POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Confronto e validazione di software di simulazione per il processo additivo di fusione laser su letto di polvere

Relatore Prof. Paolo Minetola

Correlatrici Prof.ssa Flaviana Calignano Dott.ssa Manuela Galati

> Studente Vito Stiuso 255505

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Se	omma	rio.		5
1	Intro	oduz	ione all'Additive Manufacturing (AM)	7
	1.1	Sto	oria ed evoluzione dell'AM	7
	1.1	.1	Campi di applicazione	10
	1.2	Pri	incipali tecniche di Fabbricazione Additiva	11
	1.2	2.1	Additive Manufacturing per polimeri	12
	1.2	2.2	Additive Manufacturing per metalli	14
	1.3	Pre	ogettazione per Additive Manufacturing	19
2	Intro	oduz	ione alla Reverse Engineering	23
	2.1	Sis	temi di acquisizione e rilevamento per RE	24
	2.1	.1	Digitalizzazione e scansione a contatto	25
	2.1	.2	Digitalizzazione e scansione senza contatto	26
	2.2	Pre	ocessi della Reverse Engineering	29
3	Simu	ılazi	one per processi di AM	33
	3.1	Dis	storsione e tensioni residue nei processi AM	34
	3.2	So	ftware di simulazione	37
	3.2	2.1	Altair Inspire	37
	3.2	2.2	Amphyon - Additive Works	41
	3.3	Pre	ove preliminari per confronto caratteristiche software	48
	3.3.1		Risultati prove preliminari Inspire Print3D	49
	3.3.2		Risultati prove preliminari Amphyon	51
	3.3	3.3	Confronto risultati di simulazione	56
4	Setu	реч	valutazione sensitività del software Amphyon	59
	4.1	Ca	librazione software di simulazione	59
	4.2	An	alisi sensitività di calcolo e simulazione	65
	4.2	2.1	Risultati analisi di sensitività	67

	4.3	Val	utazione della sensitività del software	76
5	Valid	lazio	ne della simulazione con SW Amphyon	77
	5.1	Pro	duzione del modello di riferimento	77
	5.2	Acc	quisizione geometria - Sistemi RE	80
	5.2	.1	Confronto scansione ottica e tomografia	84
	5.3	Cor	nfronto e validazione dei risultati	86
	5.3	.1	Stima e compensazione errore di simulazione	90
С	onclus	sioni		93
Ir	ndice d	lelle	Figure	95
Ir	ndice d	lelle	Tabelle	99
В	ibliogr	rafia		.01

Sommario

La fusione laser su letto di polvere è una tecnologia della fabbricazione additiva per materiali metallici che, nelle realtà industriali, sta progressivamente affiancando le tecniche convenzionali, garantendo la qualità richiesta dal mercato, soprattutto nei settori automotive, biomedicale e aerospaziale.

Le analisi virtuali per l'ottimizzazione topologica dei prodotti e la simulazione del processo sono di crescente interesse sia nell'ambito degli studi accademici che delle industrie. Garantire la fattibilità del processo e ottenere le massime prestazioni del prodotto alla prima sessione di stampa, senza scarti e costi indesiderati, è un obiettivo ancora difficile da perseguire.

Il presente elaborato ha lo scopo di validare la simulazione del processo di fusione laser attraverso la valutazione delle distorsioni dei pezzi prodotti. Per far ciò è stato necessario simulare il processo attraverso l'ausilio di applicativi software commerciali, confrontare i diversi risultati ottenuti dalle simulazioni, monitorare la produzione e validarla attraverso il confronto dei risultati.



Figure I: Esempio simulazione processo di fabbricazione additiva [9]

La fase iniziale dello studio si è incentrata sulla ricerca e l'analisi dei diversi software per la simulazione del processo di fusione laser su letto di polvere e soffermandosi anche sulle diverse funzionalità proposte, come: l'ottimizzazione del processo per la minimizzazione delle distorsioni e la compensazione della geometria finale.

La fase successiva si è concentrata sull'apprendimento dei diversi applicativi commerciali, la calibrazione delle simulazioni attraverso la determinazione delle distorsioni su provini prova e le simulazioni di processo su geometrie di riferimento.



Figure II: Collaborazioni

Un ulteriore caso di studio, necessario alla validazione dei risultati finali delle simulazioni, ha preso in considerazione la valutazione della sensitività di calcolo dei software, attraverso il confronto di simulazioni a parametri variabili.

A questo punto è stato necessario proseguire con un primo confronto virtuale dei risultati ottenuti: attraverso una standardizzazione del processo, ossia simulazioni a parametri fissi, si è potuta valutare la deformazione rispetto alla geometria nominale e confrontare, inoltre, lo scostamento delle deformazioni previste dai diversi software.

Dopo la produzione delle geometrie di riferimento si è potuti passare alla validazione dei risultati virtuali. Il processo di validazione mette a confronto le geometria reale acquisita mediante l'impiego della scansione 3D con il modello CAD deformato ottenuto dalle diverse simulazioni.

1 Introduzione all'Additive Manufacturing (AM)

Questo primo capitolo offre una introduzione al processo di fabbricazione additiva descrivendo in modo generale l'avvento della tecnologia, il suo sviluppo e il processo produttivo che vi sta alla base.

Si tratta di una tecnologia innovativa con la quale è possibile realizzare componenti definitivi partendo direttamente da un file CAD, senza l'uso di utensili e quindi metodi convenzionali; nata e concepita per la riduzione dei tempi di prototipazione, applicazione che ancora oggi riscuote maggior successo. Oltre alla riduzione dei tempi vi è anche una motivazione economica che ha spinto la crescita di questa tecnica innovativa: negli anni il numero di varianti di prodotto ha avuto un forte sviluppo causando la riduzione del tempo di permanenza nel mercato. La personalizzazione del prodotto ha quindi accelerato gli studi e la ricerca per il processo di prototipazione.

1.1 Storia ed evoluzione dell'AM

L'uso commerciale della tecnologia AM ebbe inizio alla fine degli anni '80, più precisamente nel 1987, con la denominazione di *Stereolitografia* (SL) e brevettata dal Prof. Hall e la 3D Systems già nell'anno 1984. Questo primo processo permette la solidificazione di sottili strati di polimeri fotosensibili attraverso l'uso di una luce ultravioletta (UV). In questi anni la nuova tecnologia sviluppata va anche sotto il nome di *Rapid Prototiping* e il suo uso commerciale è la produzione di primi prototipi per nuovi progetti aziendali.

Negli anni successivi furono molti i paesi che finanziarono le ricerche per questa nuova tecnologia produttiva e nacquero nuove aziende anche oltre oceano come la EOS in Germania.

Nel 1991 fu sviluppata dalla Stratasys la tecnologia *Fused deposition* modeling (FDM), tecnologia che sfrutta l'estrusione di filamenti termoplastici, applicata alla logica di produzione layer-by-layer. Nel corso degli anni lo sviluppo di nuove tecnologie produttive per l'AM avanzò il passo, sviluppando macchine che permettessero la produzione partendo da materiali di base come le polveri; la *Selective Laser Sintering* (SLS) è una tecnologia che sfrutta il processo fisico di sinterizzazione, esponendo le polveri ad alte temperature attraverso un fascio laser direzionale. [1]

In una linea del tempo è possibile riassumere lo sviluppo della fabbricazione additiva e le applicazioni principali (Fig.1).



Figura 1: Evoluzione dell'Additive Manufacturing

Gli studi e le ricerche su questo campo hanno continuato il loro corso arrivando sino ad oggi, migliorando la qualità del prodotto e variando il settore di applicazione.

Oggi questa tecnica è entrata a far parte di molti ambiti industriali, soprattutto ove i volumi di lavoro non sono ingombranti; non è necessario il presidio di un operatore nella fase di produzione e permette di ottenere il rispetto delle tolleranze e delle prestazioni meccaniche.

Tuttavia, il costo di questa tecnologia è ancora molto elevato e sono quindi necessarie analisi preliminari di fattibilità e di mercato per comprendere se il suo utilizzo possa portare a vantaggi o svantaggi per l'industria.



Figura 2: Motivazioni economiche sviluppo AM

Come già spiegato nell'introduzione al capitolo, la realizzazione di prototipi è l'applicazione principale della Fabbricazione Additiva e fattori economici e di mercato ne hanno spinto lo sviluppo. Alcuni (Fig.2)mostrano come negli anni la richiesta di grafici personalizzazione, quindi complessità crescenti, e tempi di consegna richiesti sempre più brevi da parte dei clienti abbia "obbligato" le aziende ad accelerare i tempi di sviluppo prodotto. Tuttavia, un prodotto per essere sviluppato deve passare attraverso alcune fasi di prototipazione (Fig.3):

	Prototipi Concettuali	Prototipi funzionali	Prototipi tecnici	Prototipi preserie
	 Valutazione della forma 	 Valutazione delle presta- zioni con prove funzionali 	 Valutazione delle presta- zioni del prodotto e del ciclo di fabbricazione 	 Valutazione finale del prodotto (sono ammesse poche modifiche margi- nali)
Obiettivi	 Verifiche di montaggio Analisi della difficoltà tecnologiche 	 Ottimizzazione del prodot- to per la funzione 	Ottimizzazione delle tecno-logie di fabbricazione	
Materiale	Qualsiasi	Simile	Molto simile	Definitivo
Tecnologia di fabbricazione	Non è considerato	Non è considerato	Simile	Definitiva

Figura 3: Serie di prototipi

essi sono i primi elementi di una serie produttiva e nel particolare avremo che il 70% della fabbricazione additiva è costituita da prototipi Concettuali e Funzionali mentre il 30% da prototipi Tecnici e Preserie; quest'ultimi presentano caratteristiche molto vicine a quelle del prodotto finito.

1.1.1 Campi di applicazione

Uno dei settori trainanti per lo sviluppo della tecnologia additiva è l'aerospazio: oggi è possibile realizzare pezzi complessi che richiedono caratteristiche geometriche che le convenzionali tecniche di lavorazione non permettono. Anche il settore medicale e dentale si sta rivoluzionando nel particolare per la produzione di protesi con materiali performanti e inerti.

Il settore automotive si sta avviando ad un uso sempre più frequente mentre nel campo biomedico si possono vedere applicazioni nella produzione di esoscheletri. Una caratteristica principale che ha spinto i settori di aviazione e dell'autoveicolo all'utilizzo di questa tecnologia è stata soprattutto la progettazione topologica che ha permesso la riduzione del peso oltre il 50%, di molti componenti meccanici e strutturali (Fig.4).



Figura 4: Esempio di riduzione del peso del prodotto finale

Alcune applicazioni vanno anche nel campo della gioielleria soprattutto per la produzione di geometrie complesse.

Nei successivi paragrafi verranno elencate e spiegate le tecniche di fabbricazione additiva presenti nel mercato attuale e ci soffermeremo principalmente su quelle che interessano lo sviluppo di questo elaborato.

1.2 Principali tecniche di Fabbricazione Additiva

Le diverse tecniche di fabbricazione additiva presenti sul mercato vengono classificate a seconda dello stato fisico della materia prima. Vi sono tecnologie che sfruttano lo stato liquido altre invece lo stato solido e quest'ultimo può presentarsi anche sottoforma di polveri.

Viene inoltre fatta una classificazione che prende in esame lo stato chimico del materiale di partenza, facendo la distinzione tra polimeri, ceramici e metallici.

Per semplificare la spiegazione delle diverse tecniche, si mostrano due diversi schemi concettuali: il primo fa riferimento alle tecniche utilizzate per materiali polimerici (Fig.5), distinguendone lo stato fisico; il secondo fa invece riferimento ai materiali metallici e i rispettivi stati fisici prevalenti (Fig.6).



Figura 5: Tecniche di fabbricazione additiva per polimeri



Capitolo I - Introduzione all'Additive Manufacturing

Figura 6: Tecniche di fabbricazione additiva per metalli

Questi due diagrammi mostrano quindi le diverse tecniche sviluppate per i diversi materiali e in alcuni casi, come per la polvere metallica, è possibile fare una distinzione tra le tecnologie che sfruttano un solo materiale e quelle che sfruttano anche la presenza di un legante.

Nei prossimi paragrafi si farà una breve spiegazione, ognuna per la macro-famiglia di appartenenza, spiegando il funzionamento e gli eventuali vantaggi e svantaggi associati alla tecnologia di interesse.

1.2.1 Additive Manufacturing per polimeri

Rispetto ai processi convenzionali, quali stampaggio ad iniezione, estrusione ed ecc..., la fabbricazione additiva per materiali plastici permette di ottenere prodotti finali con tolleranze e finiture molto vicine ai processi citati sopra anche se in alcuni casi resta comunque necessario l'intervento di un post-processing.

La stereolitografia (SLA) è una tecnica sviluppata e prodotta dalla 3D Systems e che sfrutta fotopolimeri in soluzione liquida; l'azione di un fascio laser permette la fotopolimerizzazione delle zone d'interesse, in particolare delle superfici esterne del modello, secondo la logica del *layer-by-layer.* Il prodotto finale si presenta con uno strato di pelle solidificato e un cuore liquido interno. È quindi necessario un post-trattamento in camera UV che renda il prodotto finale omogeneo. Questa tecnologia prevede l'utilizzo di supporti per la realizzazione di sottosquadri e prodotti con lo stesso materiale.

La tecnologia **Polyjet** deposita, invece, materiali differenti per pezzo e supporti; questi ultimi sono solubili in una soluzione chimica che ne permette facilmente la rimozione. La macchina presenta una testina multi-ugello e lampade UV per la solidificazione.

Gli altri sistemi con materiale liquido, citati in Figura 5, funzionano allo stesso modo delle precedenti, presentando differenze a livello costruttivo delle macchine.

La Fused Deposition Modelling (FDM) è la tecnologia che sfrutta materiale di partenza allo stato solido ed estruso attraverso degli ugelli. I materiali sono termoplastici e definitivi; pezzo e supporto possono essere sia dello stesso materiale, quindi si prevede un processo di rimozione manuale, sia di materiale diverso e solubile in acqua o in soluzione chimica.

Le tecnologie presentate fino a questo momento hanno numerosi vantaggi e svantaggi di cui bisogna tener conto in fase di utilizzo. Alcune presentano volumi di lavoro limitati che permettono la produzione di prototipi con dimensioni in scala e non reali; inoltre, la velocità di esecuzione del processo non è elevata, richiedendo tempi lunghi di produzione, come la FDM.

Una tecnica produttiva molto efficace è invece la **Selective Laser Sintering (SLS)**: si basa sull'utilizzo di polveri polimeriche stese secondo la logica *layer-by-layer*; un laser CO_2 sinterizza le zone interessate e non sono necessari supporti: saranno le polveri compattate a svolgere la funzione di sostegno. Questo sistema impiega una camera la cui temperatura è prossima a quella di fusione dei polimeri, garantendo minori distorsioni da gradiente termico. Oltretutto si opera in atmosfera di azoto in modo da evitare l'ossidazione delle polveri. Si prevedono anche in questo caso dei posttrattamenti, come il raffreddamento a temperatura ambiente e la rimozione delle polveri.

Uno dei vantaggi principali è che il volume di lavoro può essere saturato, vi è la possibilità di inserire più componenti durante la fase di stampa. Il rispetto delle tolleranze e le prestazioni dei materiali sono buoni.

1.2.2 Additive Manufacturing per metalli

I sistemi di produzione additiva che sfruttano materiale metallico di partenza adoperano principalmente un materiale di partenza allo stato fisico di polvere.

Le diverse tecniche presenti in commercio si suddividono in:

- Tecniche ad un solo componente: si tratta di una lega definitiva, fusa da una sorgente laser e che rappresenta il materiale definitivo del prodotto;
- Tecniche che impiegano componente e legante: il materiale del prodotto non è definitivo ma necessita di un post-trattamento con infiltrazione.

Nei prossimi paragrafi verranno presentati i sistemi più noti in commercio e spiegando in breve le peculiarità, vantaggi e svantaggi.

La 3-Dimensional Printing, brevettata e sviluppata dalla ExOne, è l'unico sistema che sfrutta la presenza di un legante per il metallo. La macchina deposita uno strato di collante, ove necessario, tra i diversi letti di polvere e un successivo post-trattamento di infiltrazione capillare: in camera sottovuoto e ad alta temperatura, il legante viene sostituito dal bronzo. Il prodotto finale non è una lega ma un composto con caratteristiche prestazionali che dipendono dalle proprietà dei due materiali. Con questa tecnologia vengono prodotti principalmente prototipi funzionali ed inserti per stampi preserie. Si presenta un'elevata produttività, volumi di lavoro medio-grandi e non vi è la necessità di supporti.

In merito ai sistemi che utilizzano un solo componente e quindi assenza di leganti, abbiamo la **Selective Laser Sintering (SLS)** e la **Selective Laser Melting (SLM)** (Fig.7). SLS e SLM sono in realtà la stessa tecnica e la differenziazione è legata a ragioni storiche: la prima, sviluppata negli anni antecedenti al 2000, sfruttava una miscela di materiali composta da polveri basso-fondenti e polveri alto-fondenti; il fascio laser avviava quindi la fusione del materiale termicamente meno resistente il quale poi fungeva da legante. Il risultato finale era quindi un composto e non una lega. Dopo gli anni 2000 si è raggiunta la completa fusione delle polveri, da cui il termine SLM.

Allo stato attuale si ha la completa fusione delle polveri interessate dalla radiazione laser e le porosità, se il processo è adeguatamente controllato risultano assenti, con densità prossima al 100 %. Entrambi i processi, quindi, portano a fusione il materiale attraverso un fascio laser e presentano lo stesso schema costruttivo:



Figura 7: Schema costruttivo SLS e SLM

il componente viene prodotto su di una piastra di costruzione e man mano che il processo avanza, quest'ultimo si abbassa di un ΔS , pari allo spessore del layer successivo. È presente anche una lama che permette di stendere gli strati di polvere, un sistema di lenti che direzionano il fascio laser e il laser stesso che permette di raggiungere la temperatura di fusione in pochi millisecondi. Si opera in camera sottovuoto in modo da evitare ossidazioni indesiderate. Si prevedono, tuttavia, dei supporti nonostante il letto di polvere venga compattato. Avendo a che fare con prodotti in metallo il ritiro volumetrico che deriva dal raffreddamento non è trascurabile ed è quindi necessario "ancorare" i componente alla base; i supporti sono dunque necessari per evitare deformazioni indesiderate da tensioni residue.

Al termine del processo di stampaggio è necessario un trattamento di distensione in forno in modo da rilassare le tensioni residue e proseguire successivamente con la rimozione meccanica dei supporti.

Non è possibile ottenere tolleranze e rugosità paragonabili a quelle

delle lavorazioni ad asportazione di truciolo, di conseguenza nelle zone di accoppiamento è necessario prevedere un sovrametallo compreso tra [0.5 - 1 mm] che permetta di eseguirne lavorazioni successive. Un vantaggio molto importante è quindi avere la possibilità di ottenere geometrie complesse, strutturalmente valide e leggere, non realizzabili con le tecnologie convenzionali.



Figura 8: Esempi di componenti prodotti con tecnologia SLS/SLM

Le polveri più utilizzate per questa tecnica sono le seguenti:

Lega di alluminio AlSi10Mg	Acciaio per stampi	Inconel 718
Cobalto Cromo biomedicale	Acciaio inox	Leghe Au.
Cobalto Cromo motorsport e aerospazio	Lega di titanio Ti6Al4V	Inconel IN625;

Polveri metalliche più diffuse per SLM

L' Electron Beam Melting (EBM) (Fig.9) è una tecnologia sviluppata per migliorare alcuni accorgimenti delle precedenti, come il preriscaldamento delle polveri: queste, non preriscaldate, possono causare forti gradienti termici e conseguenti ritiri indesiderati. Inoltre, le polveri possono presentarsi molto riflettenti e deviare il fascio laser.

L'EBM quindi aggiunge un preriscaldamento e sfrutta un fascio di elettroni per portare a fusione il materiale.

Gli elettroni sono emessi da un filamento riscaldato oltre i 2500°C ed accelerati attraverso l'anodo, con velocità che possono raggiungere 1/2 c [c = velocità della luce].

Un primo campo magnetico porta il fascio nel punto focale mentre un secondo campo ne controlla la deviazione; quando gli elettroni colpiscono le polveri, l'energia cinetica si converte in energia termica, portandole a fusione.



Figura 9: Schema costruttivo EBM

Il preriscaldamento dello strato di polvere viene effettuato con fasci non focalizzati, fino alla temperatura di 700-800 °C; ciò ne permette un miglior compattamento e l'inutilità dei supporti. Tuttavia, i componenti prodotti presentano una rugosità maggiore rispetto alla tecnica SLM data la maggiore granulosità della materia prima.

I metalli utilizzati sono leghe di Cromo-Cobalto e leghe di Titanio. La depositaria del brevetto EBM è l'azienda svedese ARCAM della General Electric-GE.

In sostituzione al letto di polvere abbiamo la tecnologia denominata Laser Deposition (Fig.10): è una tecnica ancora in fase di sviluppo e caso di studio in ambito accademico. Le polveri vengono depositate nelle zone di interesse da ugelli e portate alla temperatura di fusione da una sorgente laser. Le macchine in oggetto possono accogliere volumi di lavoro molto grandi poiché il peso delle polveri all'interno della camera di lavoro non è più un vincolo progettuale.



Capitolo I - Introduzione all'Additive Manufacturing

Figura 10: Schema di funzionamento Laser Deposition

Potenzialmente è possibile realizzare componenti in multimateriale e ottenere la lega finale direttamente in macchina; non è necessario oltretutto lavorare in atmosfera controllata poiché il fattore ossidazione viene monitorato durante il processo attraverso un gas di copertura e gestito dal sistema attraverso la testa di scansione Anche questa tecnica come le precedenti richiede l'intervento di processi convenzionali ove il componente richiede l'accoppiamento e tolleranze dimensionali ristrette. [2]

Lo schema che segue riassume, per le diverse tecnologie, alcune caratteristiche generali riportate in questa breve descrizione [3]:



Figura 11: Schema riassuntivo - Proprietà e caratteristiche finali per le diverse tecniche di FA

1.3 Progettazione per Additive Manufacturing

Fino a questo momento abbiamo messo in evidenza come questa tecnologia sia in grado di produrre componenti con forme, geometrie e complessità abbastanza elevata, che le convenzionali tecniche di produzione non sono in grado di realizzare.

È necessario il solo file CAD per poter cominciare: i processi di Fabbricazione Additiva sono sistemi automatizzati che usano il singolo layer 2D, derivante dal CAD e da un post-processo di *Slicing*, per ottenere la ricostruzione dell'oggetto in 3D.



Figura 12: Processo e progettazione AM

Si parte quindi da un modello CAD 3D e la successiva poligonizzazione in formato *.stl;* il passo seguente è avviare un'analisi di orientamento, generare dei supporti ed effettuare uno *slicing* con l'ausilio di applicativi sviluppati ad hoc. Un software dedicato genera il codice da inviare al controllo numerico della macchina che esegue il processo; seguono poi le fasi di post-processing.

• Il formato **STL - Standard Triangulation Language** è riferito in modo specifico alla tecnologia additiva poiché sviluppato direttamente dalla 3D Systems, la prima compagnia a commercializzare la tecnologia nota come stereolitografia. Oggi è di pubblico dominio e tutti i sistemi di modellazione CAD lo hanno adottato. [3]

Il formato STL sfrutta la triangolarizzazione delle superfici e ogni triangolo è descritto da tre punti (vertici) e un vettore ad esso normale che indica il verso uscente.

Se i modelli sono molto complessi a volte si possono avere errori nella generazione del formato: i triangoli devono presentare massimo due vertici ed un solo lato coincidenti. [3]



Figura 13: Esempio di modello e triangolarizzazione in formato STL

• Una volta generato il file STL e scelto l'orientamento, il software esegue lo slicing: il modello viene suddiviso in layer con piani paralleli, distanziati ΔS , ed orientati lungo l'asse di esecuzione di stampa; ciò rappresenta anche la risoluzione dello strato della macchina.



Figura 14: Slicing

Questo processo porta con sé un inconveniente, la presenza di materiale in eccesso o mancante e un necessario postintervento con lavorazioni convenzionali.

Anche l'orientamento gioca un ruolo fondamentale per questa fase, basti guardare la Figura 15. [2]



Figura 15: Esempio di slicing

• Una volta eseguite queste azioni preliminari il componente viene mandato in stampa. Al termine, il componente viene estratto e sottoposto alla fase di post-processing. Le modalità di quest'ultimo dipendono, come spiegato nei precedenti paragrafi, dal tipo di tecnologia; per SLM i componenti vengono fatti raffreddare, puliti delle polveri, trattati termicamente e svincolati dai supporti. [2]



Figura 16: Esempio del workflow

In linea generale, si può affermare che l'additive manufacturing presenta molti vantaggi: rispetto alle tecniche di lavorazione convenzionali vi è l'utilizzo di una sola macchina e l'assenza di attrezzature secondarie ingombranti che delineano il processo di esecuzione. Al contrario vi è l'assenza di sistemi automatizzati che riescano a gestire in autonomia il processo; è necessario, quindi, l'intervento di un operatore specializzato.

In alcuni casi i volumi di lavoro sono limitati e le velocità di esecuzione basse e i materiali disponibili sono di numero limitato.

Dal punto di vista del prodotto, il cliente ha il vantaggio della personalizzazione, potendo avvalersi di ergonomia e design desiderati. Altro punto vantaggioso è la riduzione di peso. Tutto ciò comporta però costi più elevati.

2 Introduzione alla Reverse Engineering

La crescente competizione globale richiede alle aziende la continua immissione sul mercato di prodotti caratterizzati da elevati standard qualitativi e da costi ridotti. Uno degli elementi strategici, per il mantenimento della capacità competitiva, è la riduzione dei tempi di sviluppo di un nuovo prodotto. [4]

Uno studio sul ciclo di vita del prodotto condotto da *McKinsey & Company*, ha evidenziato che un ritardo di sei mesi nell'introduzione sul mercato di un nuovo prodotto può costare una perdita del 33% sui potenziali profitti, mentre ridurre di un mese il *time-to-market* incrementa i profitti del 12%. [4]

La reverse engineering è un processo che, tramite una scansione 3D e la conseguente elaborazione da parte di applicativi software, permette di digitalizzare e la matematizzazione di un oggetto fisico. Ciò permette al progettista e all'azienda di ridurre in modo cospicuo i tempi di progettazione e l'immissione sul mercato.

Il termine Reverse Engineering nasce nell'ambito dell'ingegneria informatica per indicare l'analisi approfondita di un prodotto software, con l'obiettivo di ricostruire nel dettaglio le fasi che hanno portato alla sua realizzazione, in assenza delle indicazioni originali o della conoscenza delle idee di base. Nel contesto aziendale le tecniche di RE trovano impego principalmente in:

- Controllo e ispezione di componenti;
- Processo si sviluppo di un nuovo prodotto;
- Ausilio nella classificazione e ricostruzione di disegni e parti di oggetti esistenti.

In questa sede faremo principalmente riferimento alla fase di controllo e ispezione.



Figura 17: Applicazioni della Reverse Engineering

2.1 Sistemi di acquisizione e rilevamento per RE

In generale i diversi sistemi presenti in commercio vengono distinti in due macro-famiglie che sono: **Sistemi a SCANSIONE** e **Sistemi di DIGITALIZZAZIONE** e che a loro volta si distinguono tra sistemi a contatto e senza contatto. Per facilitare la lettura vi si propone uno schema che riassume al meglio le diverse tecniche (Fig.18).



Figura 18: Schema riassuntivo dei diversi sistemi di scansione e digitalizzazione

2.1.1 Digitalizzazione e scansione a contatto

Tra i sistemi di digitalizzazione a contatto i più diffusi sono le macchine di misura a coordinate CMM (*Coordinate Measuring Machine*) e bracci articolati: il contatto con la superfice del componente può comportare deformazioni e quindi falsare le acquisizioni dei punti; risultano quindi adatti per componenti con elevata rigidezza.

• Coordinate Measuring Machine - Digitalizzazione

Presentano una piattaforma su cui fissare il componente e generare il sistema di riferimento ed una struttura sovrastante molto rigida su cui è posta la testa di acquisizione, il *tastatore* (accuratezza al di sotto del micron), che segue un percorso definito dall'operatore.

Il compito della macchina è acquisire una serie di coordinate sull'oggetto in esame con un processo abbastanza lento (rileva da 1 a 5 punti al secondo). Il limite di tali sistemi è la dimensione ridotta della tavola rotante. (Fig.19)



Figura 19: Sistema CMM a contatto

• Bracci articolati - Digitalizzazione

Sono sistemi manuali costituiti da una serie di bracci articolati (5 gdl) connessi tra loro e provvisti di sensori. Noto il riferimento nello spazio e la lunghezza dei bracci, una serie di encoders registrano le coordinate dei punti acquisiti.

L'operatore, stabilito un sistema di riferimento, prosegue con la rilevazione dei punti:

modalità *point-and-click*, ossia il controllo su ogni singola acquisizione, e la modalità *semiautomatica* con acquisizione continua. Sono sistemi abbastanza veloci e con volumi di lavoro che possono raggiungere anche i 4 metri.

• Sistemi di scansione a contatto

Tra i sistemi di scansione a contatto ritroviamo:

- CMM Macchine di misura a coordinate;
- Bracci articolati;
- Scanner piezoelettrici;

In generale il rilevamento avviene attraverso una sonda analogica che tocca l'oggetto e memorizza le coordinate del punto.

La sonda avanza lungo una direzione x per step successivi e passo definito dall'operatore; a seguito di ogni movimento il tastatore si estende lungo z misurando la posizione e registrando le coordinate x, y, z.

Terminato il processo lungo x, la sonda si sposta lungo y di una nota quantità e riprende la procedura descritta nel passaggio precedente.

È una procedura molto lenta e poco idonea alla scansione di oggetti di grandi dimensioni. Il volume di lavoro è limitato.

2.1.2 Digitalizzazione e scansione senza contatto

I sistemi senza contatto sono piuttosto veloci ma non accurati come i tastatori. L'acquisizione avviene attraverso un fascio di luce bianca strutturata emessa da una sorgente, un sensore ottico che registra le informazioni necessarie ed un sistema di posizionamento per l'identificazione del sistema di riferimento. La luce strutturata illumina l'oggetto in esame proiettando un *Pattern*, reticolo di luce a bande parallele; quando la superfice dell'oggetto è curva, il pattern si deforma (Fig.20): i sistema ottico e il relativo software confrontano le bande piane con le deformate estrapolando le informazioni di misura.



Figura 20: Deformazione della luce strutturata

Tra i sistemi più diffusi per la SCANSIONE SENZA CONTATTO vi sono i dispositivi a triangolazione laser. In generale si punta un laser sull'oggetto e dispositivi di acquisizione, quali telecamere, ne rilevano la luce.

• Sistemi ottici - Scansione

Sono i più utilizzati e tra i vantaggi c'è sicuramente la velocità di acquisizione dei punti non garantendo, tuttavia, precisioni elevate come quelli a contatto.

I sistemi ottici sfruttano l'interazione di un fascio di luce coerente, emessa da una sorgente, con l'oggetto.

Gli elementi principali che costituiscono questi sistemi sono:

- Sorgente di luce coerente (di solito lama di luce);
- Sensore ottico;
- Sistema di posizionamento.

Sono detti anche a $triangolazione\ laser$, per comprendere meglio è utile guardare lo schema (Fig.21):



Figura 21: Schema triangolazione laser

noti gli angoli e la misura della base (che dipende dalla costruzione del dispositivo), è possibile calcolare la distanza tra dispositivo e oggetto attraverso semplici formule trigonometriche.

Inoltre, i sistemi ottici sfruttano una luce monocromatica e al ricevitore si può aggiungere un filtro passa-banda che evita il passaggio di luci parassite.

Questi dispositivi possono presentare, come accessorio, una tavola rotante, che permette di acquisire le informazioni con più precisione; i sensori si possono montare anche su robot articolati migliorando quindi l'automazione delle acquisizioni.

Questa breve panoramica sui dispositivi di scansione e digitalizzazione ha permesso di distinguere e comprendere meglio i diversi sistemi presenti sul mercato, evidenziandone vantaggi e svantaggi. Si ricorda che esistono apparecchiature che permettono di registrare anche immagini interne come Tomografia, Raggi X e Risonanza Magnetica, ma non sarà questa la sede di interesse, tuttavia la prima si è rilevata utile per l'acquisizione di alcune geometrie complesse presenti in questo lavoro di tesi.

2.2 Processi della Reverse Engineering

I processi, ovvero le diverse fasi che interessano la Reverse Engineering si possono visualizzare nel seguente schema:



Figura 22: Le fasi del processo di Reverse Engineering

Si parte dunque da un processo di acquisizione che può essere eseguito attraverso uno dei sistemi descritti nei capitoli precedenti: scansione e/o digitalizzazione.

Prima di questa fase però il componente in esame deve essere preparato:

- Pulizia della superfice;
- Fissaggio del pezzo;
- Orientamento e studio del pezzo per minimizzare il numero di acquisizioni;
- Trattamento con spray opacizzanti per ridurne i riflessi, soprattutto per macchine di acquisizione ottiche;
- Posizionamento dei *markers*.

I *markers*, adesivi di riferimento, sono utilizzati su componenti molto grandi, che non possono essere disposti su tavole rotanti, in modo da poter allineare le viste nella fase di pre-elaborazione. Ad esempio, due acquisizioni per essere unite devono condividere non meno di tre markers. Nella fase di acquisizione si possono registrare punti non appartenenti alla superfice del componente, risultato di riflessi, vibrazioni, oppure una semplice ripetizione di punti e quindi inutili ai fini della generazione della geometria. Si cerca quindi di mantenere un numero di punti strettamente necessario ad una buona rappresentazione delle superfici.

La fase di **Pre-elaborazione dati**, che può avvenire automaticamente con l'ausilio del calcolatore oppure attraverso l'intervento di un operatore, è necessaria per:

- Verificare la coerenza dei punti e pulire la nuvola di punti;
- Unire le viste raccolte, nel caso vi siano marcatori;
- Rimuovere punti superflui nelle zone di unione.

Il termine *sampling* identifica la fase di pulizia riducendo il numero di punti che risultano ridondanti. Se invece i dati non sono sufficienti, si può ricorrere ad una nuova acquisizione. I risultato ottimale di questo step porterà alla generazione di file finali più leggeri e facili da elaborare con sistemi CAD.

Si passa poi alla **Segmentazione e creazione delle superfici**: a questo punto si ha la creazione delle superfici attraverso la matematizzazione:

- Si importano i punti in un software intermedio (NO CAD);
- Tale software definisce un sistema di riferimento attraverso un'operazione detta 3-2-1 (Fig.23)



- Si estrapolano le curve di bordo, indicando al software quali sono i punti del bordo;
- Vengono create le linee di sezione lungo $x \in y$;
- Tra le linee di sezione si trovano altri punti che definiscono un'area detta *Nurbs* con spessore zero; un insieme di *Nurbs*

definisce la superfice dell'acquisizione e che si può esportare nel formato desiderato, ad esempio IGES.



Figura 23: Creazione delle Nurbs

Una volta terminata la fase di segmentazione e quindi individuate le caratteristiche geometriche e funzionali del pezzo, si passa alla fase della creazione del modello.

In generale quindi avremo:



Figura 24: Riassunto delle diverse fasi della RE

3 Simulazione per processi di AM

Molti componenti meccanici appartenenti ai settori racing, biomedicale e aerospazio, oggi sono prodotti attraverso la tecnologia della fabbricazione additiva e garantire la qualità di queste parti è estremamente importante. Sebbene la tecnologia additiva prometta un grande potenziale, garantire e prevedere le qualità del prodotto è oggi ancora questione di studio e ricerca.

La simulazione del processo additivo può aiutare in questa fase e può diventare particolarmente importante nel caso di componenti critici. Gli sviluppatori dei software di simulazione lavorano su progetti di ricerca volti a dimostrare il valore della simulazione nel processo di sinterizzazione laser dei metalli, contribuendo a ridurre il numero di job falliti e a migliorare la qualità della parte.

La simulazione ha lo scopo di prevedere il comportamento del materiale in polvere durante il processo di sinterizzazione laser, valutare gli effetti delle diverse proprietà del materiale e il loro impatto sulla parte finale.

L'obiettivo della simulazione del processo additivo è definire parametri macchina ottimali, come l'orientamento del pezzo, velocità di scansione e parametri della sorgente laser, in modo che le tensioni residue, e quindi eventuali distorsioni, possano essere ridotte al minimo. Per raggiungere l'obiettivo si richiedono software che siano in grado di fornire una simulazione veloce e ad alta risoluzione, catturando la distorsione delle parti, e le caratteristiche fisiche del materiale come la struttura cristallina e porosità, in modo che quando viene apportata una modifica al processo, il modello preveda accuratamente l'effetto di tale cambiamento.

In questo modo, la simulazione darà i mezzi necessari a gestire le aspettative rispetto alle potenzialità dell'Additive Manufacturing,

fornendo informazioni dettagliate prima che una parte venga prodotta e diminuendo i costi associati a fallimenti imprevisti.

La simulazione è quindi uno strumento utile per comprendere al meglio la fisica e la meccanica del processo AM ed ottenere un continuo miglioramento. [5]

3.1 Distorsione e tensioni residue nei processi AM

La distorsione dei componenti prodotti con tecnologia additiva è uno dei problemi principali a cui tecnici ed ingegneri del settore oggi mostrano particolare attenzione. Il fallimento di un job inevitabilmente porta con sé due costi, uno economico e uno più astratto. Il costo monetario reale di un pezzo di scarto è difficile da calcolare in quanto include non solo il consumo di materie prime ed energia per l'implementazione del processo in macchina, ma anche il tempo che tecnici e ingegneri devono impegnare nella riprogettazione.

Il costo intangibile è la perdita di fiducia: parliamo sia della stima persa da parte di un cliente nei confronti dell'azienda sia della perdita di fiducia nella tecnologia additiva. [6]



Figura 25: Esempio di distorsione - Distacco della parte dai supporti e conseguente distorsione dovuta dalle tensioni residue

La distorsione durante i processi di fabbricazione additiva oggi è però un problema risolvibile. Si richiede, tuttavia, una comprensione più profonda dei processi e del comportamento dei materiali sottoposti a stress termico.

Cosa causa la distorsione? La distorsione è il risultato inevitabile del gradiente termico tra le diverse zone del letto di polvere. Durante il processo additivo si presentano infatti zone a temperatura differenziata: la zona interessata dal fascio laser avrà una temperatura prossima a quella di fusione mentre, al contrario, le zone circostanti si presentano a temperature molto più basse. [6]



Figura 26: Gradiente termico durante il processo di AM

Il materiale nella zona termicamente alterata (ZTA) subisce dilatazioni termiche, spingendo la parte sottostante e costringendo il materiale più freddo a comprimersi e flettere per accogliere l'espansione.

Man mano che la ZTA si raffredda vi è una contrazione che impone una sollecitazione a trazione dei layer sottostanti. Gli stress dovuti all'espansione e alla contrazione sono così alti che costringono la parte a cedere, tanto da provocare una deformazione plastica permanente.



Figura 27: Stress dovuto al gradiente termico

La distorsione è quindi inevitabile, ma non ingestibile. Pratiche standard per prevenire la deformazione plastica sono:

- Preriscaldare le piastre di costruzione prima della produzione;
- Riscaldamento costante del layer di stampa o della camera di costruzione durante il processo di fabbricazione;
- Creazione dei supporti.

Preriscaldamento e riscaldamento costante riducono i gradienti termici e conseguentemente la distorsione; i supporti presentano invece un doppio vantaggio riducendo le deformazioni sia del componente che della piastra principale a cui sono ancorati.

L'uso di supporti però non annulla del tutto le forze flettenti portando alla generazione di tensioni residue. [6]

Oggi il metodo più completo che permette di ridurre al minimo le deformazioni è la compensazione della geometria. La compensazione è figlia diretta della simulazione del processo: alcuni software presenti sul mercato presentano algoritmi matematici specifici che permettono di generare, a valle dello studio del processo di stampa, una geometria deformata; ripercorrendo quindi il processo di simulazione con la nuova geometria, il risultato finale sarà la configurazione nominale di progetto.

La generazione di un CAD compensato è il modo migliore per ottenere i risultati desiderati dalla fabbricazione additiva e produrre parti con un numero minimo di job falliti. [6]



Figura 28: Esempio di simulazione processo e compensazione
3.2 Software di simulazione

Al termine del precedente paragrafo si è introdotta la compensazione come metodo di risoluzione per il problema delle distorsioni. In questa sezione verranno introdotti i principali software con cui è stato svolto il lavoro del presente elaborato e verranno esposti i diversi aspetti, sia positivi che negativi, riscontrati durante le prime fasi di studio.

3.2.1 Altair Inspire

Uno dei primi software considerati è Altair Inspire che nell'ultima versione presenta il tool Print3D, il quale permette di eseguire la simulazione del processo di fabbricazione additiva per materiali metallici.

La simulazione termo-meccanica consente di sviluppare parti pronte per la produzione additiva e di valutare e modificare facilmente le variabili di processo che possono risultare critiche.

Le diverse fasi della simulazione presenti in *Inspire* sono: costruzione del modello secondo la logica *layer-by-layer*, raffreddamento, separazione dalla piattaforma di costruzione e calcolo del ritorno elastico delle parti

Il software, come mostrato in Figura 29, permette di svolgere la simulazione eseguendo i seguenti passaggi.



Figura 29: Interfaccia modulo Print3D - Inspire

- **a.** Per prima cosa bisogna importare il modello in formato CAD, ad esempio: *parasolid.x*;
- b. Una volta importato il modello si seleziona la scheda *Stampa parte*; selezionando il modello su cui eseguire le analisi, il software

permette di selezionare il materiale di interesse (Tab.1). Successivamente si prosegue in ordine con le schede successive.

Materiali Inspire Print3D			
AlSi10Mg	AlSi10Mg		
Inconel 718	Inconel 718		
Maraging Steel	Maraging Steel		
Taballa 2: Mataria	li Ingning Print2D		

Tabella 2: Materiali Inspire Print3D

c. *Stampante* permette di scegliere il tipo di macchina con cui effettuare le analisi di processo e la gamma messa a disposizione è presentata nella seguente tabella:

Stampanti				
EOS	EOS M 290			
	EOS M 400			
	EOS M 400-4			
	EOSINT M 280			
	AM 250			
Ronishow	AM 400			
Remismaw	RenAM 500-M			
	RenAM 500-Q			
	SLM 500			
SLM Solutions	SLM 280 2.0			
	SLM 125			

Tabella 3: Macchine di stampa per Inspire Print3D

- d. A questo punto si passa alla sezione *Orientamento*: qui è possibile gestire l'orientamento del componente all'interno del volume di lavoro della macchina. È possibile scegliere tra diverse opzioni di ottimizzazione: orientamento secondo build max/min e orientamento personalizzato; quest'ultimo comando permette di decidere quale superficie vincolare alla piattaforma di costruzione e deciderne la distanza (Fig.30).
- e. Il passo successivo è la generazione dei supporti. La sezione Supporti permette di generarli automaticamente oppure manualmente. Tuttavia il software riconosce in modo autonomo le superfici che necessitano di eventuali vincoli aggiuntivi per evitare

distorsioni di stampa indesiderate. Questo tool, nel caso di generazione automatica, permette di selezionare il tipo di sezione del singolo supporto, la dimensione e la distanza dagli altri. A questo punto si può effettuare lo slicing e avviare la simulazione inserendo i parametri necessari richiesti.



Figura 30: Opzioni di orientamento modello Inspire

f. L'ultimo passo è quindi l'impostazione della simulazione. Per semplicità di esposizione si fa riferimento alla Figura 31 in cui sono riportati alcuni parametri macchina di esempio, il Ti6Al4V:

Esegui analisi parti			: ×
Nome: eos_example			
Parametri di processo			
Tipo di analisi:		Termomeccanico	¥
Strategia di scansione:		Per layer	¥
Velocità:		1200 mr	m/s
Potenza laser:		160	W
Spessore strato di polvere:		0.03	mm
Assorbimento della polvere:		10.	0 %
Tempo di raffreddamento:		15	0 s
Temperatura base:		37	3 K
Spessore medio:		4.34699	mm
Dimensione elemento:	Lunghezza	1.449	mm
	Altezza	1.449	mm
Veloce		Accu	ırata
Ripristina 🗸	Es	egui Chiudi	

Figura 31: Parametri macchina per Inspire 3DPrint

Una volta completata la simulazione si può passare alla valutazione dei risultati e ad analisi critiche dello stato finale del prodotto. Inspire permette di valutare diverse caratteristiche del processo tra cui spostamento e deformazione, tensioni residue e andamento delle temperature durante il processo (Fig.32). I risultati mostrati sono stati ottenuti su un primo componente di prova e riportato in Figura 32: si tratta di un modello molto semplice che presenta alcune caratteristiche geometriche e dimensionali, utili a valutarne la distorsione e la concentrazione degli stress.



Figura 32: Modello di prova e output dei risultati per Inspire 3D Print

Il software permette di valutare l'andamento dello spostamento sia in modo globale sia attraverso la selezione di nodi specifici.

È possibile, inoltre, visualizzare l'andamento degli stress residui: sia in modo puntuale, sia verificarne l'andamento durante il processo produttivo, nei diversi punti selezionati. È possibile notare come la maggior parte degli stress si concentra nel corpo a spessore maggiore, fase di processo iniziale. Ciò è dovuto principalmente al fenomeno di trazione-compressione che si genera durante il processo di riscaldamento e raffreddamento, ma anche al gradiente termico generato tra piastra e componente.

Un punto a svantaggio di questo software è però la mancanza di un processo di compensazione: è infatti impossibile estrapolare un file CAD che tenga conto delle deformazioni. additiveworks

3.2.2 Amphyon - Additive Works



EXAMINER



SUPPORTS



MECH-SIMULATION





THER-SIMULATION



Figura 33: Schema riassuntivo delle funzioni presenti in Amphyon

Un ulteriore software con cui si è proseguito lo studio della validazione del processo di simulazione è **Amphyon - Additive Works**. Si tratta di un software di preparazione al processo di simulazione per Laser Beam Melting: fornisce soluzioni che mirano a un risultato

ottimale già alla prima stampa, integrando nuovi strumenti di analisi e simulazione nella catena dei processi Laser-Beam-Melting (LBM, SLM, DMLS, Metal 3D Printing) che mira a ridurre significativamente i costi di pre-elaborazione.

La struttura del software prevede cinque macro aree di interesse e che sono state descritte in breve nello schema di Figura 33.

È utile descrivere cosa richiede il software per un'esecuzione accurata delle simulazioni e quali siano i parametri rilevanti.

Si parte dalla creazione di un nuovo job in cui specificare il modello della macchina e il tipo di materiale da utilizzare per la stampa (Fig.34 e Tab.3).





Figura 34: Impostazione progetto Amphyon

Concept Laser MLab	Realizer SLM 50	EOS M100	3DSYSTEMS ProX 100
Concept Laser M1	Realizer SLM 100	EOS M290	3DSYSTEMS ProX 200
Concept Laser M2	Realizer SLM 300i	EOS M300-4	3DSYSTEMS ProX 300
Concept Laser X Line 1000R	Renishaw AM125	EOS M400	3DSYSTEMS ProX 320
Concept Laser X Line 2000R	Renishaw AM250	EOS M400-4	3DSYSTEMS ProX 400
SLM Solutions 125 HL	Renishaw AM400	EOSINT M280	Trumpf TruPrint 1000
SLM Solutions 280 HL	Renishaw RenAM 500M	EOS PRECIOUS M080	Trumpf TruPrint 3000
SLM Solutions 500 HL	Bright Laser Tech SLM	Additive Industries MetalFAB1	Trumpf TruPrint 5000

Tabella 4: Macchine di stampa disponibili su software Amphyon

Polveri metalliche Amphyon
Ti6Al4V
AlSi10Mg
Steel 1.2709 overheated
Steel 1.2709
Steel 1.4404
EOS CobaltChrome SP2
Inconel 718

Capitolo III - Simulazione per processi di AM

Tabella 5: Materiali metallici per Amphyon

Dopo aver importato il modello CAD, in formato *.stl*, si passa all'orientamento, successivamente alla generazione dei supporti e infine, all'avvio delle simulazioni. Ad ogni passaggio è possibile settare i parametri della discretizzazione e l'accuratezza dell'analisi meccanica e termica.

a. <u>Orientamento</u>

Il settaggio preliminare dei parametri per il processo di orientamento è rappresentato dalla Figura 35: è presente una modalità manuale che

Manual Orientation	
Manual orientation	
0.00 0.00 0.00	
Pick base plane	Move to base
Options	
Basic Options	
Number of orientations:	50
Spatial accuracy:	High
 Compute geometrical analysis 	
 Compute deformation tendencies 	
Compute build chamber matching	
Part specific options	
Consider preferred direction	
Enter normal:	0.000 0.000 1.000
Choose face:	Pick
Weights	
Parameter set:	Default ~
	Edit Copy Delet

Figura 35: Impostazioni orientamento Amphyon

lascia all'utente la possibilità di orientare il modello secondo le proprie esigenze, e una modalità automatica avanzata. Quest'ultima permette alsoftware stesso la l'ottimizzazione gestione е basa sui dell'orientamento е si parametri di input definiti dall'utente.

È possibile decidere il numero di orientazioni su cui basare l'analisi, la sua accuratezza e selezionare, eventualmente, il calcolo sulla geometria e le deformazioni. È presente la possibilità di selezionare una superficie preferenziale che il software manterrà orientata secondo la sua normale.

Tutti questi accorgimenti permetteranno di osservare, approssimativamente, i risultati attesi dalle simulazioni, con il seguente output (Fig.36):



Figura 36: Ottimizzazione orientamento - Amphyon

le mappe colorate aiutano l'utente a visualizzare lo stato della simulazione e del processo al variare dell'orientamento. È possibile, tuttavia, spostare il cursore all'interno delle mappe e assicurare la miglior qualità del processo. Ad esempio, per garantire il minimo della deformazione è possibile spostarsi all'interno dell'area verde, tuttavia avremo un peggioramento dei tempi di stampa. È quindi necessario valutare con occhio critico questa analisi e cercare di scegliere l'opzione che non porti criticità in nessuna delle aree di interesse. Una volta scelta l'opzione ottimale, sempre dalla Figura 36, è possibile visualizzare il nuovo orientamento.

b. <u>Supporti</u>

A questo punto si passa alla generazione dei supporti. Come nel caso precedente, è possibile proseguire con settaggio manuale e automatico, quest'ultimo garantisce però anche un'analisi accurata che permette di differenziare la densità del materiale dei supporti nelle diverse zone critiche soggette a distacco per deformazione.

Nella Figura 37 si può visualizzare il risultato ottenuto su prove preliminari effettuate su di una geometria di esempio.



Figura 37: Ottimizzazione supporti - Amphyon

Il software è in grado di comprendere le zone che saranno soggette a maggior carico di stress residuo e deformazione, e per garantire l'ancoraggio, quindi evitare il distacco dalla piattaforma di costruzione e dai supporti, genera zone a densità differenziata, in cui le rosse rappresentano i supporti a densità di materiale più elevata.

A questo punto è utile visualizzare i parametri che è possibile settare per la generazione della struttura dei supporti (Fig.38).



Figura 38: Parametri geometrici per supporti [8] - Amphyon

c. Simulazione Meccanica

Terminate le fasi **a**. e **b**. si prosegue con l'impostazione delle simulazioni: è possibile scegliere tra diverse proprietà di esecuzione, risoluzione e tipologia della mesh e risoluzione di calcolo.

Process	Printability check settings
Consider anisotropy in deformation	Critical plastic strain: 10 % Critical deformation: 1 mm
Heat treatment	⊗ Recoater crash:
Type: Stresses To Zero 🗸	Solver
Release	Fast 0.50 Accurate
Release from base: Symmetric Y Cut-off supports: Symmetric Y	Save results every: 2 layer(s)
	New mesh Start simulation

Figura 39: Parametri simulazione meccanica - Amphyon

La Figura 39 mostra i diversi parametri di calcolo che è possibile settare. È possibile scegliere tra diverse proprietà di esecuzione: considerare la deformazione isoentropica, scegliere di considerare il trattamento termico, in quale modalità eseguirlo e il rilassamento degli stress.

È possibile definire anche la percentuale di deformazione plastica critica e lo spostamento critico. Infine, il livello di accuratezza della simulazione.

Un passo importante da non tralasciare è il *Meshing*: dalla Figura 40 si possono osservare i parametri di matematizzazione, il tipo di mesh

Resolution		Support1		
 Standard 	O Custom	Wall-Supports		
		Thickness:	0.1	mm
Coarse 5.00	Fine			Refined support mesh
Mark anti-		Support1		
Mesh settings		Wall-Supports		
Mesh Type:		Thickness:	0.1	mm
Adaptive mesh	O Gridded mesh	Homogenize O Expand		
✓ Improve surface approximation				7
Avoid very large elements		Meshing options		Coarse mesh representation
Base plate Options				
Mesh baseplate				

Figura 40: Meshing Amphyon

(*Adattativa* o *Statica*) che il risolutore attribuisce al modello e in che modo trattare i supporti (*Homogenize - Expand*).

Questo software, oltre ai tool avanzati per l'ottimizzazione del processo di simulazione e produzione, offre la possibilità di settare i parametri delle macchine e le proprietà del materiale a seconda dell'interesse dell'utente. Tutto questo però deve passare da una fase di calibrazione.

Material data Process parameters Parameter set: Ti6Al4V preset Conventional Parameters Name: Conventional Parameters Name: Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: Ti6Al4V preset Name: <	Settings				\times	Load thermal mater	ial data		- 0	>
Parameter set: Ti6A4V preset Conventional Parameters: Name:: Ti6A4V preset Name:: Name:: Ti6A4V preset Name:: Name:: Ti6A4V preset Name::	V	Material data Process p	arameters			Name: Ti6Al4	IV preset			
General View Name: Name: Tele type Scan speed: 800 mm s ⁻¹ Process efficiency Constant value: 0.35 Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load / calibrate temperature dependent values Load conductivity file Load conductivi		Parameter set: Ti6	Al4V preset						1	
Name: TidA4V preset View Scan speed: Nominal laser power: 300 W Enissivity: 0.3 Hatch distance: 0.1 mm Convection coefficient: 1E-05 W mm ³ K ¹ Layer height: 0.05 mm Scan delay factor: 10 % Calibrate Process efficiency: Constant value: 0.35 Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Load conductivity file Load conductivity file <p< td=""><td>General</td><td>Conventional Parameters</td><td></td><td></td><td></td><td>File type CSV</td><td>~</td><td></td><td></td><td></td></p<>	General	Conventional Parameters				File type CSV	~			
Scan speed: 800 mm s ⁻¹ Parameter type: Volumetric Image: Constant value: 0.03 Nominal laser power: 300 W Emissivity: 0.3 Data Direction: Vertical Image: Constant value: 0.1 mm Convection coefficient: 1E-05 W mm ⁻² K ⁻¹ Data Direction: Vertical Image: Constant value: 0.3 Image: Constant value: 0.35 Image: Constant value: 0.35 Image: Constant value: 0.35 Image: Constant value: 0.3 Image: Constant value: Image: Constant value: 0.3 Image: Constant value: 0.3 Image: Constant value:	6	Name:	Ti6Al4V preset		Apply					
View Nominal laser power: 300 W Emissivity: 0.3 Hatch distance: 0.1 mm Convection coefficient: 1E-05 W mm ³ K ⁻¹ Layer height: 0.05 mm Scan delay factor: 10 % Data Direction: Vertical v Process efficiency: Constant value: 0.35 Load / Calibrate Edit Expected data format Lechanical Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Edit Load conductivity file Load capacity file Wachine Load conductivity file Load capacity file Conductivity file Capacity file Browse Conductivity [W mm ¹ K ⁻¹] Conductivity file Capacity file Capacity file So 0.00249 75 0.00225 100 0.00225 100 0.00225 100 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 0.00225 125 100 0.00255 125		Scan speed:	800 mm s ⁻¹	Parameter type:	Volumetric *	File format	1000			
View Island use prior Island use		Nominal laser power:	300 W	Emissivity	0.3	Decimal Seperator:	Point	~		
Inductional like Image: Convection Connection Income to Convection Connection Income to Convection Connection Income to Convection	View	Hatch distance	0.1 mm	Convection coefficients	1E-05 W mm ⁻² K ⁻¹	Data Direction:	Vertical	~		
Layer height: 0.03 mm Scan delay factor: 10 % Calibrate Sessment Process efficiency Constant value: 0.35 Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Edit Image: Constant value: 0.35 Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Image: Constant value: 0.35 Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Image: Conductivity file Load capacity file Image: Conductivity file Capacity Ji mm ⁻³ K ⁻¹ Temperature Value 50 0.00271 75 0.00225 100 0.00784 125 0.00281 125 0.00250	-	flaten distance.	0.1	convection coencient.	TE 03 WHITE K	Number Seperator:	Comma	*		
ssessment Process efficiency Constant value: 0.35 Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Edit Image: Conductivity file Machine Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Edit Image: Conductivity file Machine Load conductivity file Browse Load capacity file Browse Load capacity file Browse Conductivity file Conductivity [W mm ⁻¹ K ⁻¹] Capacity J mm ⁻³ K ⁻¹] Image: Conductivity [W mm ⁻¹ K ⁻¹] Temperature Value 50 0.00071 n 75 0.00025 125 0.000837 Capacity J mm ⁻³ K ⁻¹]		Layer height:	0.05 mm	Scan delay factor:	10 % Calibrate	11 - London	_			
Constant value: 0.35 Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Edit Conductivity file Load conductivity file Load conductivity file Load capacity file Browse Conductivity file Conductivity file Conductivity file So 0.00671 Temperature Value So 0.00671 Temperature Value So 0.00671 Temperature Value So 0.00074 To 0.00274 To 0.00225 To 0.0025 To 0.005 T	ssessment	Process efficiency				Has neaders:	~			
Load / calibrate temperature dependent values Load/Calibrate Edit Itechanical Itemp, Value 1002,29,184,320,17,17.02,456,149,98,134 Itermal Itermal Itermal Itemp (Value) Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal Itermal	-	Constant value: 0.35				Expected data forma	t			
Image: Second	(ð)	Load / calibrate tempera	ature dependent values	Load/Calibrate	Edit	Temp., Value				
Image: Second conductivity file Load conductivity file Load capacity file Load conductivity file Conductivity file Load capacity file Machine So 0.00671 Machine To 0.00724 125 0.00837 125 125 0.00255 125 125 0.00255 125 125 0.00255 125						320.17 17.02				
Load conductivity file Load capacity file Thermal Browse Conductivity file Load capacity file Wachine Browse Conductivity file Capacity file 100 0.00724 Temperature Value 50 0.00249 100 0.00784 125 0.00255 125 0.00225 125 0.00837 Temperature value 125 0.00226 125 100 0.00256	1echanical					456.149,98.134				
Load conductivity file Load capacity file Browse Browse Conductivity file So 0.00671 Capacity file Conductivity file Capacity file Machine Temperature Value So 0.00071 Temperature Value 100 0.00729 100 0.00252 100 0.00255 125 0.00258 </td <td></td>										
Browse Browse Browse Conductivity [V mm ⁻¹ K ⁻¹] Capacity [J mm ⁻³ K ⁻¹] Capacity [J mm ⁻³ K ⁻¹] Temperature Value 50 0.00671 50 0.00729 100 0.00252 100 0.00784 125 0.00258 125 0.00258 125 0.00258						Load condi	uctivity file		Load capac	ity file
Conductivity [W mm ⁻¹ K ⁻¹] Capacity [J mm ⁻³ K ⁻¹] Temperature Value 50 0.00671 75 0.00252 Machine 100 0.00784 100 0.00255 125 0.00837 125 0.00258	Thermal					E	Browse		Brow	se
Temperature Value Temperature Value 50 0.00671 50 0.00249 50 75 0.00729 100 0.00724 100 0.00255 125 0.00837 125 0.00284 125 0.00284	0					Conductivity [W mm ⁻¹]	(1)	Capacity [J m	m ⁻³ K ⁻¹]	_
50 0.00671 50 0.00249 7 Machine 75 0.00724 75 0.00252 100 0.00784 100 0.00255 125 0.00837 125 0.00284						Temperature Value		Temperatur	e Value	
Machine 75 0.00729 75 0.00252 100 0.00784 100 0.00255 125 0.00259 125 0.00837 125 0.00256 125 0.00256						50 0.00671	^	50	0.00249	^
100 0.00784 125 0.00837 125 0.00837 125 0.00838	Machine					75 0.00729		75	0.00252	
125 0.00837 125 0.00258						100 0.00784		100	0.00255	4
						125 0.00837		125	0.00258	-

Figura 41:Parametri analisi termica e proprietà termiche dei materiali

Nella Figura 41 è possibile visualizzarne alcune: vediamo che è consentito settare parametri termici per il materiale utilizzato, facendo riferimento, ovviamente, ai dati riportati nel *data-sheet* del materiale. È possibile settare la velocità di scansione del laser, la potenza nominale del laser e l'altezza del layer di stampa.

Le proprietà della macchina fanno riferimento alla sola camera di lavoro, quali volume, dimensioni e numero di laser.

Tutto questo permette, ad algoritmi interni, di riprodurre al meglio il processo di stampa e garantire la riuscita ottimale del prodotto.

3.3 Prove preliminari per confronto caratteristiche software

In questa sezione metteremo a confronto i due software, soffermandoci in particolare sulle deformazioni, le tensioni residue e la capacità di generare un file *.stl* del modello compensato. Per rendere i risultati confrontabili, le simulazioni di prova sono state effettuate sul medesimo modello campione, materiale e macchina. I parametri di processo non variano tra le prove effettuate con i due software e fanno riferimento ai parametri utilizzati dal centro interdipartimentale IAM@Polito nel documento [7] per il sistema EOSINT M270 e materiale Ti6Al4V.

Siccome i parametri di processo sono variabili tra superfice di contorno (*Skin*) e volume massivo (*Core*), ciò a cui faremo riferimento per l'esecuzione delle simulazioni è il *Core*.

Parametri di processo per confronto software					
Macchina di simulazione	EOSINT M280				
Materiale di stampa	Ti6Al4V				
Potenza laser (W)	170				
Scan Speed (mm/s)	1250				
Hatching distance (mm)	0.1				
Layer thickness (mm)	0.03				

Tabella 6: Parametri stampa per simulazione software



Figura 42: Modello STL per confronto software

3.3.1 Risultati prove preliminari Inspire Print3D

I risultati della simulazione termomeccanica eseguita con software Inspire Print3D sono i seguenti. In particolare, vedremo come le deformazioni e gli stress residui si manifestano sul modello di riferimento.



Figura 43: Inspire - Andamento dello spostamento su componente di confronto software

La Figura 43 mostra le zone del componente più soggette a deformazione e spostamento ed in modo particolare è possibile visualizzare lo scostamento rispetto alla geometria di riferimento (contorno grigio).



Figura 44: Inspire - Andamento delle tensioni residue su componente di confronto software

In merito agli stress residui si presenta una forte concentrazione di stress nella zona massiva del componente (Fig.44). Questo è prevedibile perché essendo un'area molto ampia, i gradienti termici sono preponderanti e quindi il fenomeno di trazione-compressione e generazione degli stress descritto nel paragrafo §3.1 è inevitabile. Tuttavia, il software non permette di verificare quale sia la direzione preferenziale di tale stress e risulta quindi difficile fare ipotesi sul comportamento della deformazione, come ad esempio, che lo spostamento della base minore sia una conseguenza del ritorno elastico proprio della zona massiva.

Per poter effettuare un confronto delle simulazioni è necessario estrapolare i risultati per alcuni nodi specifici dell'elemento. La Figura 45 riporta i nodi in cui sono stati letti i valori relativi a spostamento e tensioni residue.



Figura 45: Nodi di riferimento per confronto software

Si riportano i valori numeri in Tabella 7; saranno quindi confrontati con i risultati ottenuti, successivamente, attraverso l'applicativo Amphyon.

I dati fanno riferimento allo spostamento nelle tre direzioni spaziali (x, y, z), modulo totale di spostamento e tensioni residue di Von Mises.

Nodo	$x \mathrm{mm}$	$y \mathrm{mm}$	$z \mathrm{mm}$	 s mm	Stress MPa
1	0,008	-0,299	0,715	0,775	62,65
2	0,015	0,101	0,848	0,854	252,20
3	0,002	0,896	0,520	1,036	154,00
4	-0,002	0,080	-0,104	0,131	64,11
5	0,072	0,109	-0,028	0,134	$598,\!10$
6	0,052	-0,204	0,004	0,210	147,20
7	-0,008	0,220	-0,023	0,221	64,88
8	0,050	-0,170	0,152	0,233	149,10
9	-0,068	-0,294	0,719	0,780	63,72
10	-0,043	0,109	0,845	0,853	255,50
11	-0,015	0,905	0,524	1,046	148,70
12	-0,080	0,079	-0,085	0,141	62,63
13	-0,067	0,118	-0,028	0,139	$558,\!60$
14	0,035	-0,202	0,012	0,206	147,40
15	-0,086	0,220	-0,002	0,237	65,72
16	0,028	-0,172	0,174	0,246	157,90

Capitolo III - Simulazione per processi di AM

Noti gli spostamenti e gli stress, il confronto verrà effettuato calcolando lo scostamento dei risultati e valutando quale dei due software rappresenti al meglio la simulazione del processo.

3.3.2 Risultati prove preliminari Amphyon

La medesima simulazione del processo di stampa, con i dati indicati nella Tabella 6, è stata eseguita con l'applicativo. In questo caso però è stato opportuno differenziare due tipologie di simulazioni: una che tenesse conto del post-trattamento termico di distensione e una, invece, che non ne tenesse conto.

La scelta di questa differenziazione è dettata dal fatto che Inspire non permette una selezione del post-trattamento e quindi, non sapendo se

Tabella 7: Dati Inspire per simulazione di confronto

l'algoritmo di quest'ultimo tenesse conto in modo intrinseco del processo di distensione, è stato doveroso chiedersi di trovare una strada che permettesse di comprendere al meglio il processo di simulazione e confrontare in modo corretto i due software.

a. Simulazione <u>senza distensione</u> degli stress residui

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti dalla simulazione Amphyon per la geometria di riferimento (Fig.42) con parametri (Tab.6).



Figura 46: Amphyon - Andamento dello spostamento e stress residui su componente di confronto software - No trattamento termico

In questo caso il software permette di leggere anche l'andamento degli stress nelle diverse direzioni del sistema di riferimento, tuttavia non essendo possibile eseguire un confronto, in questa prima fase ne trascuriamo i risultati.

Si riportano, invece, in Tabella 8 i dati relativi ai nodi di riferimento della Figura 45, a cui si affianca la corrispondente numerazione in Amphyon.

Nodo		$x \mathrm{mm}$	$y \mathrm{mm}$	$z \mathrm{mm}$	 s mm	Stress MPa
125900	1	0,022	-0,608	0,938	1,118	365,31
124742	2	0,015	0,222	0,944	$0,\!970$	994,52
124695	3	-0,014	1,058	0,468	$1,\!157$	179,00
125888	4	0,000	$0,\!163$	-0,154	0,225	316,18
30805	5	0,033	$0,\!158$	-0,066	0,174	1027,66
124686	6	0,047	-0,516	-0,118	0,532	105,47
125882	7	-0,005	0,166	0,043	$0,\!172$	405,74
124678	8	0,044	-0,462	0,161	0,491	118,93
125901	9	0,020	-0,607	0,939	1,118	309,39
124743	10	-0,039	0,224	0,942	0,969	981,93
124697	11	-0,048	1,060	$0,\!470$	1,160	168,31
125889	12	-0,002	0,161	-0,155	0,224	234,28
30822	13	-0,038	0,154	-0,071	$0,\!173$	1020,30
124687	14	-0,012	-0,520	-0,118	0,533	78,58
125883	15	-0,007	0,164	0,042	0,169	358,93
124679	16	-0,022	-0,469	0,161	0,497	81,26

Tabella 8: Dati Amphyon per simulazione di confronto - No trattamento termico

In prima approssimazione è possibile notare come i risultati ottenuti per lo spostamento siano abbastanza confrontabili. Tuttavia, i valori degli stress si presentano abbastanza elevati, dunque è un punto su cui soffermare particolare attenzione durante questo confronto.

b. Simulazione <u>con distensione</u> degli stress residui

Di seguito verranno evidenziati i risultati derivanti dalla simulazione di processo, eseguita con l'applicativo Amphyon, con l'aggiunta del post-trattamento termico di distensione.



Figura 47: Amphyon - Andamento dello spostamento e stress residui su componente di confronto software - Con trattamento termico

Da subito è possibile notare una differenza sostanziale tra i risultati ottenuti con e senza trattamento termico. I valori di deformazione e stress residui si sono abbassati di molto: si hanno spostamenti massimi nell'ordine del decimo di millimetro e tensioni di Von Mises quasi nulle.

È quindi lecito affermare che il primo software, Inspire Print3D, esegua simulazioni in cui il trattamento termico post processo di stampa non sia contemplato.

Un ulteriore risultato utile da osservare, nel caso di simulazione con trattamento di distensione degli stress, è l'andamento delle curvature di deformazione. Ciò permette di valutare le zone che potrebbero risultare fuori tolleranza, come ad esempio una planarità non rispettata (Fig.48).



Figura 48: Andamento delle curvature di deformazione - Amphyon

I risultati ottenuti con quest'ultima simulazione non saranno parte di discussione nella fase successiva di confronto software poiché si evincono differenze sostanziali rispetto alle precedenti.

A questo punto non resta che effettuare una breve discussione dei precedenti risultati, senza post-trattamento, e trarre le conclusioni su quale tra i due software sia in grado di portare a risultati attesi di maggior rilievo sperimentale.

3.3.3 Confronto risultati di simulazione

Per poter effettuare un confronto delle simulazioni effettuate con i due differenti software è stato necessario fare una comparazione dei dati raccolti nelle Tabelle 7 e 8, valutando lo scostamento dello spostamento e degli stress residui nei nodi di riferimento (Fig.45).

Node)	Δs mm	$\Delta x \ \mathrm{mm}$	Δy mm	$\Delta z \ \mathrm{mm}$	Δσ MPa
125900	1	0,343	0,014	-0,309	0,223	302,66
124742	2	0,115	0,000	0,121	0,096	742,32
124695	3	0,121	-0,016	0,161	-0,052	25,00
125888	4	0,094	0,003	0,084	-0,050	252,07
30805	5	0,041	-0,039	0,049	-0,038	429,56
124686	6	0,322	-0,005	-0,313	-0,122	-41,73
125882	7	-0,049	0,003	-0,053	0,066	340,86
124678	8	0,258	-0,005	-0,292	0,009	-30,17
125901	9	0,338	$0,\!087$	-0,313	0,219	245,67
124743	10	0,116	0,005	0,115	0,097	726,43
124697	11	0,114	-0,033	$0,\!155$	-0,054	19,61
125889	12	0,083	0,078	0,082	-0,071	171,65
30822	13	0,034	0,030	0,035	-0,043	461,70
124687	14	0,327	-0,047	-0,317	-0,130	-68,82
125883	15	-0,067	0,079	-0,057	0,044	293,21
124679	16	0,251	-0,050	-0,297	-0,012	-76,64

Tabella 9: Scostamento dei risultati di simulazione

A questo punto è utile valutare il valore massimo, in valore assoluto, e comprenderne l'ordine di grandezza:

	$\Delta s \ \mathrm{mm}$	$\Delta x \ \mathrm{mm}$	$\Delta y \ \mathrm{mm}$	$\Delta z \ \mathrm{mm}$	$\Delta \sigma$ MPa
Δ_{MAX}	0,343	0,087	0,317	0,223	742,31
		Tabella 10: Scos	tamento massimo	C	

Come si può notare, lo scarto, nel caso di deformazione e spostamento, tra i due software, è dell'ordine del decimo di millimetro e quindi accettabile come risultato.

Tuttavia, per quando concerne gli stress residui, le differenze sono sostanziali e non trascurabili come nel caso precedente. Questo risultato così differente potrebbe essere una conseguenza dei seguenti aspetti relativi al software Inspire Print3D:

- Algoritmo di risoluzione;
- Metodo di risoluzione del raffreddamento;
- Accuratezza degli elementi finiti.

Tra queste cause citate la più plausibile potrebbe essere l'accuratezza del *meshing*: come si è potuto evincere, molto semplicemente, dalle Figure 43 e 44, Inspire sfrutta una discretizzazione più semplice, grossolana ed omogenea, mentre al contrario, il software sviluppato dalla Additive Works, sfrutta una mesh personalizzata, ossia è possibile definire una risoluzione che va da grossolana e omogenea ad adattativa e fine.

Da queste analisi e conclusioni si è deciso di proseguire il lavoro finale di tesi, ossia la validazione dei risultati di simulazione per il processo additivo di fusione laser su letto di polvere, utilizzando il software Amphyon. I motivi principali che hanno spinto questa decisione sono dipesi principalmente dai risultati ottenuti dal confronto e dalla tipologia di output che il software è in grado di generare. È infatti possibile esportare modelli con geometria compensata; ciò ha permesso di valutare con più precisione la validazione del processo di simulazione.

Nei capitoli che seguiranno, saranno quindi esposte le attività sperimentali svolte per confrontare e validare i risultati di simulazione.

4 Setup e valutazione sensitività del software Amphyon

Nel precedente capitolo si è introdotta la simulazione come una soluzione al problema delle distorsioni e deformazioni delle geometrie prodotte con tecnologia laser a letto di polvere.

Si è poi passati alla valutazione di due diversi software e ad un loro confronto su aspetti come: affidabilità, precisione, chiarezza e semplicità di utilizzo e capacità di compensazione automatica; ciò ha portato a soffermarsi principalmente sul pacchetto Amphyon prodotto dalla Additive Works, il quale rappresenta il miglior compromesso agli aspetti elencati.

Al fine di garantire una validazione software realistica, è stato necessario valutare la sensitività del software attraverso alcune fasi: calibrazione software e parametri di processo, valutazione deformazioni al variare dei suddetti parametri e valutazione della sensitività del processo di simulazione.

Seguirà quindi, nel presente capitolo, una descrizione dettagliata delle azioni sopra descritte, commentando alcuni dei risultati più significativi.

4.1 Calibrazione software di simulazione

Uno dei passaggi fondamentali per la validazione del processo di simulazione è la calibrazione del software attraverso i parametri materiale e deformazione di campioni ad hoc.

Nella produzione additiva esiste una forte dipendenza tra i parametri di processo scelti e le proprietà dei materiali risultanti, tanto che le parti possono avere proprietà meccaniche molto diverse, a seconda dei parametri macchina scelti. Amphyon viene fornito con una serie di materiali standard e parametri di processo già settati attraverso simulazioni calibrate e testate durante lo sviluppo. Negli approcci convenzionali i parametri di processo vengono determinati in simulazioni su micro scala, il che rende una ricalibrazione e convalida della simulazione potenzialmente complicata, instabile e richiede dati sui materiali molto più complessi [8]. Amphyon è stato implementato con l'obiettivo di evitare tali approcci, sviluppando un approccio basato su esperimenti molto più efficienti alla calibrazione dei parametri di simulazione.

L'interfaccia (Fig.49) per la calibrazione dei parametri di processo è accessibile tramite *Menu Settings* e scheda *Simulazione Meccanica*.

V	Materials Result settings	
	Material *	
General		
	Name: New material	
Minu	Last result edit: 0001/01/01 at 00:00	
view	Comment:	
000		
ssessment	Yield stress: 0 MPa Poisson's ratio: 0	
	Young's modulus: 0 MPa Layer thickness: 0.05 mm	
	Bending of specimen: 0 mm	
Mechanical	Anisotropic deformations	
	Parallel: 0 mm	
	Orthogonal: 0 mm	
Thermal	Inherent strains: Calibration needed	
9	Advanced settings	
9		
Machine		
	Calibrate Apply changes Und	0

Figura 49: Interfaccia di calibrazione materiale e deformazione

L'approccio di calibrazione si realizza attraverso l'utilizzo della geometria a sbalzo o comunemente detta *Pettine* (Fig.50) e a seconda delle preferenze di scansione del laser, è necessario generare uno, due o tre campioni. Ciò permetterà di ottenere una calibrazione più precisa e basata sull'anisotropia del materiale.

A questo punto è utile dare una panoramica su come eseguire questo processo e quali sono i passi più importanti da seguire per ottenere una calibrazione ottimale.



Figura 50: provino di calibrazione

Il meccanismo della calibrazione è dimostrabile attraverso i risultati di alcune simulazioni eseguite sul provino a pettine:

sulla parte superiore del componente, secondo la direzione longitudinale (Fig.51a), si concentra la maggior parte degli stress residui; ciò indurrà, in fase di taglio e distacco dalla piattaforma di costruzione, un rilassamento delle tensioni (Fig.51b) e una conseguente deformazione, o meglio flessione, del provino (Fig.51c).



Figura 51: a) Andamento stress residuo in stampa - b) Rilassamento stress residui e deformazione - c) Bending

A questo punto nota la fisica del problema e i parametri della polvere da datasheet, quali *Coefficiente di Poisson, Modulo di Young* e *Campo* *di Stress*, la calibrazione sta solamente nella valutazione della flessione massima del provino reale prodotto.

Per la valutazione della deformazione è essenziale definire un job di stampa con diversi orientamenti del modello, non sottoporre il provino a post-trattamento termico, in modo da evitare un rilassamento eccessivo delle tensioni, e tagliare il provino dalla base secondo la direzione longitudinale.



Figura 52: Processo di valutazione distorsione provino

A questo punto si può effettuare l'ispezione e la valutazione della flessione (Fig.51c) attraverso strumenti di misurazione avanzati o di reverse engineering, come la scansione 3D.

Ottenuta la stima, il passo successivo è immettere tale valore nelle impostazioni di calibrazione del software, mostrate in Figura 49, e lanciare la calibrazione.

Per il presente caso di studio, i dati del materiale (Tab.11) da cui partire per effettuare la simulazione stati reperiti dal datasheet di riferimento per la macchina EOSINT M270 Dual mode:

Ti6Al4	V
Modulo di Young	110 GPa
Yield stress	1.03 GPa
Coefficiente di Poisson	0.3
Layer thickness	30 µm

Tabella 11: Proprietà materiale Ti6Al4V per calibrazione

Si riportano, per completezza, i passaggi significativi che hanno portato alla definizione della deformazione dei provini.



Capitolo IV - Setup e valutazione sensitività del software Amphyon

Figura 53: Produzione e taglio provino di calibrazione

La Figura 53 mostra la piattaforma di costruzione con i campioni di calibrazione: dalla Figura 53a si può comprendere bene la disposizione sul piano di costruzione, con riferimento alle diverse tipologie di scansione riportate nella Figura 53c.

La Figura 53b mostra invece la fase di taglio, effettuata con tecnologia di elettroerosione a filo, ed una prima entità approssimata delle deformazioni.

Ultimata la fase di produzione e taglio, si passa alla misurazione, che può essere effettuata con diversi strumenti. In questa sede si è fatto riferimento a tecnologie di scansione ottica; la Figura 54 mostra i due stadi di acquisizione e post elaborazione.



Figura 54: Scansione e generazione STL per valutazione bending con GOM ATOS COMPACT SCAN 2M

Attraverso l'applicativo GOM-Inspect, si è poi effettuata la valutazione della deformazione sui tre provini, secondo le indicazioni riportate in Figura 51c; la generazione di geometrie di riferimento, quali piani e punti ne ha poi facilitato la stima.

Si riporta, a titolo di esempio, il processo di misura effettuato sul provino a scansione parallela e partendo dalla generazione di un primo piano di riferimento (Fig.55).



Figura 55: Generazione geometrie di riferimento per valutazione bending

Un secondo piano di riferimento è stato generato sulla superfice superiore del provino, utilizzando gli stessi parametri di approssimazione della Figura 55; note le geometrie di riferimento, non resta che valutarne la distanza, attraverso la funzione di misura del software.

Nome Put	nto 1⇔Punto 2	•
Punto 1	1 Punto 1	•
Punto 2	🝂 Punto 2	•
Distanza:		2.276mm
	Nome Pu Punto 1 Punto 2 Distanza:	Nome Punto 1→Punto 2 Punto 1 1 Punto 2 ▲↑ Punto 2 ▲↑ Distanza: ■

Figura 56: Stima bending

Per facilità di rappresentazione e comprensione, si riportano in tabella i risultati relativi ai tre provini. Per l'avvio della calibrazione, i dati estrapolati e presenti in Tabella 12, fanno riferimento alla finestra di settaggio vista nella Figura 49.

Bending - Misura	a dei provini
Average Scanning	$2.740~\mathrm{mm}$
Parallel Scanning	2.276 mm
Orthogonal Scanning	2.090 mm
Taballa 12: Valari di daf	formaziona provini

4.2 Analisi sensitività di calcolo e simulazione

Come descritto nell'introduzione del corrente capitolo, per garantire una validazione software realistica, viene innanzitutto valutata la sensitività.

È stato necessario testare l'influenza dei parametri di processo, o meglio la loro variazione, sui risultati finali di simulazione.

A tal fine sono state eseguite un certo numero di simulazioni in cui i parametri venivano variati con una sequenza e quantità predefinite: al variare di un parametro, si assegna ai rimanenti il valore nominale. Per comprendere al meglio il processo è utile definirne le variabili in gioco ed entrare più nel dettaglio.

Parametri di valutazione ser	nsitività e valore nominale
Laser Power	170 W
Scan Speed	1250 mm/s
Hatch distance	0.1 mm
Layer thickness	$30 \ \mu m$

Tabella 13: Parametri di simulazione nominali

Lo studio è stato effettuato variando dal valore nominale del $\pm~20\%$ con incremento del 10%.

Le simulazioni, meccaniche e termiche, sono state eseguite mantenendo invariato il modello di discretizzazione e l'accuratezza di calcolo di Amphyon (Tab.14).

	Meccanica	Termica
Mesh	Adattativa	Adattativa
Element size	2	2
Accuratezza	0.5	0.2
Base (°C)	100	100

Tabella 14: Metodo di calcolo software per valutazione sensitività

Si riportano ora alcune tabelle a cui faranno riferimento le simulazioni effettuate: in particolare vengono proposte quattro tabelle differenti in cui un parametro viene variato e i rimanenti assumono valore nominale.

	Laser Power	Scan-Speed	Hatch distance	Layer thickness
- 20%	136 W	1250 mm/s	0.1 mm	30 µm
- 10%	153 W	$1250~\mathrm{mm/s}$	0.1 mm	30 µm
+10%	187 W	$1250~\mathrm{mm/s}$	0.1 mm	30 µm
+20%	204 W	$1250~\mathrm{mm/s}$	0.1 mm	30 µm
	Tabella 15	: Prove di simulazio	ne con Potenza Laser va	riabile
	Laser Power	Scan-Speed	Hatch distance	Layer thickness
- 20 %	170 W	1000 mm/s	0.1 mm	30 µm
- 10%	170 W	1125 mm/s	0.1 mm	30 µm
+10%	$170 \mathrm{W}$	$1375 \mathrm{~mm/s}$	0.1 mm	30 µm
+20%	$170 \mathrm{W}$	$1500 \mathrm{~mm/s}$	0.1 mm	30 µm
	Tabella 16	: Prove di simulazio	ne con Velocità Laser va	ariabile
	Laser Power	Scan-Speed	Hatch distance	Layer thickness
- 20%	Laser Power 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s	Hatch distance	Layer thickness $30 \ \mu m$
- 20 % - 10 %	Laser Power 170 W 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm	Layer thickness 30 μm 30 μm
- 20% - 10% +10%	Laser Power 170 W 170 W 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm	Layer thickness 30 μm 30 μm 30 μm
- 20% - 10% +10% +20%	Laser Power 170 W 170 W 170 W 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm 0.12 mm	Layer thickness 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm
- 20% - 10% +10% +20%	Laser Power 170 W 170 W 170 W 170 W 170 W 170 W 170 H 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s Prove di simulazion	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm 0.12 mm he con Hatch distance va	Layer thickness 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm
- 20% - 10% +10% +20%	Laser Power 170 W 170 W 170 W 170 W 170 W Tabella 17: Laser Power	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s Prove di simulazion Scan-Speed	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm 0.12 mm ne con Hatch distance va Hatch distance	Layer thickness $30 \ \mu m$ $ariabile$ Layer thickness
- 20% - 10% +10% +20%	Laser Power 170 W 170 W 170 W 170 W 170 W Tabella 17: Laser Power 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s Prove di simulazion Scan-Speed 1250 mm/s	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm 0.12 mm he con Hatch distance va Hatch distance 0.1 mm	Layer thickness 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 24 μm
- 20% - 10% +10% +20% - 20% - 10%	Laser Power 170 W 170 W 170 W 170 W 170 W Tabella 17: Laser Power 170 W 170 W 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s Prove di simulazion Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm 0.12 mm he con Hatch distance va Hatch distance 0.1 mm 0.1 mm	Layer thickness 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 24 μm 27 μm
- 20% - 10% +10% +20% - 20% - 10% +10%	Laser Power 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s Prove di simulazion Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm 0.12 mm he con Hatch distance va Hatch distance 0.1 mm 0.1 mm 0.1 mm	Layer thickness 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 20 μm 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 310 μm 32 μm 23 μm 33 μm
- 20% - 10% +10% +20% - 20% - 10% +10% +20%	Laser Power 170 W	Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s Prove di simulazion Scan-Speed 1250 mm/s 1250 mm/s 1250 mm/s	Hatch distance 0.08 mm 0.09 mm 0.11 mm 0.12 mm he con Hatch distance va Hatch distance 0.1 mm 0.1 mm 0.1 mm 0.1 mm	Layer thickness 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 30 μm 21 μm 224 μm 237 μm 33 μm 36 μm

Sono state effettuate dunque, un totale di sedici simulazioni: per ognuna sono stati estratti i file STL delle geometrie deformate e dati del processo di stampa virtuale. I primi hanno permesso di valutare se le variabili in gioco influenzassero il processo di simulazione in termini di deformazione; i dati del processo hanno permesso, invece, di valutare le eventuali variazioni di stress residui, temperature finali e tempi di produzione. Nel paragrafo che seguirà verranno esposti i risultati ottenuti ed eventuali commenti sul comportamento del processo.

4.2.1 Risultati analisi di sensitività

Uno dei risultati più rilevanti che si vuole mettere in evidenza e che si poteva prevedere, è l'andamento della temperatura di fine processo: a seconda della variazione del parametro di riferimento, vi è una crescita o decrescita di questa variabile. Tuttavia, questo non è l'unico effetto; per comprendere al meglio, verranno mostrati alcuni grafici ed ulteriori andamenti che aiuteranno a comprendere al meglio i risultati.



a. Andamento della temperatura finale

Figura 57: Andamento delle temperature al variare dei parametri di processo

Come si può notare al crescere dei parametri *Scan Speed* e *Hatch Distance* le temperature raggiunte allo stadio finale tendono a diminuire, con un decremento di circa:

$\Delta T \cong 5 \ ^{\circ}C.$

Un risultato atteso, dato che all'aumentare della velocità di scansione ed Hatch Distance, è presente un minor stazionamento e accumulo di calore.

In merito al parametro *Laser Power* è del tutto lecito presupporre una proporzionalità diretta con la temperatura; i risultati, infatti non hanno confutato tale ipotesi e dalla Figura 57 è possibile stimare un andamento crescente.

Un parametro che non ha avuto influenza sulla variazione di temperatura è lo spessore del layer. Al variare dello spessore, la temperatura assume un valore costante ed assestato nell'intorno di: $T_{LT} \cong 142,5\ ^{\circ}C$

La simulazione del modello a parametri nominali mostra, tuttavia, una temperatura di fine processo di circa:

$$T_{End} = 143 \ ^{\circ}C$$

b. Andamento Stress residui





La Figura 58 mostra le zone del modello in cui si concentrano maggiormente gli stress residui: i dati di riferimento per le analisi sono stati acquisiti in prossimità di tali aree e nella fase finale del processo di simulazione, in particolare dopo la fase di post-trattamento termico di distensione.

Ciò ha portato al seguente risultato (Fig.59):



RESIDUAL STRESS

Figura 59: Andamento degli Stress residui al variare dei parametri di processo

I risultati più evidenti fanno riferimento ai parametri di *Laser Power* e *Scan Speed.* Con il primo vi è una correlazione proporzionale; all'aumentare della potenza emerge una crescita costante degli stress residui con valore massimo di circa:

$\sigma_{max} = 6 \cdot 10^{-2} MPa$

La variazione del secondo parametro mostra un andamento inversamente proporzionale: un aumento della velocità di scansione porta ad una riduzione delle tensioni interne.

Questi due fenomeni risultano concordi al trend visto per le temperature e rendono quindi il risultato più chiaro: un aumento o una diminuzione delle temperature di processo, causano un corrispettivo aumento e diminuzione dei gradienti termici e quindi degli stress residui. Gli ulteriori parametri mostrano un andamento oscillante e che sarebbe opportuno valutare con analisi più dettagliate.

c. <u>Andamento Tempi di stampa</u>

Un ulteriore risultato acquisito dalle simulazioni è correlato ai tempi di stampa previsti. La Figura 60 riporta l'analisi dei dati ottenuti dal software:



Figura 60: Andamento al variare dei parametri di processo

Come si può notare, i valori del *time build* sono molto vicini ai risultati ottenuti con parametri nominali, tranne che per le variazioni dello spessore layer: come si può notare, una minima variazione dello spessore comporta, a parità di altezza dei pezzi, un salto importante del tempo di esecuzione; infatti, occorrerà depositare e fondere un diverso numero di strati.

In generale si può quindi affermare che la variazione dei parametri di processo ha portato ad una sostanziale differenziazione in termini di temperature finali. Quest' ultima però non ha influenzato le tensioni interne, le principali cause di deformazione e ritorno elastico.

Ci si aspetta quindi uno scostamento minimo, se non nullo, delle deformazioni.

d. <u>Valutazione delle deformazioni</u>

A questo punto non resta che valutare lo scostamento, in termini di deformazione, dal modello simulato con condizioni nominali. Come precedentemente anticipato non ci si aspetta un risultato che mostri un notevole scarto, tuttavia è utile verificare con quale grado di precisione il software è in grado di calcolare la deformata.

Amphyon permette, per ogni studio, di estrapolare un file CAD STL delle geometrie deformate e/o compensate.

La valutazione delle deformazioni è stata effettuata attraverso il software di ispezione GOM-Inspect: è sufficiente importare le due geometrie STL, di cui si vuole effettuare il confronto, in due diversi formati, tipo Mesh e tipo CAD.

Il software propone in modo automatico all'utente, in fase di importazione, quale formato utilizzare; non è importante un ordine. Successivamente si prosegue con l'allineamento dei modelli e infine al confronto delle superfici.

Un primo confronto è stato effettuato tra la deformata ottenuta con i valori nominali (Tab.6) e la geometria finale derivante dal parametro Laser Power +20%. Questa decisione giunge dall'osservazione delle Figure 57 e 59: è evidente come un valore più elevato di potenza abbia portato ad un conseguente aumento della tensione interna.

Tuttavia, dal momento che il valore di quest'ultima presenta un ordine di grandezza trascurabile, è comunque atteso uno scostamento dei risultati molto ridotto.

La Figura 61 riporta il confronto effettuato tra modello deformato ottenuto con parametri di processo nominali e modello simulato con parametro Laser Power +20%.



Capitolo IV - Setup e valutazione sensitività del software Amphyon

Figura 61: Confronto geometrie. Nominal VS Laser Power+20%

Come si può notare, le ipotesi fatte precedentemente ed estrapolate dalle analisi sugli stress interni sono risultate veritiere: la geometria ha subito delle ulteriori deformazioni in prossimità delle regioni sottoposte a tensione interna, dell'ordine di grandezza del micron.

Lo spigolo superiore vede una eccessiva deformazione, che si presenta in modo netto e staccato rispetto alle aree vicine. Questo potrebbe essere l'effetto della concentrazione degli stress in una zona che richiederebbe l'impiego di strutture di supporto.

In linea generale l'intero corpo non ha subito deformazioni e può definirsi in tolleranza con la geometria ottenuta dai parametri nominali.
Per facilitare la lettura della Figura 57 si riportano alcuni dati rilevanti:

ε _{min} -30 μm	ε_{max}	+ 30 μm
-------------------------	---------------------	---------

La variazione degli altri parametri, Hatch Distance e Scan Speed, ha mostrato sostanzialmente lo stesso risultato: le aree che hanno subito un minimo scostamento sono le medesime del caso già descritto ma più o meno pronunciate a seconda del caso.

Per semplicità di rappresentazione si riportano delle tabelle riassuntive in cui si mostra lo scarto minimo e massimo più significativo e con variazione dei parametri del $\pm 20\%$. Le analisi effettuate con una variazione del $\pm 10\%$ hanno prodotto comunque dei risultati importanti, tuttavia non rilavanti come i suddetti.

	$\boldsymbol{\varepsilon}_{min}$	ε_{max}
Scan Speed $+20\%$	-30 μm	+30 μm
Hatch Distance $+20\%$	-30 μm	+30 μm
Taballa 10: Secontamento minimo a	maggima nor noran	ootri UD o SS

Tabella 19: Scostamento minimo e massimo per parametri HD e SS

Una ulteriore osservazione che è utile fare, soprattutto per la valutazione della sensitività del software, è la riduzione della scala di deformazione: il risultato ottenuto permette di effettuare una valutazione della sensitività e confermare la capacità del software di ottenere risultati confrontabili ad alta risoluzione.

Abbassando la scala di riferimento a $\pm 10 \,\mu m$ le mappe degli scostamenti tra i due modelli risultano:





Capitolo IV - Setup e valutazione sensitività del software Amphyon

Figura 63: Confronto deformazioni a scala ridotta - Nominal VS Hatch Distance+20%





Figura 64: Confronto deformazioni a scala ridotta - Nominal VS Scan Speed+20%

soprattutto per i primi due casi (Fig.62) e (Fig.63); per il parametro *Scan-Speed* vi sono però alcune differenze: si presenta un andamento non omogeneo sulle pareti superiori con evidenti zone in compressione; la causa potrebbe essere, come nel caso dello spigolo superiore, l'effetto di una concentrazione delle tensioni dovute alla presenza di uno spigolo vivo.

La parte inferiore risulta invece in perfetta tolleranza con il modello nominale, effetto non verificatosi nei precedenti casi. Caso ancora più importante e non ancora discusso è relativo al parametro *Layer-Thickness*.

Confrontando i modelli ottenuti dopo la simulazione del processo si è potuto notare che l'effetto di distorsione è molto più evidente, come ipotizzato durante la discussione dei risultati sull'andamento dei tempi di stampa (*Sezione C*).

Per comprendere al meglio è utile osservare i risultati raccolti dall'ispezione:



Figura 65: Confronto deformazioni a scala ridotta - Nominal VS Layer Thickness+20%

 ε_{min} -80 μm ε_{max} +80 μm

Tabella 20: Scostamento massimo di deformazione - Layer Thickness+20% VS Nominal

4.3 Valutazione della sensitività del software

In generale in questo capitolo è stato presentato il processo seguito per poter effettuare una valutazione e validazione delle simulazioni e della risoluzione di calcolo del software Amphyon, caso di studio per la stesura di questo elaborato. Si è partiti da un iniziale processo di calibrazione, per passare ad una successiva fase di esecuzione delle simulazioni a parametri variabili.

I risultati sono stati ottenuti simulando il processo sia dal punto di vista meccanico che termico, estrapolando i dati di fine processo su tensioni residue dopo processo di distensione, temperatura finale, tempo di stampa e deformazioni. Per queste ultime, seppur interpretabili mediante scale di equivalenza presenti sul software, è risultato opportuno verificare gli scostamenti globali rispetto al modello CAD nominale, attraverso un software esterno per il collaudo dimensionale da dati virtuali.

Anche se alcuni confronti hanno riportato solo un limitato scostamento dal campione nominale deformato, si è riusciti ad effettuare una valutazione finale della sensitività.

Visti i risultati ottenuti e i riscontri con i confronti effettuati, si può concludere che il software è in grado di effettuare un calcolo raffinato e con un'alta risoluzione, del processo di fusione laser su letto di polvere.

L'ultima fase di questo lavoro riguarda la validazione del software attraverso l'analisi e il confronto di un modello reale. Questa fase prevede la produzione del componente con tecnologia laser a letto di polvere e la successiva acquisizione della geometria effettiva attraverso tecnologie di reverse engineering.

I risultati e le tappe di questo ultimo sviluppo verranno indicati e descritti nel prossimo capitolo.

5 Validazione della simulazione con SW Amphyon

L'ultimo capitolo di questo elaborato descrive le fasi del processo di validazione e i risultati, percorrendo le attività principali dell'indagine sperimentale che hanno reso possibile il lavoro.

Dagli studi effettuati sull'analisi di sensitività si è potuto constatare quanto il software Amphyon sia sensibile e preciso nel calcolo del processo virtuale per la tecnologia laser su letto di polvere. Si procede ad una validazione sperimentale attraverso il confronto di un modello reale ed un modello simulato.

5.1 Produzione del modello di riferimento

Il modello campione utilizzato per la fase di validazione è il medesimo visto per lo studio della sensitività, ossia un tubo a sezione quadrata disposto secondo una geometria romboidale: $Modello \ AWbox$ - ingombri e dimensioni principali sono riportati in Figura 66.



Spessore di riferimento: 1.67 mm

Figura 66: Modello di riferimento per produzione e confronto

La produzione è stata realizzata con la macchina EOSINT M270 Dual Mode, prodotta dalla EOS, collocata nei laboratori del centro di ricerca interdipartimentale IAM@Polito.

Tale macchina è dotata di una sorgente laser in fibra di Itterbio [Yb] utilizzata per fondere polveri metalliche con una potenza continuativa fino a 200 W, uno spot di 100 μm , una risoluzione del layer che va dai 20 ai 40 μm e una velocità di scansione che giunge sino a 7000 mm/s in atmosfera inerte (Fig.67).

LOSINT M 220	evs		
		Dati macchina EO	SINT M270 Dual Mode
	М	ax Laser Power	200 W
		Hatch Distance	$100 \ \mu m$
	L	ayer Thickness	$20 \div 40 \ \mu m$
	N	Iax Scan Speed	$7000 \mathrm{~mm/s}$
	V	olume di lavoro	$250\times250\times215$ mm

Figura 67: EOSINT M270 e dati macchina

Durante il processo di costruzione, la camera di lavoro viene riempita di Argon per un contenuto di ossigeno limitato allo 0,1%, necessario ad ostacolare la reattività della polvere metallica.

Una lama deposita lo strato di polvere metallica sulla base e il raggio laser porta a fusione le regioni di interesse, secondo la geometria CAD 3D. Successivamente la piattaforma si muove verso il basso di una distanza pari allo spessore del layer fissato; il processo proseguirà fino al completamento della fabbricazione del componente [7].

Il materiale impiegato per il processo di stampa è la lega di titanio Ti6Al4V, di fornitura EOS. Per ridurre le tensioni termiche residue la piattaforma della camera di lavoro è stata mantenuta ad una temperatura di 100 °C.

Inoltre, per evitare vibrazioni e assestamenti delle polveri in zone indesiderate, causati dall'urto della lama di ricoprimento con i bordi del modello eccessivamente lunghi, è stato necessario, come consuetudine del processo, orientare le parti con un angolo di 5° rispetto al sistema di riferimento della piattaforma di costruzione (Fig.68), evitando così deformazioni indesiderate. Il modello è stato prodotto senza supporti supplementari.



Capitolo V - Validazione della simulazione con SW Amphyon

Figura 68: Piattaforma di stampa e orientamento modelli

La Tabella 21 mostra i parametri di processo utilizzati per la produzione del modello finale.

Parametri d	li processo
Laser Power	170 W
Scan Speed	$1250 \mathrm{~mm/s}$
Hatch distance	0.1 mm
Layer thickness	$30 \ \mu m$
	30 P

Tabella 21: Parametri di processo per produzione modello reale

La Figura 68 è utile per comprendere anche il risultato finale di produzione e da essa è possibile notare come il componente abbia subito le deformazioni previste. Tuttavia, è necessario, ai fini di una validazione corretta, procedere con una verifica sperimentale.

Prima di passare alla descrizione della prossima fase, si propongono ulteriori figure che riportano, e fanno comprendere meglio, l'estensione delle deformazioni.



Capitolo V - Validazione della simulazione con SW Amphyon

Figura 69: Deformazione post-stampa - acquisizione laterale e frontale

Tuttavia, per effettuarne una stima ancora più accurata è necessario eseguire un primo trattamento di distensione in forno ed un successivo taglio dalla base; quest'ultimo viene effettuato con una tecnologia di precisione: l'elettroerosione a filo, EDM.



Figura 70: Elettroerosione a filo EDM su modello reale

5.2 Acquisizione geometria - Sistemi RE

Ai fini della valutazione delle deformazioni è necessario avere a disposizione modelli digitali del componente prodotto che permettano il confronto dimensionale e geometrico. Si ricorre, pertanto, alle tecnologie di Reverse Engineering.

Una prima tecnologia di acquisizione utilizzata è la scansione ottica a luce strutturata, facendo particolare riferimento ai sistemi GOM.

Questa fase prevede dei trattamenti preventivi sul componente, tali da garantire un'acquisizione completa e priva di errori: è essenziale pulire bene le parti di interesse da eventuali residui di polvere metallica, trattare le superfici riflettenti con spray opacizzanti e posizionare i marcatori.

Per componenti di grosse dimensioni, come descritto nei paragrafi in cui è stato introdotto e descritto il processo delle tecnologie di scansione senza contatto, l'uso dei marcatori è indispensabile, soprattutto per i software di post-elaborazione che devono confrontare e gestire diverse acquisizioni e che necessitano di riferimenti fissi per l'allineamento automatico delle diverse viste.



Figura 71: Acquisizione del modello reale con GOM ATOS - CORE 300

La Figura 71 mette in evidenza il posizionamento dei marcatori e la modalità di registrazione delle immagini.

Il componente, ai fini di una buona rilevazione, è stato posizionato su tavola rotante, in modo da facilitarne la movimentazione tra le diverse acquisizioni: è necessaria oltretutto la presenza di un operatore che gestisca il software e garantisca la riuscita delle riprese movimentando manualmente il componente scansionato.

Successivamente, coadiuvato dal Prof. Minetola, si è passati alla gestione e pulizia dei diversi punti e generando un file STL che renda possibile il confronto per la validazione.



Il risultato raggiunto è stato dunque il seguente (Fig.72):

Come si può notare, l'eccessiva lunghezza del modello ha comportato l'impossibilità di completare l'acquisizione delle pareti interne. Ciò non dovrebbe, tuttavia, creare inconvenienti per il confronto con il modello virtuale, ritenendo il risultato valido, seppur limitato alla superficie esterna del componente.

Ai fini di una migliore comprensione dei risultati, si è ritenuto giusto sottoporre il modello reale ad ulteriori acquisizioni ma eseguite con uno strumento totalmente differente e che permettesse la completa digitalizzazione del pezzo: la *Tomografia*.

Questa tecnologia, citata brevemente nel Capitolo 2, permette di acquisire e digitalizzare componenti reali tramite una scansione a Raggi X e che concede la possibilità ed il vantaggio di ispezionare internamente i componenti e valutarne le eventuali porosità.

A tal proposito si riportano e descrivono brevemente i passaggi più significativi del processo di digitalizzazione con tomografo industriale GE-PHOENIX - V/Tome/x S.

Figura 72: STL del modello reale



Capitolo V - Validazione della simulazione con SW Amphyon

Figura 73: Acquisizione ed elaborazione modello reale con Tomografia GE-PHOENIX - V $|{\rm Tome}| \ge S$

La Figura 73 mostra le diverse fasi eseguite in laboratorio per la digitalizzazione del modello reale, quali: posizionamento ed orientamento modello nella camera di lavoro, setup macchina da computer di bordo e post-elaborazione su applicativo esterno. L'eccessivo sviluppo longitudinale ha reso inevitabile l'utilizzo di una scansione multipla e una successiva sovrapposizione delle scansioni. Posizionare il modello con un orientamento diverso avrebbe richiesto una potenza del fascio X-Ray troppo elevata per l'attraversamento di spessori maggiori.

I parametri macchina sono riportati nella Tabella 22.

Parametri di	acquisizione
Risoluzione	66.844 μm
Potenza	235 kV a 110 <i>µA</i>
Immagini Acquisite	1000
Sensitività	4000
Tabella 22: Param	etri tomografia

Capitolo V - Validazione della simulazione con SW Amphyon

L'effetto della scansione multipla e i risultati ottenuti dalla digitalizzazione si possono osservare nella Figura 74.



Figura 74: Stl del modello reale

La tecnica tomografica ha consentito la digitalizzazione dell'intero modello, comprese le pareti interne, che non era stato possibile acquisire con la scansione ottica.

Tuttavia, si procederà ad con un confronto dei risultati tra le due tecniche, così da valutare eventuali scostamenti.

5.2.1 Confronto scansione ottica e tomografia

In questa breve sezione vengono messe a confronto i risultati delle due diverse tipologie di acquisizioni: scansione ottica e tomografia.

Attraverso l'ausilio del software di ispezione GOM-Inspect, i due file digitali del componente reale sono stati messi a confronto, in modo da valutarne gli eventuali scostamenti e scegliere il modello di riferimento per le analisi finali di validazione. Una volta importate le geometrie di riferimento sul software, dopo una prima fase di allineamento, si sono ottenuti i seguenti risultati:



Figura 75: Confronto scansione ottica e tomografia

Come è possibile notare dalla Figura 75, gli scostamenti massimi tra scansione e tomografia oscillano tra i valori $\pm 100 \,\mu m$ e con una concentrazione tra $\pm 60 \,\mu m$, come descritto dall'istogramma.

Una osservazione molto importante da fare, osservando la mappa colorata sul componente, è che gli scostamenti massimi si verificano in corrispondenza di spigoli vivi: ciò potrebbe far ipotizzare che la differenza tra i due modelli non sia dovuto ad un errore di acquisizione ma ad un errore di approssimazione, discretizzazione e triangolarizzazione delle superfici in fase di post-elaborazione.

Tuttavia, se si porge l'attenzione alle superfici piane del modello, si può notare che lo scostamento è minimo e prossimo allo zero.

È quindi lecito affermare che entrambi i modelli rappresentano correttamente la geometria reale e che entrambi sono adeguati alle analisi finali di validazione.

Ciò nonostante, dato che la tomografia ha garantito la completa acquisizione del campione, non tralasciando alcuna area, si è deciso di proseguire il lavoro con i risultati da essa ottenuti.

5.3 Confronto e validazione dei risultati

L'ultima fase di questo lavoro di tesi si concentra sulla descrizione dei risultati ottenuti dal confronto dimensionale e geometrico tra geometria reale e geometria risultante dalla simulazione attraverso l'applicativo Amphyon.

Si ricorda che simulazione e produzione sono state eseguite mantenendo fissi i parametri macchina ed eseguendo un processo di calibrazione software secondo i dati del materiale e i risultati delle deformazioni dei provini.

I primi risultati che si riportano fanno riferimento al processo di simulazione (Fig.76):



Figura 76: Risultati deformazione modello - Parametri di processo reali

il software di simulazione mostra una deformazione massima del componente sullo spigolo posteriore destro, come evidenziato in figura, con uno scostamento massimo rispetto alle dimensioni nominali di circa 3 mm.

[Amphyon] $\varepsilon_{max} = 3.29 mm$

A tal proposito è utile effettuare un controllo sulla sensitività di digitalizzazione del software Amphyon sul modello deformato e del software di ispezione GOM-Inspect: dopo aver effettuato l'esportazione della geometria deformata in formato STL, si procede alla verifica delle

deformazioni e degli spostamenti nodali su software di ispezione, mettendo a confronto con il modello geometrico nominale di Figura 66.



Figura 77: Analisi sensitività software di ispezione

Dalla Figura 77 si può osservare, che come riportato dal software di simulazione, lo spostamento massimo si ha in corrispondenza dello spigolo posteriore destro e con medesimo valore.

```
[Inspect] \varepsilon_{max} = 3.29 mm
```

Appurato l'ottimo risultato ottenuto in termini di sensitività, si procede con il confronto di validazione, eseguito tra i due modelli deformati: reale, ottenuto da analisi tomografica, e virtuale, estratto dal software di simulazione.

Dopo l'importazione delle geometrie, una come riferimento primario ed un'altra come modello di confronto, si passa ad una preliminare fase di allineamento e successivamente alla valutazione finale degli scostamenti; dalla Figura 78 è possibile fare una prima stima approssimata dello scarto, distinguendo le aree blu e grigie.



Figura 78: Allineamento dei modelli finali

È possibile, inoltre, visualizzare il risultato finale del confronto: attraverso una mappa cromatica si evidenziano le aree che presentano maggior scostamento rispetto al modello simulato. La Figura 79 mette in evidenza come la maggioranza degli scostamenti si concentra nelle regioni ove le deformazioni sono preponderanti e non sulle superfici circostanti. Quest'ultimo aspetto permette comunque di validare parzialmente il processo di simulazione e spostare l'attenzione sulla ricerca dei principali fattori che non rendono la corrispondenza aderente al 100%.



Figura 79: Confronto geometrie - Reale vs Simulata

La differenza massima misurata, in corrispondenza delle zone a maggior deformazione è comunque nell'ordine del decimo di millimetro, molto alta se paragonata alle tolleranze ingegneristiche. In generale si può affermare che il software è in grado di prevedere molto bene le deformazioni a cui il prodotto della tecnologia additiva è soggetto. È inoltre utile osservare come la previsione sull'andamento delle curvature dovute alle deformazioni e sulla forma finale sia molto aderente al risultato reale.

Un dettaglio, non trascurabile, è l'effetto della delaminazione dei layer sullo spigolo finale superiore:



Figura 80: Vista in sezione dei due modelli a confronto

come riportato in Figura 80, dal *Dettaglio A*, è possibile constatare come il modello simulato abbia correttamente predetto il fenomeno mostrandone il relativo risultato deformato.

Sempre dalla Figura 80 è possibile verificare la ottima corrispondenza delle superfici (1a-1b) e delle deformazioni in prossimità degli spigoli (2a-2b). Il dettaglio 3 sembra mostrare una deformazione eccessiva, tuttavia non la si tiene in considerazione poiché effetto del taglio EDM.

Sorge spontaneo chiedersi se questo errore sia l'effetto di qualche parametro di simulazione o solo conseguenza di un errore di calcolo dovuto ad una eccessiva semplificazione del modello di calcolo agli elementi finiti.

5.3.1 Stima e compensazione errore di simulazione

Si è riscontrato che il modello ottenuto dalle simulazioni di calcolo eseguite con il software Amphyon, non risulta perfettamente confrontabile con il modello reale, il quale presenta una deformazione minore (Tab.23) rispetto alla geometria nominale di partenza.

De	formazione Modello reale VS Modello Nominale	
	$\varepsilon_{max} = 2.44 \ mm$	
	Tabella 23: Deformazione reale VS Nominale	

Una delle principali cause è molto probabilmente la calibrazione del software, che inevitabilmente porta con sé un errore sul calcolo della deformazione. Tuttavia, ci si è resi conto che uno dei parametri di calibrazione, oltre al bending di deformazione, è la tensione di snervamento, *Yield Stress* (Fig.49): tale parametro, da datasheet del materiale Ti6Al4V, risulta avere una variazione di circa $\pm 10\%$.

Yield Stress Ti6Al4V $R_{p_{0.2}} = 1030 \pm 60 MPa$

Tabella 24: Variazione dello snervamento Ti6Al4V



Figura 81: Andamento delle deformazioni con variazione snervamento

Si sono eseguite quindi una serie di calibrazioni e simulazioni che hanno portato al seguente risultato (Fig.81): all'aumentare della rigidezza del materiale le deformazioni massime subite vedono un leggero abbassamento, ma non tale da essere confrontabili con il modello reale (Tab.23).

Si stabilisce quindi che l'errore e lo scarto sia conseguenza anche della raffinatezza di calcolo e discretizzazione del modello agli elementi finiti. Sarebbe quindi opportuno verificare se un affinamento degli elementi e un incremento dell'accuratezza di calcolo (Tab.14), possano portare a risultati maggiormente aderenti a quelli sperimentali.

Conclusioni

La fabbricazione additiva ed in modo particolare le tecniche che impiegano polveri metalliche per la produzione, è un metodo di produzione innovativo che negli ultimi anni si affianca, e in alcuni casi sostituisce, alle tecniche convenzionali, garantendo qualità e prestazioni del prodotto finale.

Tuttavia, per i materiali metallici, le distorsioni e gli stress residui causati dal processo sono alcuni dei principali problemi. L'esperienza degli operatori, tecnici ed ingegneri riesce a compensare questi effetti indesiderati, tuttavia un ulteriore ausilio potrebbe giungere dalla simulazione di processo, riducendo tempi di progettazione, tempi di produzione e costi utili.

Questo elaborato ha presentato il confronto e la validazione di alcuni software di simulazione per il processo di fusione laser su letto di polvere, attraverso la valutazione delle deformazioni predette per geometrie campione.

In particolare, dopo un confronto preliminare, ci si è concentrati sulla valutazione del software Amphyon, valutando la sua sensitività di calcolo e validando il risultato finale mediante confronto con la geometria reale ottenuta dalla produzione in Ti6Al4V su sistema EOS M270 Dual Mode.

Dal confronto è emerso che tra i due modelli, reale e simulato, vi è uno scostamento non trascurabile. Ulteriori simulazioni sono state eseguite per valutare l'influenza della tensione di snervamento sulla deformazione. Quest'ultimo studio ha registrato una leggera dipendenza dei risultati di simulazione, portando ad ipotizzare che le differenze siano conseguenza dell'accuratezza di calcolo e del grado di approssimazione della mesh.

Ricercare tale dipendenza sarà uno dei principali argomenti su cui soffermarsi con eventuali studi e lavori futuri.



Figure III: Modello pre-deformato compensato

In tale ottica sarà inoltre importante valutare una caratteristica aggiuntiva del software Amphyon, la compensazione geometrica delle distorsioni. Oltre a prevedere le distorsioni, il software consente di generare un modello con pre-deformazione di compensazione (Fig.III): effettuando la produzione del modello compensato dovrebbe essere possibile ottenere la forma e la geometria nominale di progetto.

Indice delle Figure

Figura 1: Evoluzione dell'Additive Manufacturing	8
Figura 2: Motivazioni economiche sviluppo AM	9
Figura 3: Serie di prototipi	9
Figura 4: Esempio di riduzione del peso del prodotto finale	10
Figura 5: Tecniche di fabbricazione additiva per polimeri	11
Figura 6: Tecniche di fabbricazione additiva per metalli	12
Figura 7: Schema costruttivo SLS e SLM	15
Figura 8: Esempi di componenti prodotti con tecnologia SLS/SLM	16
Figura 9: Schema costruttivo EBM	17
Figura 10: Schema di funzionamento Laser Deposition	18
Figura 11: Schema riassuntivo - Proprietà e caratteristiche finali per le di	verse
tecniche di FA	18
Figura 12: Processo e progettazione AM	19
Figura 13: Esempio di modello e triangolarizzazione in formato STL	20
Figura 14: Slicing	20
Figura 15: Esempio di slicing	20
Figura 16: Esempio del workflow	21
Figura 17: Applicazioni della Reverse Engineering	24
Figura 18: Schema riassuntivo dei diversi sistemi di scansione e digitalizza	zione
	24
Figura 19: Sistema CMM a contatto	25
Figura 20: Deformazione della luce strutturata	27
Figura 21: Schema triangolazione laser	28
Figura 22: Le fasi del processo di Reverse Engineering	29
Figura 23: Creazione delle Nurbs	31
Figura 24: Riassunto delle diverse fasi della RE	31
Figura 25: Esempio di distorsione - Distacco della parte dai supporti e consegu	uente
distorsione dovuta dalle tensioni residue	34
Figura 26: Gradiente termico durante il processo di AM	35
Figura 27: Stress dovuto al gradiente termico	35
Figura 28: Esempio di simulazione processo e compensazione	36
Figura 29: Interfaccia modulo Print3D - Inspire	37
Figura 30: Opzioni di orientamento modello Inspire	39
Figura 31: Parametri macchina per Inspire 3DPrint	39
Figura 32: Modello di prova e output risultati per Inspire 3D Print	40
Figura 33: Schema riassuntivo delle funzioni presenti in Amphyon	41
Figura 34: Impostazione progetto Amphyon	42
Figura 35: Impostazioni orientamento Amphyon	43

Indice delle figure

Figura 37: Ottimizzazione supporti - Amphyon 45 Figura 38: Parametri geometrici per supporti [8] - Amphyon 45 Figura 39: Parametri simulazione meccanica - Amphyon 46 Figura 40: Meshing Amphyon 46 Figura 41: Parametri analisi termica e proprietà termiche dei materiali 47 Figura 42: Modello STL per confronto software 48 Figura 43: Inspire - Andamento dello spostamento su componente di confronto software 49 Figura 44: Inspire - Andamento delle tensioni residue su componente di confronto software 49 Figura 45: Nadi di riferimente per confronte software 40
Figura 38: Parametri geometrici per supporti [8] - Amphyon 45 Figura 39: Parametri simulazione meccanica - Amphyon 46 Figura 40: Meshing Amphyon 46 Figura 41: Parametri analisi termica e proprietà termiche dei materiali 47 Figura 42: Modello STL per confronto software 48 Figura 43: Inspire - Andamento dello spostamento su componente di confronto software 49 Figura 44: Inspire - Andamento delle tensioni residue su componente di confronto software 49 Figura 45: Nadi di riferimente per confronte software 50
Figura 39: Parametri simulazione meccanica - Amphyon
Figura 40: Meshing Amphyon 46 Figura 41: Parametri analisi termica e proprietà termiche dei materiali 47 Figura 42: Modello STL per confronto software 48 Figura 43: Inspire - Andamento dello spostamento su componente di confronto software 49 Figura 44: Inspire - Andamento delle tensioni residue su componente di confronto software 49 Figura 45: Nadi di riferimente per confronte software 50
 Figura 41: Parametri analisi termica e proprietà termiche dei materiali
 Figura 42: Modello STL per confronto software
 Figura 43: Inspire - Andamento dello spostamento su componente di confronto software
software 49 Figura 44: Inspire - Andamento delle tensioni residue su componente di confronto software 49 Figura 45: Nadi di riferimento per confronto software 50
Figura 44: Inspire - Andamento delle tensioni residue su componente di confronto software
Software
Figure 45. Nodi di riforimente per confronte cofficienza 50
r igura 45. ivodi di riterimento per comronto software
Figura 46: Amphyon - Andamento dello spostamento e stress residui su
componente di confronto software - No trattamento termico52
Figura 47: Amphyon - Andamento dello spostamento e stress residui su
componente di confronto software - Con trattamento termico54
Figura 48: Andamento delle curvature di deformazione - Amphyon55
Figura 49: Interfaccia di calibrazione materiale e deformazione
Figura 50: provino di calibrazione
Figura 51: a) Andamento stress residuo in stampa - b) Rilassamento stress residui
e deformazione - c) Bending61
Figura 52: Processo di valutazione distorsione provino
Figura 53: Produzione e taglio provino di calibrazione
Figura 54: Scansione e generazione STL per valutazione bending con GOM ATOS
COMPACT SCAN 2M
Figura 55: Generazione geometrie di riferimento per valutazione bending 64
Figura 56: Stima bending
Figura 57: Andamento delle temperature al variare dei parametri di processo. 67
Figura 58: Concentrazione degli stress residui su componente AWbox
Figura 59: Andamento degli Stress residui al variare dei parametri di processo 69
Figura 60: Andamento al variare dei parametri di processo
Figura 61: Confronto geometrie. Nominal VS Laser Power $+20\%$
Figura 62: Confronto deformazioni a scala ridotta - Nominal VS Laser Power
Figura 63: Confronto deformazioni a scala ridotta - Nominal VS Hatch Distance
+20%
Figura 64: Confronto deformazioni a scala ridotta - Nominal VS Scan Speed $+20\%$
Figura 65: Confronto deformazioni a scala ridotta - Nominal VS Layer Thickness
+20%
Figura 66: Modello di riferimento per produzione e confronto77

Indice delle figure

Figura 67: EOSINT M270 e dati macchina	78
Figura 68: Piattaforma di stampa e orientamento modelli	79
Figura 69: Deformazione post-stampa - acquisizione laterale e frontale	30
Figura 70: Elettroerosione a filo EDM su modello reale	30
Figura 71: Acquisizione del modello reale con GOM ATOS - CORE 300	31
Figura 72: STL del modello reale	32
Figura 73: Acquisizione ed elaborazione modello reale con Tomografia GI	E-
PHOENIX - V Tome xS	33
Figura 74: Stl del modello reale	34
Figura 75: Confronto scansione ottica e tomografia	35
Figura 76: Risultati deformazione modello - Parametri di processo reali	36
Figura 77: Analisi sensitività software di ispezione	37
Figura 78: Confronto geometrie - Reale vs Simulata	38
Figura 79: Allineamento dei modelli finali	38
Figura 80: Vista in sezione dei due modelli a confronto	39
Figura 81: Andamento delle deformazioni con variazione snervamento	90

Indice delle Tabelle

Tabella 1: Polveri metalliche più diffuse per SLM17
Tabella 2: Materiali Inspire Print3D
Tabella 3: Macchine di stampa per Inspire Print3D
Tabella 4: Macchine di stampa disponibili su software Amphyon
Tabella 5: Materiali metallici per Amphyon
Tabella 6: Parametri stampa per simulazione software
Tabella 7: Dati Inspire per simulazione di confronto
Tabella 8: Dati Amphyon per simulazione di confronto - No trattamento termico
Tabella 9: Scostamento dei risultati di simulazione
Tabella 10: Scostamento massimo 56
Tabella 11: Proprietà materiale Ti 6Al4V per calibrazione
Tabella 12: Valori di deformazione provini
Tabella 13: Parametri di simulazione nominali
Tabella 14: Metodo di calcolo software per valutazione sensitività
Tabella 15: Prove di simulazione con Potenza Laser variabile
Tabella 16: Prove di simulazione con Velocità Laser variabile
Tabella 17: Prove di simulazione con Hatch distance variabile 66
Tabella 18: Prove di simulazione con Spessore Layer variabile
Tabella 19: Scostamento minimo e massimo per parametri HD e SS73
Tabella 20: Scostamento massimo di deformazione - Layer Thickness $+20\%~\mathrm{VS}$
Nominal
Tabella 21: Parametri di processo per produzione modello reale
Tabella 22: Parametri tomografia
Tabella 23: Deformazione reale VS Nominale
Tabella 24: Variazione dello snervamento Ti6Al4V

Bibliografia

- T. Wohlers e T. Gornet, «History of Additive Manufacturing,» Wohlers Report, 2016.
- [2] L. Iuliano, Appunti del corso Produzione assistita al calcolatore, vol. L'Additive Manufacturing, Torino: Politecnico di Torino, 2019.
- [3] P. Minetola, Appunti Additive Manufacturing Systems and Materials, Torino: Politecnico di Torino, 2019.
- [4] L. Iuliano, Appunti del Corso Produzione assistita al calcolatore, vol. Reverse Engineering, Torino: Politecnico di Torino, 2019.
- [5] C. Fuges, «Manage AM Expectations with simulation,» AM *Feature*, pp. 32-34, Febbraio 2016.
- [6] M. Gouge e P. Michaleris, «Distortion in metal Additive Manufacturing: Modelling and mitigation,» Metal Additive Manufacturing, vol. 3, pp. 61-71, 2017.
- [7] P. Minetola, M. Galati, F. Calignano, L. Iuliano, G. Rizza e L. Fontana, «Comparison of dimensional tolerance grades for metal AM processes,» *Procedia CIRP*, 2019.
- [8] «Amphyon.INFO Amphyon documentation,» Additive Works, [Online]. Available: https://amphyon.info/documentation. [Consultato il giorno 2020].
- [9] «How to use simulation and reduce costs in metal AM,»
 [Online]. Available: https://manufacturing.report/on-demand-webinar/how-to-use-simulation-and-reduce-costs-in-metalam/2672.