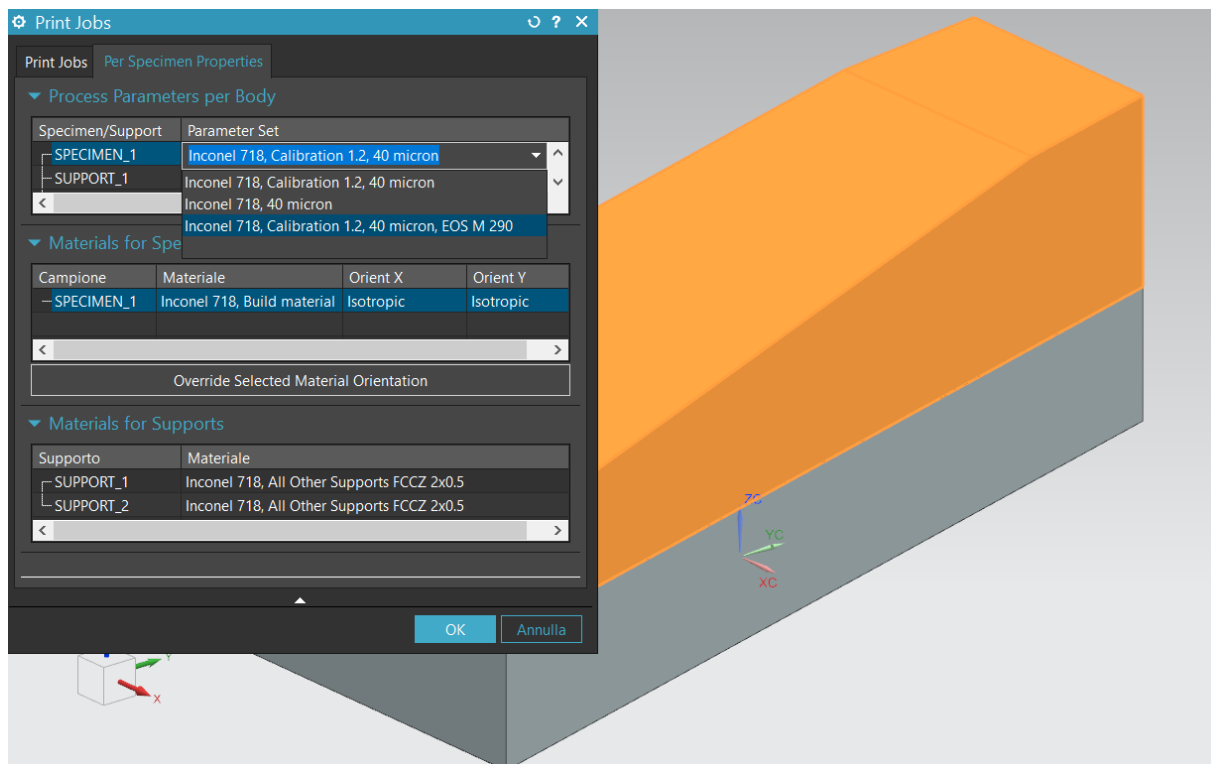


Figura 3.35. Schermata scelta parameter set

Sotto la voce “Materials for supports”, invece, è possibile scegliere di che tipo di materiale costituire il supporto interessato. Nel menù a tendina, per ogni supporto, si trova la cella omogeneizzata in precedenza che ad esso si vuole applicare;

4. Settati i parametri di processo, si procede con la scelta dello slicing termico e meccanico. Nel caso di studio, si è scelto 25 come “Number of slices” (slicing termico) ed 1 mm come “Slice thickness” (slicing meccanico);
5. Nella sezione “Mesh tetr. 3D” vanno settati i parametri di creazione della mesh. Nel caso di studio, si sono scelti gli stessi parametri di meshatura sia per la mesh termica che per la mesh meccanica. Di seguito, in figura 3.36, si possono trovare i parametri di meshatura utilizzati nel caso di studio;

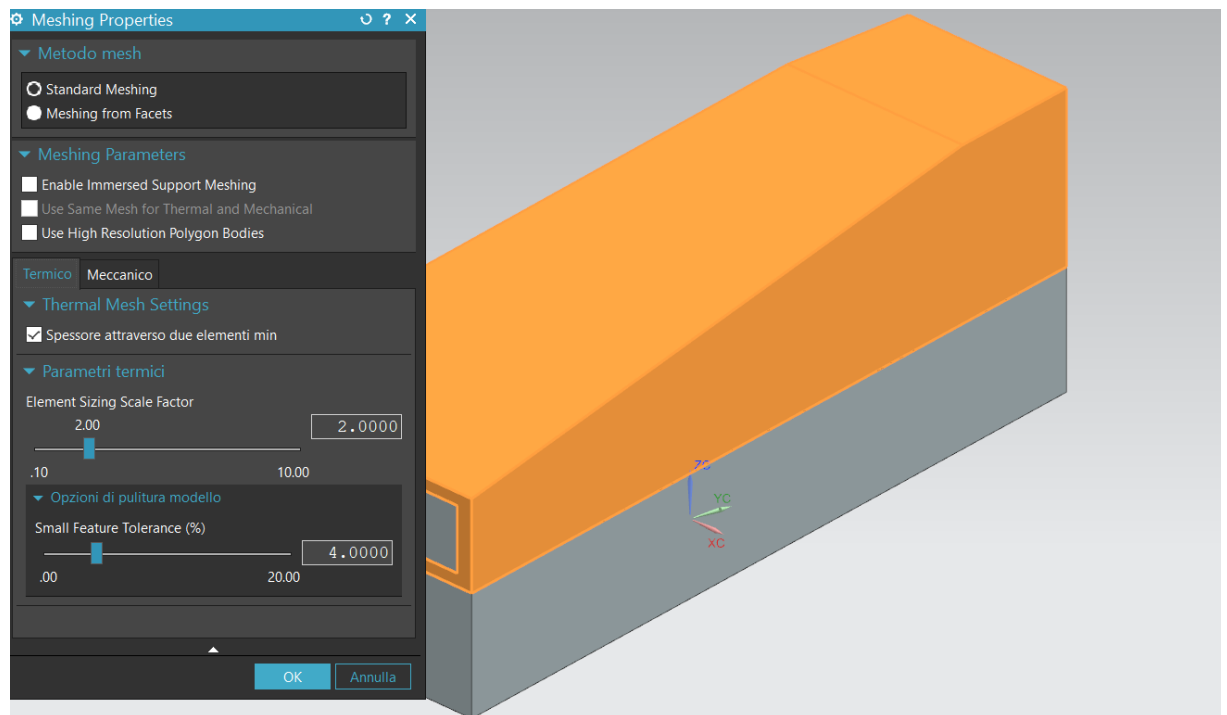


Figura 3.36. Parametri meshatura caso di studio

6. Nella sezione “Opzioni di calcolo”, nel caso di studio, si è lavorato con i parametri presenti già di default tra le varie opzioni. A questo punto si dà avvio alla simulazione.

4 Risultati e discussione

Affrontate, nel capitolo e nei paragrafi precedenti, tutte le fasi del procedimento di omogeneizzazione dei supporti e di calibrazione di un determinato processo di stampa, al fine di garantire una meticolosa descrizione degli stessi all'interno del software, in questo capitolo verranno presentati i risultati corrispondenti ad ogni variazione apportata durante le simulazioni.

Come detto nel capitolo precedente, possedendo una Renishaw AM250, è stato possibile effettuare una calibrazione della stampa dell'Inconel 718 con la stessa, grazie alla stampa dei provini. I parametri di processo utilizzati durante la stampa ed inoltre, come precedentemente detto, settati anche nella simulazione, sono:

- Recoating time (tempo necessario al recoater per applicare un nuovo strato di polvere) - 10 s;
- Number of lasers (numero di laser utilizzati) - 4;
- Laser power (potenza del laser) - 285 W;
- Scan speed (velocità di scansione del laser) - 0,960 m/s;
- Layer thickness (spessore dello strato stampato) - 60 μm ;
- Hatch distance (distanza tra due bande del laser) - 110 μm .

Vista la necessità di avere un diverso numero di laser da quello settato nel "Typical Inconel 718 (40 micron)", al quale è già associata una calibrazione (EOS M290) con cui il nuovo numero di laser non sarebbe compatibile, si è creato un nuovo print job, chiamandolo "Inconel 718, 60 micron". I parametri utilizzati di default sono gli stessi del "Typical Inconel 718 (40 micron)", con delle differenze in corrispondenza di quelli che caratterizzano i due print job. Ad esso poi è stato associato un nuovo parameter set, chiamato "Inconel 718, calibration 1.2, 60 micron", per permettere la simulazione dei provini (fatta scegliendo proprio questo parameter set), creato sfruttando le caratteristiche del "Inconel 718, calibration 1.2, 40 micron" e variandole laddove ve ne fosse la necessità.

Le dimensioni dei provini ottenute dalle 3 misurazioni effettuate su di essi (utilizzando anche in questo caso Rhinoceros) sono descritte nelle tabelle seguenti. La prova 1 è stata eseguita nella zona centrale dei provini, la prova 2 nella zona anteriore e la prova 3 nella zona posteriore. In figura 4.1 i baricentri ottenuti in corrispondenza delle zone considerate.

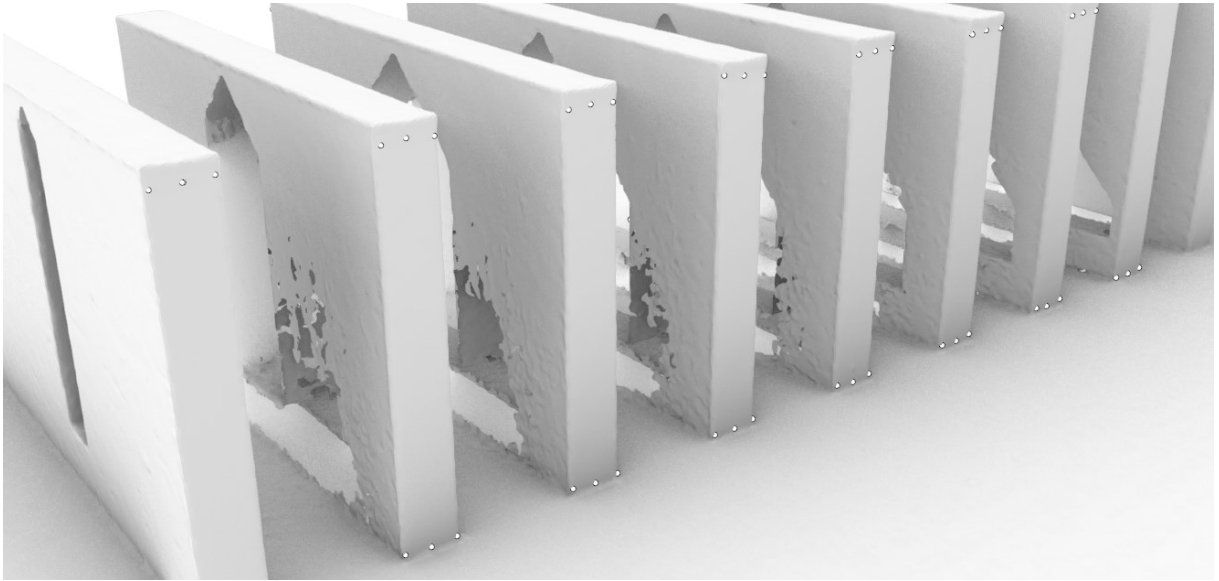


Figura 4.1. Zone considerate per le misurazioni dei provini

In tabella 4.1 troviamo i valori misurati sulla linea di restringimento, in tabella 4.2 i valori misurati della larghezza del fondo ed infine, in tabella 4.3, i valori medi ottenuti.

Tabella 4.1. Risultati misurazioni waist (Renishaw AM250)

Bridge leg width	Prova 1	Prova 2	Prova 3
23 mm	49,504	49,532	49,555
20 mm	49,504	49,456	49,479
17 mm	49,481	49,408	49,488
12 mm	49,421	49,365	49,318
9 mm	49,361	49,333	49,395
6 mm	49,325	49,325	49,326
4 mm	49,29	49,28	49,314
2 mm	49,32	49,3	49,23

Tabella 4.2. Risultati misurazioni root (Renishaw AM250)

Bridge leg width	Prova 1	Prova 2	Prova 3
23 mm	49,667	49,689	49,675
20 mm	49,638	49,546	49,595
17 mm	49,649	49,614	49,572
12 mm	49,664	49,547	49,595
9 mm	49,664	49,619	49,581
6 mm	49,596	49,58	49,651
4 mm	49,644	49,603	49,615
2 mm	49,625	49,593	49,614

Tabella 4.3. Valori finali (Renishaw AM250)

Bridge leg width	Root	Waist	Differenza/2
23 mm	49,677	49,53033	0,073
20 mm	49,593	49,47967	0,057
17 mm	49,61167	49,459	0,076
12 mm	49,602	49,368	0,117
9 mm	49,62133	49,363	0,129
6 mm	49,609	49,32533	0,142
4 mm	49,62067	49,29467	0,163
2 mm	49,61067	49,28333	0,164

Procedendo come descritto nel capitolo precedente, è stato creato il set di parametri calibrati da utilizzare in una simulazione di stampa con Renishaw AM250 (utilizzando i parametri descritti in precedenza). In figura 4.2 la curva di calibrazione ottenuta.

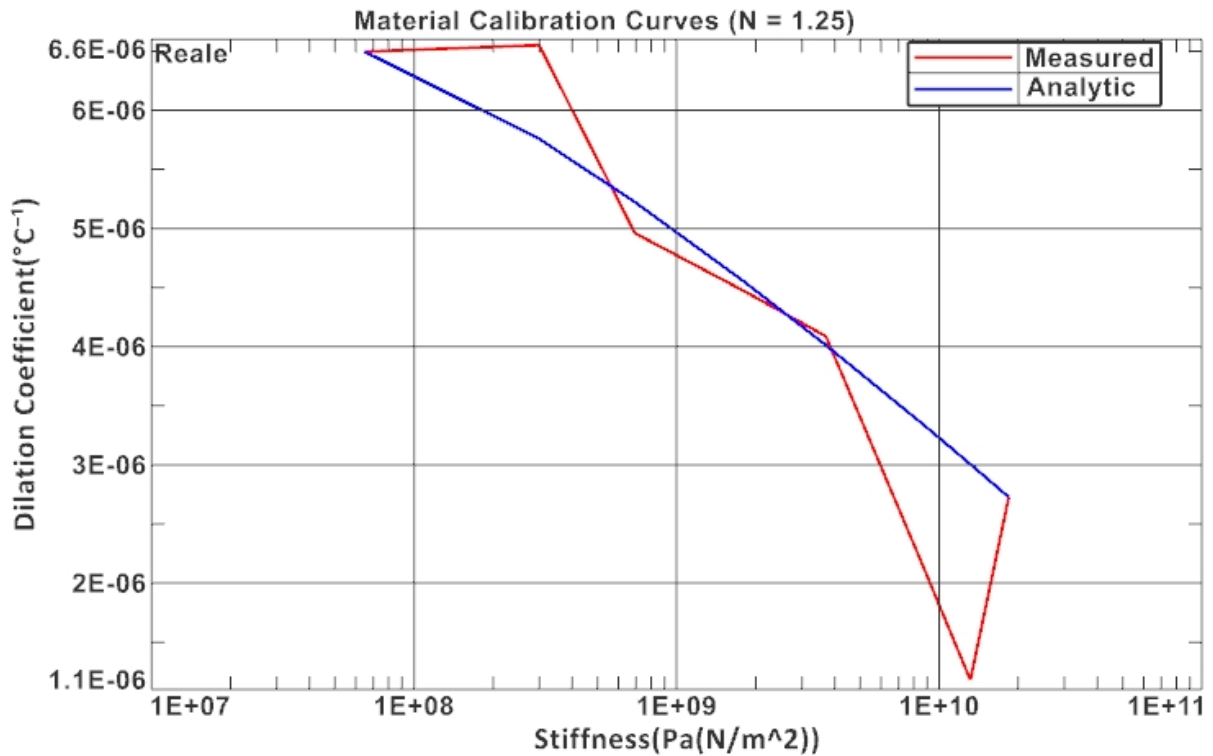


Figura 4.2. Curva di calibrazione (Renishaw AM250)

A questo punto si è proceduto con le simulazioni del condotto rettificato.

Per valutare la sensibilità di NX alla variazione di celle unitarie per i supporti di tipo blocco, sono state svolte 3 simulazioni con il materiale non calibrato, utilizzando, per la superficie superiore all'interno del condotto, celle di tipo FCCZ 2x0.5, FCCZ 3x0.5 e FCCZ 5x0.5, mentre, per il supporto della superficie della base, celle FCCZ 2x0.5.

Le misurazioni sono state prese sulle superfici periferiche del condotto, dove si verificano le distorsioni maggiori. Sono state evidenziate le distorsioni totali sul bordo superiore, la componente lungo Z (direzione di stampa) delle distorsioni sul bordo superiore ed infine le distorsioni della superficie inferiore all'interno del condotto. Inoltre è stato considerato il rischio di eventuali collisioni con il recoater durante la stampa, riportando i layer dove esse potrebbero verificarsi ed evidenziando i layer dove potrebbe generarsi il valore massimo ed il valore minimo di dislocamento. In figura 4.3 le posizioni dove sono state effettuate le misurazioni.

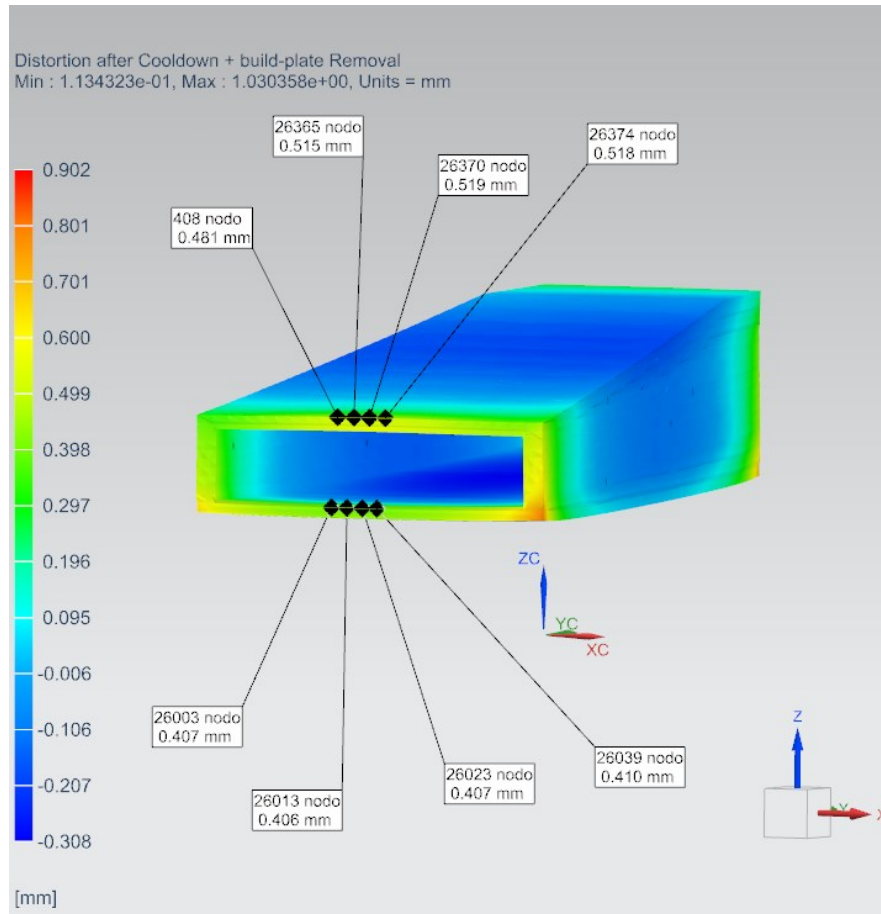


Figura 4.3. Misurazioni su superficie superiore bordo e superficie inferiore all'interno del condotto

Da queste simulazioni è stata riscontrata un'incongruenza tra i risultati ottenuti ed i risultati attesi. Dalla stampa del condotto reale, infatti, era stato evidenziato come, una variazione di cella elementare, come può essere quello da FCCZ 2x0.5 a FCCZ 3x0.5, causasse un aumento significativo delle distorsioni. Dalla tabella 4.4, dove sono descritti i risultati ottenuti, evidenziando anche le variazioni apportate nelle simulazioni, si può evincere come questa variazione significativa non si verifichi.

Tabella 4.4. Risultati simulazioni materiale non calibrato condotto rettificato

Valori	Prova 1	Prova 2	Prova 3
Corpo simulazione	Vano rettificato	Vano rettificato	Vano rettificato
Stampante	Parts and supports	Parts and supports	Parts and supports
Supporto interno vano	FCCZ 2x0.5	FCCZ 3x0.5	FCCZ 5x0.5
Supporto base	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5
Calibrazione	no	no	no
Genera supporti di simulazione	si	si	si
Slice termico	25	25	25
Slice meccanico	1	1	1
Tipo mesh	Standard	Standard	Standard
Element sizing scale factor	2	2	2
Small feature tolerance	4	4	4
Tempo mesh	20 s	20 s	20 s
Tempo simulazione	95 m	95 m	80 m
Distorsione totale bordo [mm]	0,676	0,711	0,536
Distorsione lungo Z bordo [mm]	0,552	0,593	0,437
Distorsione lungo Z interno vano [mm]	0,411	0,342	0,218
Risultato termico	217,33°C	247,28°C	313,05°C
Collisioni recoater	layer 16 - 19, 26, 32, 33	layer 16 - 19, 26, 32, 33	/
Valore max - layer	113,33 micron - layer 16	113,33 micron - layer 16	/
Valore min - layer	62,51 micron - layer 32	69,11 micron - layer 33	/

Si è proceduto quindi con altre simulazioni, utilizzando stavolta il materiale calibrato in precedenza, per poter valutare la calibrazione, cercando di capire se potesse incidere in maniera positiva sulla sensibilità del software a queste variazioni. Di seguito, in tabella 4.5, i risultati ottenuti.

Tabella 4.5. Risultati simulazioni materiale calibrato condotto rettificato

Valori	Prova 1	Prova 2	Prova 3
Corpo simulazione	Vano rettificato	Vano rettificato	Vano rettificato
Stampante	Parts and supports	Parts and supports	Parts and supports
Supporto interno vano	FCCZ 2x0.5	FCCZ 3x0.5	FCCZ 5x0.5
Supporto base	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5
Calibrazione	si (Renishaw AM 250)	si (Renishaw AM 250)	si (Renishaw AM 250)
Genera supporti di simulazione	si	si	si
Slice termico	25	25	25
Slice meccanico	1	1	1
Tipo mesh	Standard	Standard	Standard
Element sizing scale factor	2	2	2
Small feature tolerance	4	4	4
Tempo mesh	20 s	20 s	20 s
Tempo simulazione	95 m	95 m	95 m
Distorsione totale bordo [mm]	0,611	0,65	0,578
Distorsione lungo Z bordo [mm]	0,509	0,543	0,488
Distorsione lungo Z interno vano [mm]	0,407	0,402	0,334
Risultato termico	217,33°C	247,28°C	313,05°C
Collisioni recoater	layer 16 - 19, 26	layer 16 - 19, 26, 32	layer 16
Valore max - layer	88,60 micron - layer 16	88,60 micron - layer 16	66,31 micron - layer 16
Valore min - layer	63,66 micron - layer 19	61,65 micron - layer 32	/

Per evidenziare le differenze tra l'utilizzo del materiale calibrato e del materiale non calibrato, sono state calcolate le variazioni percentuali dei valori delle deformazioni ottenute in entrambi i casi, evidenziando un andamento più accettabile nel materiale calibrato, sì con variazioni negative, che si discostano comunque dai risultati attesi, ma di entità inferiore rispetto quelle del materiale non calibrato. In tabella 4.6 le variazioni nel materiale calibrato, in tabella 4.7 le variazioni del materiale non calibrato.

Tabella 4.6. Variazioni percentuali materiale calibrato condotto rettificato

Variazione %	Da 2x0.5 a 3x0.5	Da 3x0.5 a 5x0.5	Da 2x0.5 a 5x0.5
Distorsione totale bordo	6	-11	-5
Distorsione lungo Z bordo	7	-10	-4
Distorsione lungo Z interno vano	-1	-17	-18

Tabella 4.7. Variazioni percentuali materiale non calibrato condotto rettificato

Variazione %	Da 2x0.5 a 3x0.5	Da 3x0.5 a 5x0.5	Da 2x0.5 a 5x0.5
Distorsione totale bordo	5	-25	-21
Distorsione lungo Z bordo	7	-26	-21
Distorsione lungo Z interno vano	-17	-36	-47

Avendo avuto la possibilità di misurare le deformazioni del condotto reale una volta stampato, si è deciso di eseguire altre simulazioni, in questo caso del modello del condotto reale, per poter effettuare un confronto diretto fra i risultati ottenuti dalle simulazioni e quelli ottenuti nella realtà. In figura 4.4 una rappresentazione del condotto reale utilizzato.



Figura 4.4. Modello condotto reale

Le misurazioni sono state prese nelle stesse zone considerate per il condotto rettificato, essendo, anche per il condotto reale, le zone più critiche dal punto di vista delle entità delle deformazioni.

Anche in questo caso si è optato per un confronto tra materiale calibrato e materiale non calibrato, al fine di valutare le variazioni percentuali delle deformazioni ottenute con entrambi. In tabella 4.8 troviamo i risultati delle simulazioni con materiale non calibrato, mentre in tabella 4.9 quelli ottenuti dal materiale calibrato.

Tabella 4.8. Risultati simulazioni materiale non calibrato vano reale

Valori	Prova 1	Prova 2	Prova 3
Corpo simulazione	Vano reale	Vano reale	Vano reale
Stampante	Parts and supports	Parts and supports	Parts and supports
Supporto interno vano	FCCZ 2x0.5	FCCZ 3x0.5	FCCZ 5x0.5
Supporto base	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5
Calibrazione	no	no	no
Genera supporti di simulazione	si	si	si
Slice termico	25	25	25
Slice meccanico	1	1	1
Tipo mesh	Standard	Standard	Standard
Element sizing scale factor	2	2	2
Small feature tollerance	4	4	4
Tempo mesh	20 s	20 s	20 s
Tempo simulazione	95 m	95 m	80 m
Distorsione totale bordo [mm]	0,615	0,679	0,723
Distorsione lungo Z bordo [mm]	0,46	0,494	0,516
Distorsione lungo Z interno vano [mm]	0,358	0,356	0,351
Risultato termico	488,86°C	528,10°C	553,79°C
Collisioni recoater	layer 20	layer 20	layer 20
Valore max - layer	70,96 micron - layer 20	100,99 micron - layer 20	118,39 micron - layer 20
Valore min - layer	/	/	/

Tabella 4.9. Risultati simulazioni materiale calibrato vano reale

Valori	Prova 1	Prova 2	Prova 3
Corpo simulazione	Vano reale	Vano reale	Vano reale
Stampante	Parts and supports	Parts and supports	Parts and supports
Supporto interno vano	FCCZ 2x0.5	FCCZ 3x0.5	FCCZ 5x0.5
Supporto base	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5
Calibrazione	si (Renishaw AM 250)	si (Renishaw AM 250)	si (Renishaw AM 250)
Genera supporti di simulazione	si	si	si
Slice termico	25	25	25
Slice meccanico	1	1	1
Tipo mesh	Standard	Standard	Standard
Element sizing scale factor	2	2	2
Small feature tollerance	4	4	4
Tempo mesh	20 s	20 s	20 s
Tempo simulazione	45 m	45 m	45 m
Distorsione totale bordo [mm]	0,625	0,651	0,676
Distorsione lungo Z bordo [mm]	0,452	0,462	0,47
Distorsione lungo Z interno vano [mm]	0,424	0,424	0,421
Risultato termico	488,64°C	528,31°C	553,77°C
Collisioni recoater	layer 10, 11, 20	layer 10, 11, 20	layer 10, 11, 20
Valore max - layer	111,48 micron - layer 10	111,42 micron - layer 10	111,35 micron - layer 10
Valore min - layer	76,20 micron - layer 11	76,22 micron - layer 11	76,19 micron - layer 11

I valori delle variazioni percentuali verificatesi nel caso del materiale calibrato e del materiale non calibrato sono riportati rispettivamente nella tabella 4.10 e 4.11 seguenti.

Tabella 4.10. Variazioni percentuali materiale calibrato condotto reale

Variazione %	Da 2x0.5 a 3x0.5	Da 3x0.5 a 5x0.5	Da 2x0.5 a 5x0.5
Distorsione totale bordo	4	4	8
Distorsione lungo Z bordo	2	2	4
Distorsione lungo Z interno vano	0	-1	-1

Tabella 4.11. Variazioni percentuali materiale non calibrato condotto reale

Variazione %	Da 2x0.5 a 3x0.5	Da 3x0.5 a 5x0.5	Da 2x0.5 a 5x0.5
Distorsione totale bordo	10	6	18
Distorsione lungo Z bordo	7	4	12
Distorsione lungo Z interno vano	-1	-1	-2

Le simulazioni con il condotto reale presentano risultati in parte contrastanti con quelle che sono le considerazioni fatte per le simulazioni con il condotto rettificato, in quanto, come si può notare dalle tabelle delle variazioni percentuali, l'andamento delle distorsioni, al variare della cella, è omogeneo nel materiale calibrato come nel materiale non calibrato, e riportando, come nelle simulazioni precedenti, entità di deformazioni inferiori nel materiale calibrato. In figura 4.5 è riportata la deviazione dei risultati ottenuti dalle simulazioni dalle deformazioni reali del modello del componente centrifugo.

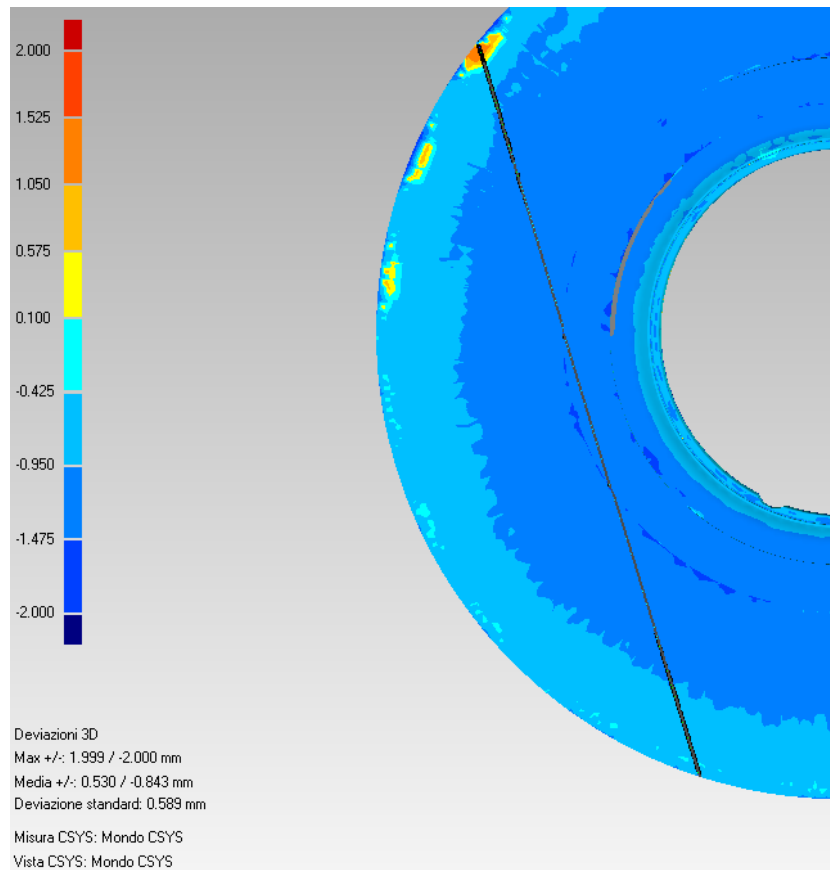


Figura 4.5. Deviazioni risultati simulazioni – deformazioni reali

Successivamente, si è proceduto con uno studio di robustezza, incentrato sulla tipologia di metodo utilizzato per effettuare le misurazioni sui provini da inserire nel processo di calibrazione in NX.

Sono state effettuate altre misurazioni sui provini stampati, questa volta utilizzando un software dedicato a tale operazione, ottenendo i valori descritti in tabella 4.12.

Tabella 4.12. Valori seconda misurazione

Bridge leg width	Root	Waist	Differenza/2
23 mm	49,635	49,581	0,027
20 mm	49,647	49,536	0,055
17 mm	49,625	49,52	0,052
12 mm	49,654	49,489	0,083
9 mm	49,68	49,431	0,125
6 mm	49,654	49,407	0,124
4 mm	49,696	49,367	0,165
2 mm	49,66	49,383	0,138

Si è poi calcolata la variazione percentuale tra i valori ottenuti nelle due misurazioni, i cui risultati sono descritti in tabella 4.13.

Tabella 4.13. Variazioni percentuali tra le due misurazioni

Bridge leg width	Differenza prima misurazione	Differenza seconda misurazione	Variazione %
23 mm	0,073	0,027	-63
20 mm	0,057	0,055	-4
17 mm	0,076	0,052	-32
12 mm	0,117	0,083	-29
9 mm	0,129	0,125	-3
6 mm	0,142	0,124	-13
4 mm	0,163	0,165	1
2 mm	0,164	0,138	-16

A questo punto, utilizzando la calibrazione ottenuta inserendo questi secondi valori, sono state effettuate altre due simulazioni, per permettere un confronto tra i risultati delle due differenti calibrazioni. La seconda calibrazione e le simulazioni ad essa associate sono state indicate con (#2). I parametri utilizzati e i risultati ottenuti si possono osservare in tabella 4.14.

Tabella 4.14. Confronto risultati diverse calibrazioni

Valori	Prova 1	Prova 2	Prova 1 (#2)	Prova 2 (#2)
Corpo simulazione	Vano rettificato	Vano rettificato	Vano rettificato	Vano rettificato
Stampante	Parts and supports	Parts and supports	Parts and supports	Parts and supports
Supporto interno vano	FCCZ 2x0.5	FCCZ 3x0.5	FCCZ 2x0.5	FCCZ 3x0.5
Supporto base	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5	FCCZ 2x0.5
Calibrazione	si (Renishaw AM 250)	si (Renishaw AM 250)	si (Renishaw AM 250 #2)	si (Renishaw AM 250 #2)
Genera supporti di simulazione	si	si	si	si
Slice termico	25	25	25	25
Slice meccanico	1	1	1	1
Tipo mesh	Standard	Standard	Standard	Standard
Element sizing scale factor	2	2	2	2
Small feature tolerance	4	4	4	4
Tempo mesh	20 s	20 s	20 s	20 s
Tempo simulazione	95 m	95 m	90 m	90 m
Distorsione totale bordo [mm]	0,611	0,65	0,586	0,59
Distorsione lungo Z bordo [mm]	0,509	0,543	0,484	0,499
Distorsione lungo Z interno vano [mm]	0,407	0,402	0,405	0,398
Risultato termico	217,33°C	247,28°C	217,33°C	247,28°C
Collisioni recoater	layer 16 - 19, 26	layer 16 - 19, 26, 32	layer 16 - 18	layer 16 - 18
Valore max - layer	88,60 micron - layer 16	88,60 micron - layer 16	72,73 micron - layer 16	72,73 micron - layer 16
Valore min - layer	63,66 micron - layer 19	61,65 micron - layer 32	63,49 micron - layer 18	63,49 micron - layer 18

Per valutare tali differenze sono state calcolate le variazioni percentuali nel confronto tra i valori della prova 1 con la prova 1 (#2) e i valori della prova 2 con la prova 2 (#2). In tabella 4.15 i risultati del confronto.

Tabella 4.15. Confronto variazioni percentuali

Variazione %	Prova 1 - Prova 1 (#2)	Prova 2 - Prova 2 (#2)
Distorsione totale bordo	-4	-9
Distorsione lungo Z bordo	-5	-8
Distorsione lungo Z interno vano	0	-1

Come si può notare dalle tabelle, nonostante le oscillazioni tra circa il -60% e il +1% delle variazioni percentuali che si verificano tra i valori ottenuti dalle due diverse misurazioni effettuate, le variazioni effettive che si verificano nei risultati delle simulazioni sono decisamente più contenute, non superando la soglia del -9%.

5 Conclusioni

Il caso di studio si è prefissato come obiettivo la valutazione della calibrazione del software NX, tramite le operazioni di omogeneizzazione dei supporti e di calibrazione del processo di stampa, per capire se essa potesse avere un impatto positivo e significativo sulla sensibilità di NX alla variazione di determinati parametri nelle simulazioni.

Potendo fare affidamento sui risultati ottenuti dalla stampa del componente centrifugo reale e del condotto singolo reale, le valutazioni del caso sono state fatte considerando principalmente le simulazioni elaborate utilizzando i modelli ad essi corrispondenti.

È risultato immediatamente evidente l'importante sottostima delle deformazioni nelle zone interessate che sono generate dalla simulazione, rispetto alle deformazioni ottenute nella realtà sulla corona esterna della girante. Queste ultime, infatti, raggiungono, in alcuni punti, anche valori di 1 mm, mentre nelle simulazioni, con e senza parametri calibrati, i valori massimi verificatisi sono nell'intorno dei 0,6 mm. Questa sottostima viene evidenziata maggiormente nel materiale calibrato.

La calibrazione, come è stato possibile notare dalle tabelle 4.6, 4.7, 4.10 e 4.11, potrebbe però aver influito sul trend della variazione delle deformazioni al variare della cella unitaria utilizzata per i supporti e, per precisione, sembra aver apportato una maggiore coerenza a tale trend. Difatti, nel condotto rettificato si verificano variazioni negative, ma di entità inferiore rispetto quelle ottenute con il materiale non calibrato. Al contempo, nel condotto reale si ottengono variazioni positive, di entità inferiore, anche in questo caso con un andamento ben definito, ma, a differenza del condotto rettificato, anche il materiale non calibrato porta a risultati accettabili.

È vero, quindi, che la stabilizzazione del trend delle variazioni delle distorsioni può far ben sperare riguardo l'impatto positivo di queste operazioni all'interno di NX. D'altra parte, però, questa sottostima delle stesse e l'entità molto basse di tali

variazioni non permette di raggiungere dei risultati totalmente affidabili e confrontabili con la realtà.

Per quanto concerne il processo di stampa del componente centrifugo, è risultata necessaria l'assunzione di supporti di tipo blocco all'interno dei condotti, per non avere problemi nella fase di eliminazione degli stessi, risultando più facilmente estraibili rispetto a supporti molto più massivi, come i supporti di tipo volume.

È pur vero che i supporti di tipo blocco non abbiano garantito una stabilità ed una resistenza alla deformazione adeguate, in quanto si è evidenziato, post-raffreddamento, un importante inarcamento (circa 1,2 mm) delle zone periferiche dei condotti lungo tutto il perimetro del componente centrifugo, dovuto all'entità delle tensioni residue generate.

Al fine di limitare questo effetto, è stato inserito in corrispondenza della superficie inferiore del condotto, lungo il perimetro del componente centrifugo, un supporto di tipo volume con sezione circolare cava (all'interno, per supportare tutta la rimanente superficie della base, è stato usato un supporto blocco di tipo FCCZ 2x0.5, risultato conforme per la zona considerata), al fine di garantire una maggiore resistenza al modello e scaricare parte delle tensioni residue. In figura 5.1 si può notare la posizione del supporto di tipo volume lungo la corona esterna del componente.



Figura 5.1. Componente centrifugo con supporti

Un altro scenario che è stato preso in considerazione per poter aggirare questo problema, mantenendo allo stesso tempo invariata la facilità di rimozione di eventuali supporti e modifiche del modello del componente centrifugo, è stato l'introduzione di

un puntone di sezione rettangolare, inserito in corrispondenza dell'entrata di ogni condotto (non in maniera continuativa all'interno dello stesso), nella mezzeria, che potesse supportare ulteriormente la superficie superiore, in maniera ausiliaria ai supporti interni, e conferire una solidità strutturale importante a tale zona, interessata da queste deformazioni così marcate. Inoltre, essendo il puntone inserito nella zona più periferica dei condotti del componente centrifugo, sarebbe anche facilmente rimovibile, con appropriati processi meccanici. In figura 5.2 una vista dei condotti in presenza del puntone.



Figura 5.2. Puntone di supporto

Un'altra soluzione considerata è l'aggiunta di sovrametallo in corrispondenza della corona esterna del componente centrifugo, per permettere alle tensioni residue, e quindi alle deformazioni, di accumularsi su di esso, lasciando quindi la zona del modello originale scarica di tensioni, o comunque con la presenza di tensioni residue molto più contenute, rendendola utilizzabile, subito dopo aver rimosso il sovrametallo ed eseguito tutti i trattamenti meccanici e termici sul modello richiesti dal caso. Potrebbe causare un aumento del costo di stampa, dovendo utilizzare del materiale aggiuntivo a quello già necessario alla creazione del componente stesso, ma rimane una soluzione sicuramente da prendere in considerazione.

6

6 Bibliografia e sitografia

- [1] *Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche – Seconda edizione*, Filippo Gabrielli, Rosolino Ippolito, Fabrizio Micari, McGraw-Hill, 552;
- [2] *Additive Manufacturing Technologies – 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing – Second Edition*, Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, Springer, 510;
- [3] *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Olaf Diegel, Axel Nordin, Damien Motte, Springer, 236;
- [4] *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*, Li Yang, Keng Hsu, Brian Baughman, Donald Godfrey, Francisco Medina, Mamballykalathil Menon, Soeren Wiener, Springer, 172;
- [5] *Wohlers Report 2018 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry - Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., 344, 2018;
- [6] *Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing*, Amir M. Mirzendehtdel, Krishnan Suresh, Computer-Aided Design, 13, 2016;
- [7] *Integrated component-support topology optimization for additive manufacturing with post-machining*, Matthijs Langelaar, Rapid Prototyping Journal., 2018;
- [8] *Limitations of the inherent strain method in simulating powder bed fusion processes*, Matteo Bugatti, Quirico Semeraro, Additive Manufacturing, 2018;
- [9] *SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges*, Tobias Maconachie, Martin Leary, Bill Lozanovski, Xuezhe Zhang, Ma Qian, Omar Faruque, Milan Brandt, Materials & Design, 2019;
- [10] *Support Homogenization*, Simcenter 3D 2021.2 Series, <https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/289054037/doc/PL20201029134623742.am/html/xid1688849>;
- [11] *Homogenizing material properties for repetitive support structures*, Simcenter 3D 2021.2 Series, <https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/289054037/doc/PL20201029134623742.xid1914834/html/xid1665006>;

- [12] *Calibrate a material*, Simcenter 3D 2021.2 Series,
<https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/289054037/doc/PL20201029134623742.am/html/xid1900560>;
- [13] *Simcenter 3D Additive Manufacturing material calibration*, Simcenter 3D 2021.2 Series,
<https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/289054037/doc/PL20201029134623742.am/html/xid1857365>;

