

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Aspetti metodologici per la qualifica del processo di fusione laser selettiva a letto di polvere per componenti metallici



Relatori

Prof. L. Iuliano

Ing. F. Calignano

Ing. M. Galati

Candidato

Federico Giuffrida

Marzo - Aprile 2019

Indice

Abstract.....	1
Introduzione.....	3
Additive Manufacturing	3
Principali tecnologie.....	6
Binder Jetting.....	7
Direct Energy Deposition	8
Material Extrusion	9
Material Jetting.....	10
Powder bed fusion	11
Sheet lamination	12
Vat Photopolymerization.....	13
Vantaggi e Svantaggi della Fabbricazione Additiva	14
Applicazioni	18
Scopo del lavoro	19
Struttura dell’elaborato	20
1 – Laser Powder Bed Fusion.....	21
1.1 Parametri di processo	22

1.2 Funzionamento	26
1.3 Difetti.....	27
2 – Qualifica di processo	33
2.1 Materia prima	33
2.1.1 Metodi di produzione	37
2.1.2 Caratterizzazione della materia prima	43
2.1.3 Materiale riciclato.....	49
2.1.4 Conservazione	50
2.2 Preparazione file macchina.....	50
2.2.1 Parametri di processo – densità di energia	55
2.3 Preparazione macchina.....	65
2.4 Post-Processo.....	67
2.5 Collaudo	70
3 – Qualifica e Metodologia	73
3.1 Qualifica di processo	73
3.2 Metodologia.....	76
3.2.1 Verifica della materia prima.....	76
3.2.2 Manutenzione macchinario.....	78
3.2.3 Preparazione file macchina.....	79
3.2.4 Preparazione macchina e lancio job	83
3.2.5 Post-processo.....	85
3.2.6 Collaudo	87
4 – Conclusioni.....	89
Appendice.....	91
A.1. Il macchinario EOS M290.....	91
Bibliografia.....	95

Ringraziamenti	99
----------------------	----

Abstract

I materiali e i processi utilizzati a livello industriale per produrre componenti per la difesa, l'aerospazio, l'automotive e le applicazioni mediche devono prima essere formalmente qualificati. Mentre le procedure di qualificazione variano tra applicazioni o settori, l'obiettivo della qualifica può essere riassunto come la raccolta di dati sufficienti per dimostrare che un materiale o un processo funzionerà come previsto. La produzione di parti tramite processi additivi è ancora accompagnata da molte sfide legate alla tecnologia. Per un'implementazione di successo, il settore automobilistico è tenuto a definire esaurienti specifiche e metodi di qualificazione per la propria catena di approvvigionamento interna ed esterna.

Scopo di questo elaborato è la qualifica di processo per la fabbricazione additiva frutto di un progetto in collaborazione tra il Politecnico di Torino e Fiat Chrysler Automobiles (FCA), azienda presso la quale è stato svolto parte del seguente lavoro. Partendo da un modello di qualifica generale, si è successivamente adattato il modello ad uno caso di studio specifico, considerando una determinata tecnologia additiva e una materia prima.

Iniziando con dei cenni sull'evoluzione della Fabbricazione Additiva e delle sue diverse categorie di processo si passa alla stesura di una linea guida generale di un processo di fabbricazione additiva, andando successivamente a concentrarsi sul processo "Laser - Powder Bed Fusion" (L-PBF), conosciuto anche come "Selective Laser Melting" (SLM). Partendo dalla descrizione del processo e dal funzionamento di una macchina di L-PBF si sono analizzate al fine della qualifica del processo, singolarmente tutte le fasi riportando, dove presenti, norme e criteri di riferimento da applicare per la caratterizzazione. Segue una fase operativa, schematica e riassuntiva, che illustra le diverse fasi del processo, le norme di riferimento, le azioni da svolgere e le modalità d'esecuzione. Concludendo, è stata redatta

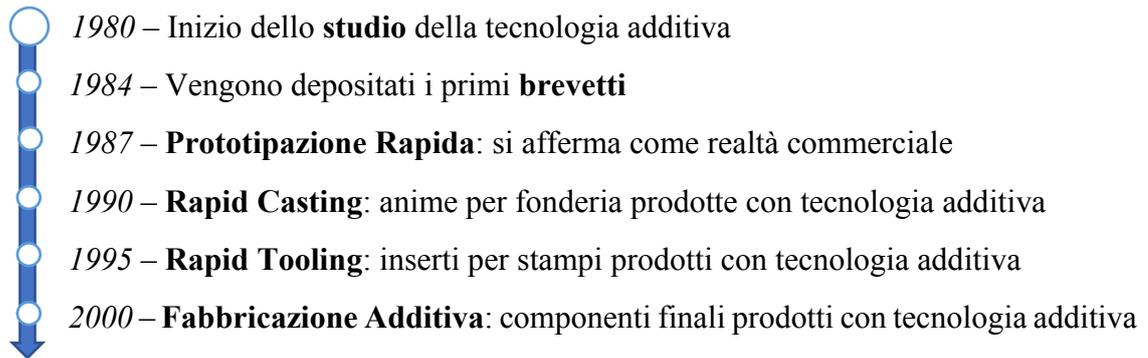
una normativa interna per il gruppo FCA contenente i risultati ottenuti. Norma che funge da guida per l'intero processo di produzione legato al macchinario ed al materiale oggetto di studio, andando ad integrarsi con le procedure operative presenti in azienda, ove esistenti. Tale lavoro ha avuto l'obiettivo di sopperire all'attuale mancanza di una procedura standardizzata per la qualifica di tale processo.

Introduzione

Additive Manufacturing

Quando si parla di Additive Manufacturing (AM) o Fabbricazione Additiva (FA) ci si riferisce all'insieme di quelle tecnologie che permettono la realizzazione di un oggetto 3D. L'organismo di normalizzazione statunitense ASTM International definisce la FA come *“The process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies”* (*“il processo di unione dei materiali per creare oggetti tramite dati provenienti dal modello 3D, di solito strato su strato, al contrario delle metodologie di produzione sottrattiva”*)[1].

Quelle che possono essere considerate le origini della FA si iniziano a sviluppare nel 1980 con i primi studi in questo campo. Qualche anno dopo, nel 1984, viene depositato il primo brevetto. In seguito, inizia a riscuotere sempre più interesse e successo fino a diventare una vera e propria realtà industriale col nome di Prototipazione Rapida [2]. Essa vede appunto come campo di applicazione la realizzazione di un modello o prototipo che funga da guida per la progettazione del prodotto, che mostri gli sviluppi del progetto sia all'interno che all'esterno dell'azienda. Questo suo ruolo nella realtà progettuale tiene alto l'interesse e il successivo sviluppo di questo processo[3]. Di seguito si riporta una linea temporale che mostra l'evoluzione storica, passando per i punti cardine, della FA.



Evoluzione della tecnologia di FA [4]

A sostegno dell'importante impiego della FA nel settore della prototipazione ci sono sia delle motivazioni economiche, che permettono durante la fase di progettazione dell'oggetto di abbassarne notevolmente i costi, sia motivazioni temporali, che permettono di velocizzare la realizzazione del prototipo.

Si evince dalla Tabella 1 come oggi si sia arrivati a diverse categorie di processo, diverse tecnologie e quindi all'uso di diversi materiali, rispondendo in maniera sempre più efficace alle diverse richieste del mercato. La FA è in continua evoluzione ed espansione e diverse aziende hanno già iniziato la produzione su larga scala di oggetti così ottenuti. Tutto ciò in maniera sempre più pervasiva, rapida e conveniente.

Di contro, uno dei punti che pone qualche dubbio sulla diffusione della FA è l'attuale assenza di uno standard di qualifica, specifico di tale processo, che in qualche modo assicuri un prestabilito livello di qualità sul prodotto finito. Tale problema si verifica soprattutto nel campo dei componenti metallici dove i produttori hanno difficoltà ad affermare con certezza che il proprio prodotto risponda a requisiti di resistenza, dimensione e affidabilità costanti. Di conseguenza, venendo a mancare quest'importante garanzia, molti produttori rimangono dubbiosi sull'uso di questa tecnologia in quanto i costi da sostenere potrebbero non essere coperti da possibili guadagni.

Essendo questo un vero e proprio processo di produzione a sé stante, bisognerebbe riuscire a garantire e controllare tutte le fasi che lo costituiscono. Si dovrebbe puntare a garantire quattro punti principali [5]:

- 1) Garantire la ripetibilità del processo con uno specifico macchinario, materiale, operatore.
- 2) Assicurare la qualità in ogni luogo, in ogni tipo di condizioni ambientali.
- 3) Garantire la qualità del prodotto senza l'intervento diretto del progettista.

- 4) Riconoscere le condizioni per le quali non può essere garantito un determinato livello di qualità.

Ad oggi le aziende che operano nel settore dell'additive cercano di applicare gli stessi metodi di caratterizzazione utilizzati per componenti prodotti secondo metodi tradizionali, quindi sia prove non distruttive che distruttive [5]. Questo processo può però risultare piuttosto oneroso nel caso dell'AM e servirebbe trovare un metodo alternativo. Servirebbe quindi cercare di costruire un modello ad hoc, che certifichi tutte le diverse fasi che costituiscono il processo, e che consenta di avere una garanzia sulla qualità del prodotto finito.

In questo elaborato ci si concentrerà sul processo di Fusione Laser del Letto di Polvere (Laser Powder Bed Fusion) ed in particolare sulla tecnologia di Fusione Laser Selettiva (Selective Laser Melting, SLM). Proprio su questa tecnologia sono al momento in corso dei progetti Europei mirati allo studio delle polveri al fine di ampliarne le tipologie e le caratteristiche, con lo scopo di riuscire a ridurre i costi e promuovere lo sviluppo di questo settore [6].

Principali tecnologie

Le tecnologie di FA si classificano sulla base dei materiali impiegati nel processo e nei modi in cui vengono trattati. L'ASTM International, un organismo di normalizzazione statunitense, acronimo di American Society for Testing and Materials, suddivide le tecnologie di fabbricazione additiva in 6 famiglie di processi che verranno di seguito riportare per offrire la possibilità di confrontarle tra loro ed evidenziare le differenze esistenti.

Categorie di processo	Tecnologia	Materiali
Binder Jetting	3D Printing	Metallo
	Ink-jetting	Polimero
	S-Print	Ceramico
	M-Print	
Direct Energy Deposition	Direct Metal Deposition	Metallo
	Laser Deposition	
	Laser Consolidation	
	Electron Beam Direct	
	Melting	
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling	Polimero
Material jetting	Polyjet	Fotopolimero
	Ink-jetting	
	Thermojet	
Powder bed fusion	Selective Laser Sintering	Polimero, Ceramico
	Selective Laser Melting	Metallo
	Electron Beam Melting	Metallo
Sheet lamination	Ultrasonic Consolidation	Ibrido
	Laminated Object	Metallico
	Manufacture	Ceramico
Vat photopolymerization	Stereolithography	Fotopolimero
	Digital Light Processing	Fotopolimero

Tabella 1 - Classificazioni ASTM (2012) [1]

Binder Jetting

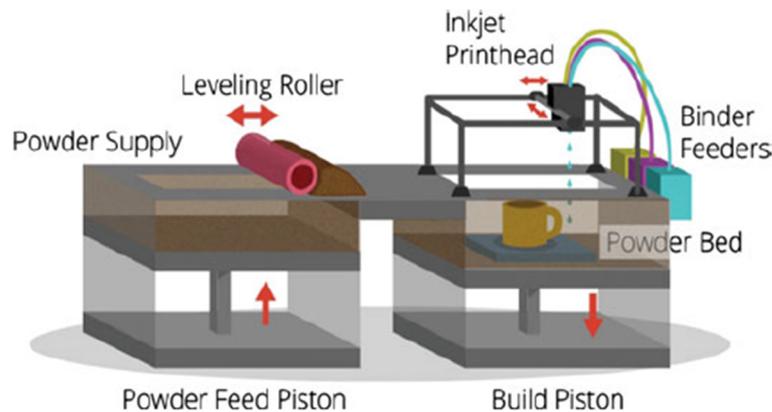


Figura 1 - Schema di funzionamento Binder Jetting [7]

Questi metodi di stampa sono stati sviluppati all'inizio degli anni '90, principalmente al MIT [8]. Essi hanno sviluppato il processo di stampa 3D (3DP) in cui un materiale legante è “stampato” su di un letto in polvere, pre-posizionato sulla piattaforma di costruzione, andando così a formare diverse sezioni trasversali. Si differenzia dal Selective Laser Sintering in quanto lì è un laser a fondere le particelle formando così un nuovo strato. Mentre per quanto riguarda il sistema di deposizione della polvere vi è analogia con le macchine SLS.

Il *Binder Jetting* può essere visto come l'insieme di altri due processi: *Powder Bed Deposition* e *Material Jetting*. Sulla sinistra, in Figura 1, è presente una camera di alimentazione contenente la polvere che grazie alla presenza di un pistone mobile in z , può essere prelevata dal rullo livellatore. Esso ha il compito di prelevare la polvere e di distribuirla in modo omogeneo nell'ambiente adiacente, nonché camera di processo. Entra quindi in funzione la testina di stampa che potendo traslare lungo gli assi x e y ad una quota fissa z , deposita delle goccioline di materiale legante, che hanno il compito di “incollare” le particelle di polvere, nei punti indicati dal file CAD. Il pistone della camera di processo traslerà quindi verso il basso di esattamente uno strato per lasciare posto al nuovo strato di polvere. Riparte così il processo fino al completamento del pezzo. Sulla testina di stampa possono essere presenti differenti ugelli, i quali possono essere alimentati anche da materiali differenti, che a loro volta possono possedere diversi colori. Questa differente colorazione si conserverà e sarà di conseguenza visibile sulla parte prodotta.

I pezzi prodotti in materiale polimerico possono essere utilizzabili senza nessun tipo di post-processo. Invece per materiali metallici e ceramici è opportuno rimuovere il materiale legante tramite sinterizzazione.

Direct Energy Deposition

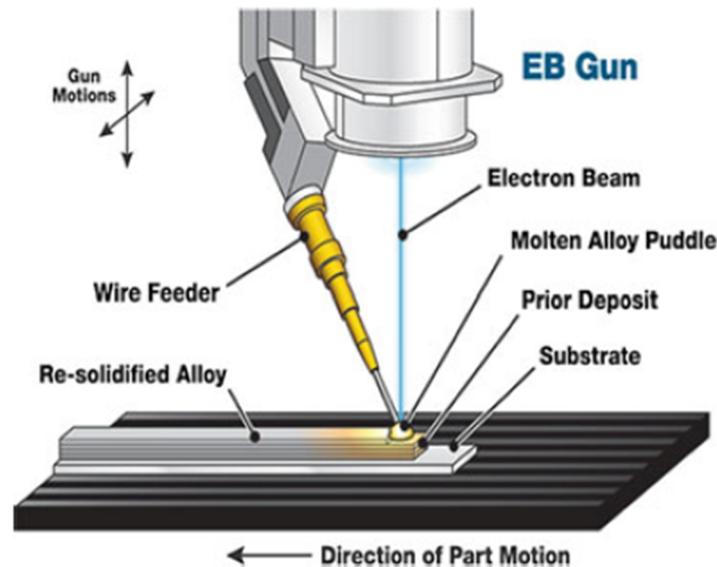


Figura 2 – Schema di funzionamento Direct Energy Deposition [7]

I processi di deposizione del fascio (BD) consentono la creazione di parti mediante fusione e deposizione di materiale da polvere o filo di alimentazione. Anche se questo approccio di base può funzionare per polimeri, ceramiche e compositi a matrice metallica, è prevalentemente usato per polveri metalliche. Il processo schematizzato in Figura 2 prende il nome di Laser Engineered Net Shaping (LENS), ma ne esistono diverse varianti. Sebbene l'approccio generale sia il lo stesso, le differenze tra le diverse tipologie di macchina si basano comunemente su cambiamenti nel laser di potenza, dimensioni dello spot laser, tipo laser, metodo di fornitura della polvere, metodo di erogazione gas inerte, tipo di controllo del movimento utilizzato. I processi BD usano una qualche forma di energia focalizzata in una regione ristretta (un raggio), che viene utilizzato per riscaldare un materiale che viene depositato. A differenza della fusione del letto di polvere, i processi BD non sono usati per fondere un materiale che è già posizionato sulla piattaforma di costruzione ma è usato per fondere i materiali mentre vengono depositati.

Nel caso in figura uno stesso utensile concentra il fascio di elettroni con il punto in cui viene depositata la polvere. Il melt-pool che si forma sulla superficie garantisce la coesione di

questo con il resto della parte. Questo procedimento viene ripetuto riga per riga secondo le istruzioni provenienti dal CAD e strato per strato fino al raggiungimento del prodotto finito. Possono essere montati anche su macchine a 5 o 6 assi e impiegati per riparazioni di grandi componenti meccanici.

Material Extrusion

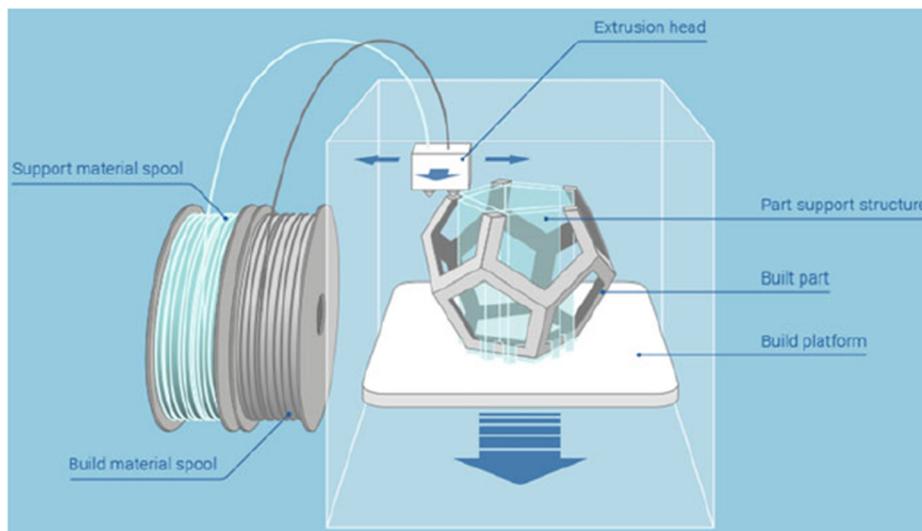


Figura 3 - Schema di funzionamento Material Extrusion [7]

La stampa FDM, acronimo di Fused Deposition Modeling, è il processo di fabbricazione additiva più diffuso che sfrutta questa tecnologia di funzionamento. È una tecnologia sviluppata e introdotta negli anni '80 da Scott Trump, in seguito co-fondatore di Stratasys, azienda detentrici del brevetto che lega il principio di funzionamento ed il nome "FDM" a tale compagnia. In modo del tutto generale quindi, quando si vuole fare riferimento a questa tecnologia sarà opportuno chiamarla con il nome FFF (Fused Filament Fabrication).

Un estrusore, che può muoversi lungo gli assi x e y, è alimentato da due diversi filamenti raccolti in apposite bobine. I due diversi filamenti polimerici hanno funzioni ben distinte: quello grigio, in Figura 3, è il materiale con cui verrà effettivamente costruito il pezzo, quello azzurro invece servirà solo per la costruzione dei supporti, necessari per sorreggere la parte ed eventuali sottosquadri. I supporti verranno rimossi durante la fase di post-processo attraverso un bagno chimico. Per quanto riguarda il materiale che viene estruso, esso deve essere in uno stato semi-solido quando esce dall'ugello. Questo materiale deve poi solidificarsi completamente pur restando della medesima forma. Inoltre, il materiale deve

legarsi al materiale che è già stato estruso precedentemente, in modo che ne risulti un'unica struttura solida.

Il filamento di materiale raggiunge questo suo stato di semi-fusione grazie a del calore prodotto da delle resistenze elettriche poste all'interno del sistema di estrusione. Successivamente se ne riduce il diametro attraverso l'ugello, il quale può essere di vari diametri da 0.3mm a 0.6mm [9], che quindi deposita il materiale sulla piattaforma di costruzione secondo le istruzioni del modello CAD. Il diametro dell'ugello determina, come stretta conseguenza, anche la dimensione minima della parte che viene realizzata. Inoltre, la piattaforma parte da una posizione elevata e trasla lungo l'asse z, verso il basso, di una quota pari ad uno strato per volta fino al completamento della parte.

Macchine funzionanti secondo questo tipo di tecnologia sono quelle che oggi risultano essere le più economiche e in determinate varianti, semplificate dal punto di vista della componentistica, facilmente acquistabili da privati con fini anche hobbistici a prezzi relativamente ridotti.

Material Jetting

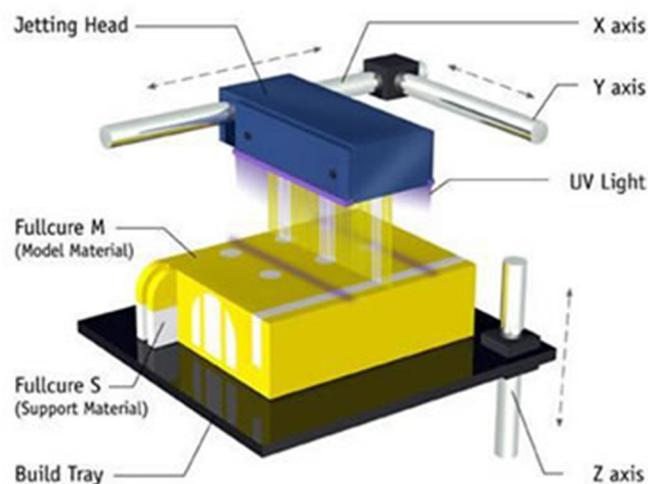


Figura 4 - Schema di funzionamento Material Jetting [10]

Il sistema di movimentazione è simile a quello visto in precedenza (Material Extrusion) con la piattaforma di costruzione che trasla lungo asse z e la testina che si muove nel piano x-y. Quest'ultima però a differenza del caso precedente presenta diversi ugelli, da 50 a 100 a seconda del modello commercializzato, che depositano goccioline di fotopolimeri liquidi, i quali vengono subito asciugati grazie all'azione dei raggi UV. I modelli più avanzati di questo tipo di macchine permettono anche l'utilizzo di diversi materiali, in differenti

colorazioni, per la costruzione di uno stesso oggetto con parti di colore differente. Oltre al materiale per la costruzione del pezzo inoltre viene depositato il materiale di supporto che verrà poi eliminato o manualmente o in bagno d'acqua [11]. Questa procedura di deposizione del materiale viene ripetuta strato dopo strato, con l'abbassamento della piastra di costruzione, di una distanza pari allo spessore di uno strato per volta, fino al completamento della parte.

Grazie all'assenza del laser questi tipi di macchinari risultano più economici rispetto a quelli di altre tecnologie che sfruttano il laser come sorgente di energia.

Questa tecnologia permette di ottenere componenti in plastica dura ed elastomeri gommosi.

Powder bed fusion

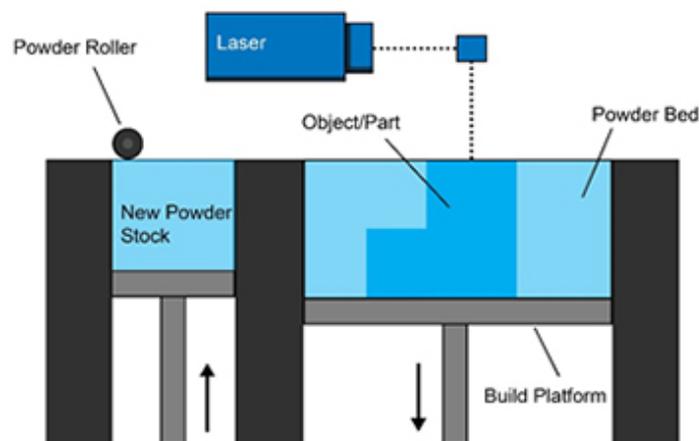


Figura 5 - Schema di funzionamento Powder Bed Fusion [12]

Sviluppato presso l'Università del Texas ad Austin, USA, la tecnologia Selective Laser Sintering (SLS) è stata tra le prime ad entrare in commercio nel campo dei processi di fabbricazione additiva [8]. Ci sono diverse varianti della tecnologia di fusione del letto di polvere, tuttavia il principio di funzionamento è molto simile per tutte le tecnologie. La materia prima, una polvere appunto, è raccolta in una camera d'accumulo il quale basamento è costituito da una piattaforma guidata da un pistone mobile che traslando in direzione z verso l'alto fornisce il materiale al sistema di distribuzione. Questo è costituito solitamente da una lama o da un rullo mobile che raccoglie uno strato di polvere dalla camera d'accumulo e lo distribuisce in modo omogeneo nella camera di lavoro. Qui è dove avviene la costruzione della parte. Dotata anche essa di una piattaforma comandata da un pistone mobile in z trasla verso il basso di una distanza pari ad un strato per volta, lasciando così la possibilità alla lama di depositare il nuovo strato di polvere. Posizionato il nuovo strato, il laser inizia a fondere

localmente la polvere seguendo i percorsi e le istruzioni precedentemente stabilite. Così strato dopo strato si arriva alla produzione del pezzo finito, il quale dovrà essere sottoposto ad una fase di post-processo prima di poter essere ritenuto completo.

Tramite questa tecnologia è possibile produrre oggetti di materiali differenti come metallici, polimerici o ceramici. Le polveri impiegate in questo processo produttivo sono di diversa natura, sia per quel che riguarda la loro realizzazione, che prevedono l'utilizzo di differenti metodi, sia per quello che riguarda i materiali. Essendo questa la categoria di processo che si studierà in questo elaborato questi concetti verranno successivamente ripresi e approfonditi in maniera più opportuna.

Sheet lamination

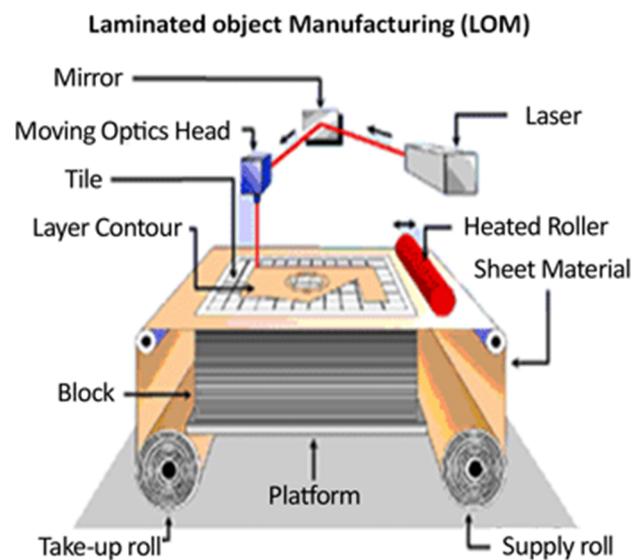


Figura 6 - Schema di funzionamento Sheet Lamination [13]

Una delle prime tecniche di produzione additiva commercializzata nei primi anni '90 era chiamata Laminated Object Manufacturing (LOM). Questa metodologia riguarda la laminazione strato per strato di fogli di materiale cartaceo, tagliati usando un laser a CO₂, dove ciascun foglio rappresenta una sezione trasversale del modello CAD del componente da realizzare. Il materiale di costruzione più diffuso è stato la carta con un rivestimento termoplastico su un lato. Gli spessori della carta variano spesso da 0,07 a 0,2 mm [8].

I materiali impiegati nell'uso di questa tecnologia sono diversi: polimeri, metalli, materiali compositi, carta ed altri ancora. Il foglio di materiale viene posizionato sulla piattaforma di costruzione con diverse metodologie a seconda del tipo di macchinario e del materiale trattato. In Figura 6 è possibile vedere lo schema di funzionamento per una macchina che

lavora materiale metallico. Posizionato il foglio sulla piattaforma la testa, che si muove sul piano x-y, in un primo momento deposita un adesivo termo-attivo o presso-attivo, mentre successivamente provvede al taglio del foglio o tramite una lama o tramite il taglio laser. Viene quindi sovrapposto un nuovo strato di materiale e riparte l'operazione. L'unione dei singoli strati è quindi affidata all'azione dell'adesivo che viene depositato tra essi. Terminato il processo di produzione il pezzo così ottenuto può essere ripreso e trattato con metodi convenzionali. La precisione del risultato è fortemente influenzata dallo spessore del foglio, il quale rappresenta la misura equivalente dello spessore di uno strato visto nelle altre tecnologie.

Vat Photopolymerization

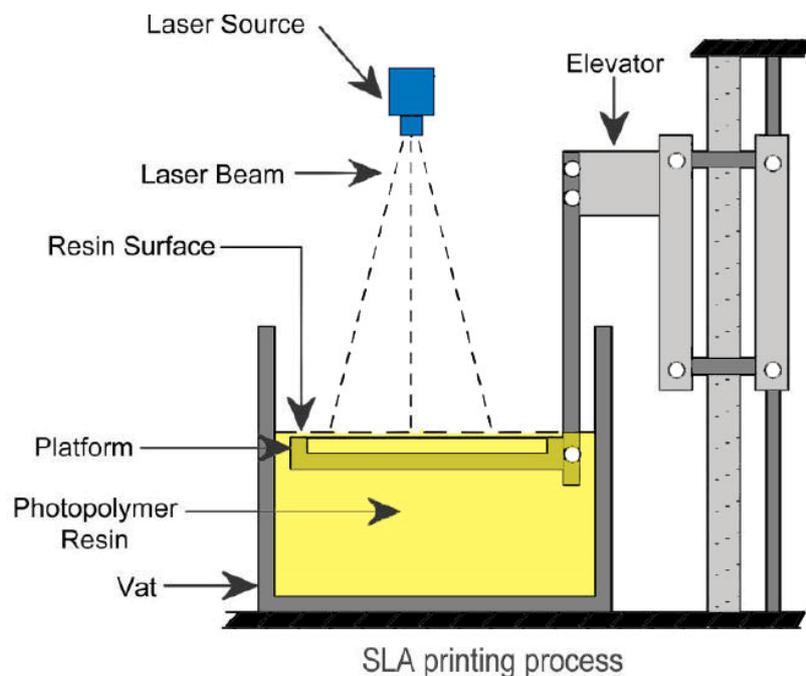


Figura 7 - Schema di funzionamento Stereolitografia [14]

I processi di fotopolimerizzazione fanno uso, come materiali principali, di resine o fotopolimeri liquidi che sotto l'effetto delle radiazioni passano allo stato solido. Essi furono sviluppati alla fine degli anni '60 e il loro utilizzo si diffuse rapidamente in diverse aree commerciali [8]. La maggior parte dei fotopolimeri reagisce alle radiazioni nella gamma di lunghezze d'onda dell'ultravioletto (UV), mentre alcuni a radiazioni che ricadono nel campo del visibile. All'irraggiamento, questi materiali subiscono una reazione chimica che consente il passaggio di stato verso quello solido. Questa reazione è chiamata fotopolimerizzazione ed è abbastanza complessa da un punto di vista chimico.

Il processo di stereolitografia rappresentato in Figura 7 è composto da una vasca fissa nello spazio, che ha il compito di contenere la resina fotopolimerica. Immersa nella resina vi è la piattaforma di costruzione la quale grazie ad un sistema mobile esterno alla vasca può traslare lungo l'asse z. Sopra la vasca è invece posizionato la sorgente laser che anch'essa fissa. Grazie a un sistema di specchi il raggio laser può essere indirizzato in ogni punto della superficie della vasca così da trasmettere energia alla resina e permetterne la solidificazione. Le istruzioni ricevute dal modello CAD guidano il laser lungo il suo percorso ed una volta terminata la lavorazione della superficie la piattaforma viene fatta scendere di uno strato e la resina liquida presente nella vasca copre la superficie appena lavorata. Il procedimento si ripete fino al completamento della parte.

Vantaggi e Svantaggi della Fabbricazione Additiva

Si vogliono adesso riportare vantaggi e svantaggi della fabbricazione additiva dividendoli in due categorie differenti: processo e prodotto.

- Vantaggi di Processo
 - Una sola macchina, forme illimitate: la caratteristica primaria di tutte le macchine additive risiede nell'illimitata possibilità di realizzare componenti di qualsiasi forma in un unico processo, e quindi a partire da una sola macchina. Tale considerazione risulta molto importante se si focalizza un processo industriale con produzione tradizionale: per la produzione in serie occorre una elevata quantità di macchine ognuna delle quali effettua una specifica lavorazione.
 - Assenza di attrezzature: il vantaggio di sfruttare una singola macchina con il suo unico processo, implica l'eliminazione del problema legato alla scelta dell'utensile, dei parametri di taglio e alla tipologia di materiale e della progettazione degli interi stampi;
 - Sottosquadri ammessi: essi non presentano alcun limite al processo realizzativo ed alla progettazione della parte. Apposite strutture di supporto sosterranno i sottosquadri presenti.

- Minimo intervento dell'operatore: grazie all'automazione del processo, l'intervento dell'operatore è solo relegato all'attività di carico macchina, controllo visivo di eventuali anomalie durante il processo, e di rimozione del componente da quest'ultima al termine della costruzione;
- Tempi e costi: la fabbricazione additiva, in quanto processo di adduzione del materiale, richiede dei tempi e delle quantità di materiale, per la realizzazione di un componente, direttamente proporzionali alla geometria del pezzo. Di conseguenza, maggiori sono le dimensioni della parte maggiori saranno il numero di strati e quindi maggiore sarà la richiesta di tempo per la fabbricazione del pezzo a parità di capacità della macchina. Tale peculiarità si oppone a quanto avviene per i processi per sottrazione di materiale, dove, partendo da una matrice già più grande del prodotto finale, i tempi e i costi sono legati alla complessità delle operazioni che gli utensili di taglio e di afferraggio dovranno applicare al suddetto oggetto.
- Vantaggi di Prodotto
 - Libertà di progettazione: non si ha nessun tipo di vincolo sulla forma del componente a differenza ad esempio dei processi di fonderia, dove il problema dei sottosquadri risulta avere delle pesanti limitazioni nella realizzazione del componente.
 - Strutture leggere: la fabbricazione additiva consente la realizzazione di componenti che sfruttano sezioni cave per alleggerire il proprio peso, le quali possono replicare le stesse performance di quelle con struttura piena o massiccia (Figura 8). Il pregio non risiede tanto nell'innovatività di tali strutture, tanto quanto nella facilità della loro realizzazione: per ottenerle dai processi tradizionali, dal pieno occorrerebbe effettuare una serie di operazioni di sottrazione del materiale tramite una macchina CNC che richiederebbero del tempo aggiuntivo e non sempre sarebbe possibile arrivare allo stesso risultato. Oltre a ciò, occorre ricordare i vantaggi in termini di peso e di risparmio di materiale.
 - Personalizzazione: la facilità di modellare gli oggetti da realizzare è solo correlata all'abilità di modificare i file CAD. In tal modo si riesce a svincolare

la varietà del prodotto dal complesso studio di processo tecnologico che ne deriva.



Figura 8 – Confronto tra un componente realizzato con metodo tradizionale (sx) e uno in AM (dx) [15]

- Svantaggi di Processo
 - Volumi di lavoro limitati: questi tipi di macchinari sono limitati dalla grandezza dei volumi costruiti, che possono avere l'ordine di un metro cubo per materiali plastici, ed inferiori a mezzo metro cubo per quelli metallici (si veda a titolo d'esempio Tabella 12). Si escludono da queste considerazioni, alcuni casi isolati riportati dalla stampa, come la realizzazione di edifici con manifattura additiva, che occorre considerare come progetti sperimentali che prevedono comunque la produzione in loco, con il deposito del calcestruzzo in strutture predisposte ad hoc.
 - Velocità di costruzione limitate: la durata della lavorazione dipende dai parametri di processo impostati, dalla dimensione dell'oggetto, ed anche dal suo materiale.
 - Ogni macchina può lavorare con un numero limitato di materiali: le macchine additive sono generalmente utilizzate per lavorare una limitata tipologia di materiali, il che le rende poco versatili a continui cambi di materiale. Sotto questo profilo, tali macchine sono infatti dedicate.
- Svantaggi di Prodotto
 - Necessità di strutture di supporto: in alcune tecnologie additive come ad esempio la Fused Filament Fabrication (FFF) vi è la necessità di

implementare delle strutture aggiuntive in fase di costruzione che porteranno necessariamente ad una post lavorazione per la loro rimozione (manuale, tramite utensili o appositi bagni chimici) e quindi un aumento dei costi, nonché un consumo, seppur ridotto, di materiale in più. Inoltre, la loro rimozione, se non eseguita correttamente, può recare danni alla superficie del pezzo. Questo discorso però non è valido in assoluto in quanto ci sono tecnologie che non necessitano di strutture di supporto.

- Finitura superficiale: la rugosità dei componenti in additive risulta essere molto variabile per via del processo di costruzione strato per strato. È comunque possibile cercare di giocare un po' sulla rugosità superficiale agendo su diversi aspetti quali parametri di processo, orientazione della parte e dimensione della materia prima al fine di arrivare a dei valori di rugosità superficiale bassi. Non sempre però si raggiunge tale obiettivo e bisogna ricorrere ad opportuni interventi.
- Numero limitato di materiali commerciali: purtroppo non si dispone di una grande scelta tra i fornitori di materie prime, che la maggior parte delle volte coincidono con i produttori dei macchinari. Questo fenomeno porta ad avere costi davvero alti della materia prima, soprattutto nel caso delle polveri metalliche.
- Costo dei macchinari: eccezion fatta per le piccole macchine FDM facilmente reperibili sul mercato a prezzi relativamente bassi con macchine home-made, i costi di della strumentazione additive e dei materiali utilizzati sono abbastanza alti, dato che, come precedentemente affermato, sono dei macchinari dedicati. Fortunatamente, la spinta verso la ricerca e il continuo sviluppo hanno reso possibile una decrescita dei costi fino ad oggi.
- Post processing: l'insieme di questi trattamenti non è mai implementato nella macchina, motivo per cui è definito come un vero e proprio processo a sé stante. Oltre che apportare ad un incremento di costi e di tempo all'interno dell'intera operazione di fabbricazione, il post processing in alcuni casi risulta essere assolutamente necessario: nei metalli, e negli acciai soprattutto, gli stress termici che vengono indotti per fissare le polveri generano durante

il raffreddamento delle tensioni così alte da danneggiare il componente stesso, rendendo obbligatorio un successivo trattamento termico di distensione.

Applicazioni

La fabbricazione additiva negli ultimi anni sta vivendo una vera propria evoluzione ed espansione. Questi aspetti riguardano sia la tecnica produttiva, la materia prima, i macchinari ed anche, di conseguenza, il campo di applicazione. Infatti, tutte queste migliorie, rendono questa tecnica realizzativa sempre più versatile e pronta a rispondere in modo funzionale a diversi settori di mercato. La sua espansione è dovuta principalmente ai diversi vantaggi che abbiamo analizzato precedentemente e soprattutto al loro riscontro pratico nei diversi settori d'interesse. I campi maggiormente coinvolti sono:

- Aerospaziale
- Automotive
- Biomedico

Nel campo aerospaziale, ad esempio, tale tecnologia ci consente di realizzare componenti metallici con caratteristiche di notevole impatto come: riduzione di peso, elevate caratteristiche meccaniche, forme illimitate. La riduzione del peso di un componente, in un settore come quello aerospaziale, è di primaria importanza e comporta anche un risparmio economico di notevole entità. Inoltre, è possibile progettare elementi come palette per turbine con cavità interne, la cui realizzazione era prima estremamente costosa e complicata e non offriva i risultati attuali. La realizzazione di questa palette, con cavità interne, permette di progettare un sistema di refrigerazione interno alla palette stessa con un conseguente innalzamento delle temperature di lavoro a cui essa è sottoposta e quindi ad un miglioramento dell'intera turbina di notevole entità. Si noti come in questa specifica applicazione si è riusciti a superare un limite tecnologico precedentemente esistente (Figura 9).

Nel campo dell'autoveicolo ha riscontrato un grande successo, soprattutto per la varietà di impiego. Sono stati realizzati diversi elementi plastici per la cura degli interni, come ad esempio parti della plancia, porta bevande, e placche plug-in direttamente personalizzabili

dal cliente. Anche qui però il maggior impatto è dato dai componenti metallici. La semplice riprogettazione di componenti già esistenti in chiave additive può portare a riduzioni di peso davvero interessanti, fenomeno che nel settore di veicoli da competizione o delle super-car risulta essere particolarmente interessante.

Altro settore di notevole interesse per le possibilità offerte da questa tecnologia è quello biomedicale. Va infatti sottolineata l'importanza della personalizzazione e della libertà di progettazione del prodotto. Si può infatti realizzare una protesi su misura per lo specifico paziente, che rientri nel campo odontoiatrico, ortopedico o altro ancora. Infatti, grazie alla possibilità di realizzare strutture porose, è possibile replicare anche le strutture ossee che successivamente vengono impiantate nel paziente tramite operazione chirurgica.

Sono molti altri i campi di applicazione della fabbricazione additiva e gli esempi qui riportati costituiscono solo una parziale fetta delle opportunità offerte. Si noti però, anche da questi pochi esempi, come in ognuno di essi le migliorie apportate siano di notevole entità.



Figura 9 - Blade cooling [16]

Scopo del lavoro

Scopo di questo elaborato è la qualifica di processo per la fabbricazione additiva. Per qualifica si intende il processo in base al quale prodotti, processi o materiali costruttivi vengono definiti in modo da stabilirne la conformità a certi requisiti di specifica tenendo in considerazione le norme applicabili. L'obiettivo è quello di realizzare un modello di qualifica inizialmente generale, per poi particolarizzarlo ad uno specifico caso studio approfondendone gli aspetti.

Struttura dell'elaborato

Dopo un'introduzione sull'evoluzione della Fabbricazione Additiva e delle sue diverse categorie di processo ci si sofferma sulla "Laser - Powder Bed Fusion". Viene quindi spiegata la tecnica produttiva e il funzionamento di un macchinario operante secondo questa specifica tecnica di produzione in dotazione presso gli stabilimenti FCA. Si entra quindi nello specifico della qualifica, analizzando singolarmente tutte le fasi del processo e riportando, dove presenti, norme e criteri di riferimento da applicare per la caratterizzazione. Seguirà una fase operativa, schematica e riassuntiva, che illustri le diverse fasi del processo, le norme di riferimento, quali azioni svolgere e come. Concludendo, è stata redatta una normativa interna per il gruppo FCA contenente i risultati ottenuti. Norma che funga da guida per l'intero processo di produzione legato alla tecnologia L-PBF, andando ad integrarsi con le procedure operative presenti in azienda, ove presenti. Tale lavoro ha avuto l'obiettivo di sopperire all'attuale mancanza di una procedura standardizzata per la qualifica di tale processo.

1 – Laser Powder Bed Fusion

Tra le diverse tecnologie presenti nella categoria a letto di polvere vi è quella del Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) che trova la sua applicazione nel campo della realizzazione di pezzi metallici. Questo metodo produttivo consente la realizzazione di componenti con un elevato grado di precisione e alta risoluzione dei dettagli, permette di raggiungere alte caratteristiche meccaniche e un grado di rugosità superficiale basso. Lo studio che verrà affrontato in questo elaborato riguarda una lavorazione monocomponente e nello specifico, la polvere metallica della lega di Alluminio AlSi10Mg. Questa tecnologia prevede la completa fusione delle polveri per mezzo di un fascio laser ad alta energia in modo da ottenere, in un unico passaggio, una percentuale di denso intorno al 99%, quindi molto vicina al valore teorico. È inoltre possibile riutilizzare, con opportuni accorgimenti, le polveri che non sono state coinvolte nel processo produttivo del componente; in questo modo si riducono gli scarti ottenendo anche un vantaggio dal punto di vista economico e ambientale.

L'intero processo avviene all'interno di una camera chiusa, chiamata camera di processo, solitamente riempita con un gas inerte come Azoto o Argon, a seconda della reattività della polvere metallica utilizzata, e posta in condizioni di sovrappressione in modo da ridurre al minimo la contaminazione da ossigeno durante il processo. Esiste la possibilità di riscaldare la piattaforma su cui viene costruito l'oggetto, così da ridurre il gradiente di temperatura e quindi le tensioni termiche che potrebbero portare alla deformazione del componente o anche al distacco di parte di esso dalla piastra di costruzione.

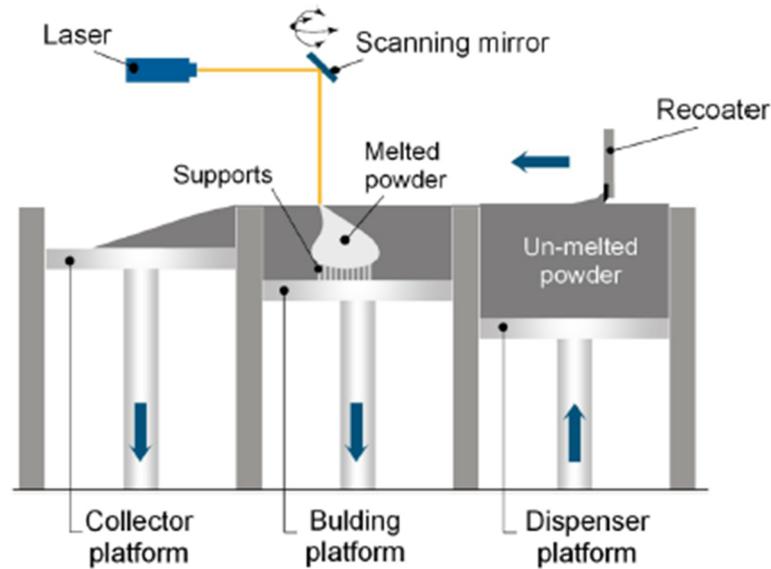


Figura 10 - Schema di funzionamento di un macchinario funzionante secondo tecnologia L-PBF [9]

La Figura 10 schematizza il meccanismo di funzionamento di un macchinario che opera secondo tecnologia L-PBF, in Figura 41 (Appendice). Proprio su questa tecnologia e su questa tipologia di macchinario si concentra il lavoro di questa tesi. Seppure alcuni passaggi possono risultare generici in un processo di qualifica per la fabbricazione additiva, altri sono stati svolti appositamente in relazione alla specifica tecnologia di L-PBF.

1.1 Parametri di processo

Entrando più nel dettaglio di questa tecnologia in Tabella 2 sono riportati i principali parametri di processo con relativi simboli e unità di misura.

Simbolo	Nome	Unità di misura
P	Potenza Laser	W
v	Velocità di scansione	mm/s
t	Spessore dello strato	mm
h_d	Hatching distance	mm
E	Densità di energia	J/mm ³

Tabella 2 - Parametri di processo

La **potenza** del **laser**, P , è uno dei parametri di maggior influenza nel processo e costituisce la sorgente di energia, in questo caso di calore, responsabile della fusione del letto di polvere. Rappresenta anche uno degli aspetti che caratterizza la macchina EOS M290 che come visto precedentemente dispone di un laser con una potenza nominale di 400W mentre sulla piastra

distacco di uno strato dal precedente. Generalmente in questo tipo di processo i valori di t vanno dai 25 μm fino a 100 μm [19]. I valori più bassi sono usati per componenti ad alta risoluzione che presenteranno sul pezzo finito bassi valori di rugosità superficiale, mentre i valori più alti sono da preferire quando è richiesta maggior velocità realizzativa. Infatti, all'aumentare dello spessore t diminuiscono gli strati totali in cui viene diviso il pezzo da produrre e di conseguenza anche il tempo per la sua realizzazione. Viceversa, più piccolo è t maggiori saranno le sezioni 2D da produrre con un conseguente incremento del tempo richiesto per il completamento della lavorazione.

L'*hatching distance* (*distanza di riempimento*), h_d , è la distanza che c'è tra i centri di due traiettorie adiacenti del fascio laser. Per chiarire meglio questo concetto è possibile vedere un esempio in Figura 12, dove oltre a questa sono riportate anche altre grandezze caratteristiche. Si intuisce subito come questa grandezza non debba essere troppo grande al fine di evitare che tra due strisce adiacenti rimanga dello spazio vuoto, o per meglio dire una striscia di polvere non fusa. Per questo un altro parametro che bisogna garantire è quello che viene indicato come “*overlap* between hatching regions” ovvero quanto due strisce adiacenti devono sovrapporsi, grandezza che mediamente risulta essere pari a circa $\frac{1}{4}$ del diametro del fascio laser [22].

La *densità di energia*, E , non è un valore che possiamo scegliere arbitrariamente, ma è il risultato della combinazione dei parametri di processo visti precedentemente, in particolare risulta essere pari a:

$$E = \frac{P}{v t h_d} \quad \left[\frac{J}{\text{mm}^3} \right]$$

Come si evince dalla formula è il rapporto tra la sorgente energetica, la *potenza del laser*, e un volume rappresentato dalle grandezze caratteristiche quali *velocità del laser*, *spessore dello strato* ed *hatching distance*. Potrebbe quindi rappresentare un parametro da approfondire in quanto, mettendo in relazione tra loro diversi parametri di processo se ne potrebbe trarre qualche importante relazione tra *parametri e prodotto*.

Il laser trasmettendo calore alla polvere riesce a fonderla ed a creare il così detto melt-pool di fusione. Questo però, a causa della diffusione del calore, ha una larghezza che è superiore al *diametro del fascio laser*. Si fa quindi una distinzione tra *diametro del fascio laser* e *diametro effettivo del fascio laser*, più grande, il quale appunto rappresenta la larghezza del melt-pool generato.

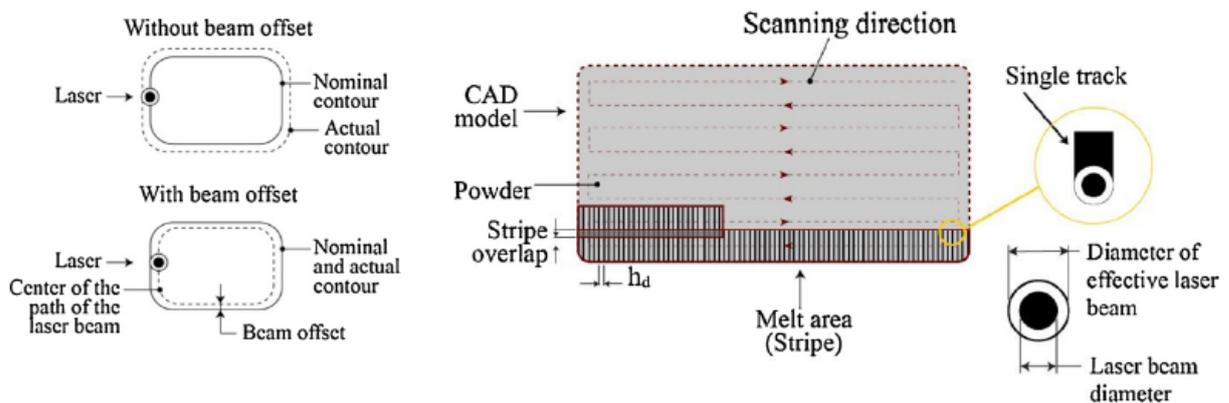


Figura 12 – Rappresentazione grafica di alcuni parametri di processo [23]

Esso potrebbe rappresentare un problema quando nella prima fase di realizzazione del singolo strato vengono effettuati i contorni della parte. Infatti, senza una opportuna correzione si andrebbe incontro ad un errore dimensionale. Per evitare che ciò si verifichi è quindi necessario spostare il percorso del laser verso l'interno del componente di una misura pari a metà del *diametro effettivo del fascio laser* [22]. Questa correzione prende il nome di **beam offset**, e consente di far coincidere la superficie esterna del componente con quella del modello CAD.

Un altro parametro da scegliere è la **strategia di scansione**, ovvero il percorso che deve seguire il laser strato dopo strato. In Figura 13 sono mostrate le diverse strategie che possono essere eseguite. Nel caso *a* ogni strato viene scansionato con il laser che avanza sempre in direzione dell'asse *x*, in ogni strato, mentre nel caso *b* segue la direzione dell'asse *y*; nel caso *c* invece ogni strato è sottoposto a una duplice scansione sia in *x* che in *y*; il caso *d* alterna uno strato scansionato in *x* ad uno in *y*; infine *e* è il caso in cui ogni strato viene scansionato lungo una direzione ruotata di 67° rispetto allo strato precedente e rappresenta la strategia di scansione predefinita impiegata nei dispositivi EOS.

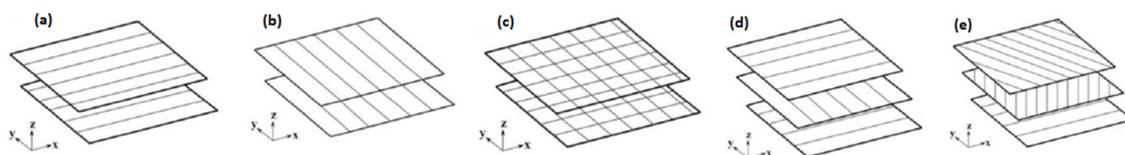


Figura 13 - Strategie di scansione [3]

La scelta dei *parametri di processo* è un'operazione piuttosto complicata che richiede una campagna di sperimentazione mirata e piuttosto ampia, che però deve essere sviluppata per

arrivare alla fabbricazione di un componente con le caratteristiche desiderate. Aldilà quindi di alcuni estremi di accettazione, qualvolta affidati solo al buon senso, il valore del singolo parametro ottenuto da un Design for Experiment (DoE) non è da considerarsi universale, ma risulta essere legato al macchinario utilizzato e alla materia prima coinvolta nel processo. Ad esempio, una variazione della morfologia delle particelle di polvere potrebbe avere delle ripercussioni sulla correttezza dei valori usati fino a tale momento.

1.2 Funzionamento

I passaggi più complessi legati a questa tecnologia sono quelli antecedenti al funzionamento del macchinario, quali la progettazione del componente per essere realizzato mediante fabbricazione additiva, fase che prende il nome di Design for Additive, e la scelta dei *parametri di processo* da usare, che come visto in precedenza è un processo abbastanza oneroso quantomeno da un punto di vista temporale. Il meccanismo di funzionamento di questa macchina e del processo in generale è piuttosto semplice e lineare. Preparato il modello da inserire in macchina, viene attivato il riscaldamento della piattaforma di costruzione fino alla temperatura desiderata, valore che può variare tra 35-200 °C, e successivamente flussato in camera un gas inerte, normalmente Argon, al fine di portare il livello di ossigeno all'0.1% circa, e raggiunti questi obiettivi può quindi partire la lavorazione vera e propria. La piattaforma di costruzione scende di una quota pari a t , mentre il recoter trasla orizzontalmente sul piano $x-y$ dove, grazie ad una lama affilata, prima raccoglie la polvere dalla cima della camera di fornitura e dopo la distribuisce nell'area di lavoro andando così a creare il nuovo strato. Continua quindi il suo moto fino ad arrivare nell'ultima area, a sinistra, dove la polvere in eccesso viene scaricata nell'apposito ambiente di raccolta ed il recoter si ferma. Entra quindi in azione il laser che inizia a fondere localmente il letto di polvere ed una volta terminata la lavorazione del singolo strato il recoter torna alla sua posizione di partenza e il processo si ripete in continuo fino alla realizzazione dell'intero componente.

1.3 Difetti

Le caratteristiche che avrà il componente finito sono il risultato dell'interazione che si ha tra il laser, sorgente di energia, e la polvere, materia prima. È quindi necessario capire cosa succede in questa fase del processo concentrandosi sia sul melt-pool di fusione che ne deriva, sia sugli effetti di una sua successiva rapida solidificazione. Proprio in queste fasi infatti si sviluppano gli eventuali difetti che ritroveremo nel componente e che vogliamo in tutti i modi evitare. Si pone quindi come obiettivo quello di analizzare questi aspetti concentrandosi sui problemi che da essi possono scaturire.

A causa dell'alta velocità di scansione, il laser e il letto di polvere vengono a contatto per un tempo molto breve ma tuttavia sufficiente a riscaldare e fondere le particelle di polvere lungo la traiettoria percorsa del laser. La quantità di energia trasferita in questo passaggio va a determinare la dimensione e la forma del melt-pool, al cui interno si sviluppa un flusso fluido convettivo che prende il nome di “**Flusso di Marangoni**”. Gli elevati gradienti termici che si sviluppano tra il centro del melt-pool e i bordi, ovvero l'interfaccia liquido-solido, più freddi, alimentano questo flusso fluido. A seconda della lega metallica trattata si possono avere dei gradienti di tensione superficiali positivi o negativi; proprio essi determinano il verso del flusso di Marangoni che si viene a generare (Figura 14). Quando la tensione superficiale al centro del melt-pool è più alta di quella ai bordi (gradiente negativo), si crea un moto che va dall'interno verso l'esterno, prendendo così una forma più larga e piatta; viceversa (gradiente positivo), si genera il moto opposto, quindi dall'esterno verso l'interno con il risultato di avere un melt-pool più stretto e profondo [19].

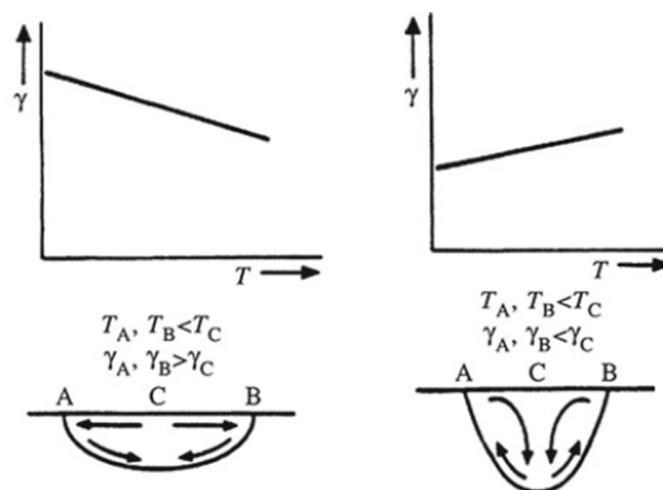


Figura 14 - Effetto del gradiente di tensione superficiale sulla forma del melt-pool [19]

Il *flusso di Marangoni* però non è l'unico fenomeno che coinvolge i moti all'interno del melt-pool. Nella zona sottostante il passaggio del laser infatti si riscontrano temperature molto elevate che possono facilmente raggiungere la temperatura di evaporazione della lega. La pressione generata dal vapore va quindi ad aggiungere delle nuove forze sulla superficie liquida che portano ad una zona di depressione all'interno del melt-pool, proprio sotto al laser [20].

La forma del melt-pool è quindi fortemente influenzata anche da questo aspetto che si va a sommare alle forze generate dal flusso di Marangoni. Il meccanismo illustrato può anche portare alla formazione delle zone di denudazione di materiale, essendo la polvere limitrofa alla traccia fusa stata "richiamata" dalle forze generatesi all'interno del melt-pool e coinvolta nella fusione stessa.

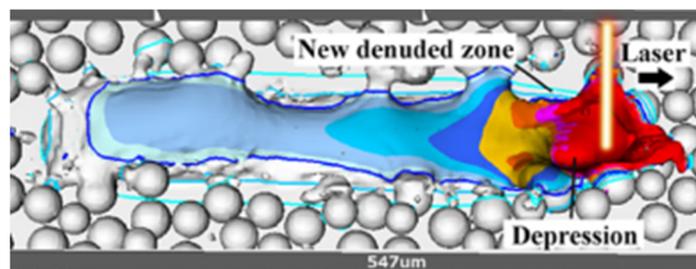


Figura 15 – Rappresentazione del processo fusione-solidificazione [20]

Si comprenda quindi come l'interazione laser-polvere dia origine ad un fenomeno fisico particolarmente complesso. Il melt-pool generato si raffredderà molto velocemente, con una velocità stimata che supera i 10^4 K/s [21], e solidificandosi conserverà la forma che aveva precedentemente acquisito. L'intero meccanismo fusione-solidificazione va così ad influenzare sia la grandezza del grano, generando una struttura granulometrica particolarmente fine, sia la forma della traccia.

Il raggiungimento del denso in un componente meccanico è uno degli obiettivi primari. È quindi necessario cercare di controllare il più possibile il processo di fusione-solidificazione, visto in precedenza, per evitare la presenza di porosità all'interno della parte. Esso risulta ad oggi un obiettivo perseguibile e capace di portare alla realizzazione di componenti con una densità anche superiore al 99%. Tuttavia, all'interno del componente si possono generare diverse forme di micro-vuoti. La **porosità** in un processo tradizionale viene generalmente controllata con l'applicazione di una pressione esterna ed il controllo dei gradienti termici. In un processo di L-PBF, però non è possibile ricorrere al controllo della pressione esterna per evitare la formazione di porosità, ed il processo di fusione-solidificazione deve essere

controllato mediante la scelta di opportuni parametri di processo che regolino i principi visti poc'anzi. Si deve quindi evitare che si formino questo genere di porosità le quali cause possono essere ricercate in un inadeguato compattamento del letto di polvere, in una mancanza di polvere nelle zone di denudazione, viste precedentemente, ed anche nel gas generatosi durante la fase di fusione e rimasto intrappolato nel melt-pool fino alla sua solidificazione. Alcuni produttori di sistemi di L-PBF, in particolare EOS GmbH, al fine di ridurre i problemi della porosità nati dal flusso interno di gas inerte, hanno brevettato una strategia di scansione in cui la direzione di avanzamento del laser è opposta a quella del flusso di gas, così che i fumi non interferiscano con il laser (Figura 16 e Figura 17).

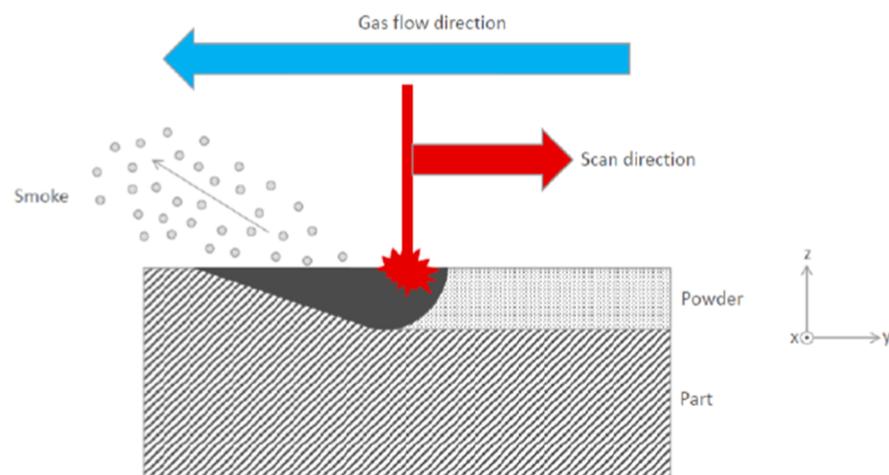


Figura 16 - Strategia di costruzione brevettata da EOS [4]

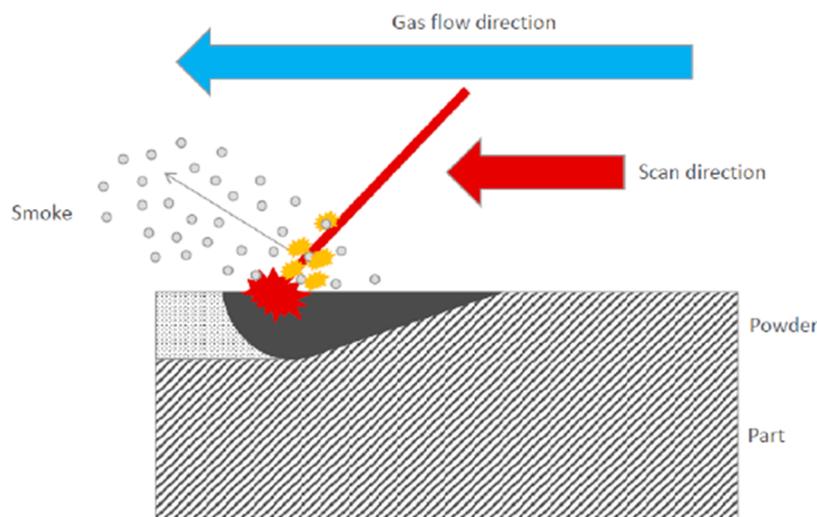


Figura 17 - Interferenza dei fumi con il laser [4]

Sotto determinate condizioni, si manifesta l'instabilità di *Plateau-Rayleigh*, la quale porta allo sviluppo dell'effetto **balling**. Questo si manifesta come una traccia di scansione

discontinua formata da piccole sfere solide che si susseguono. Ciò è causato dalla tensione superficiale la quale tende a minimizzare la superficie libera formando così delle piccole sfere liquide, che non riuscendo a bagnare come dovrebbero lo strato sottostante, solidificano sotto questa stessa forma. È facile intuire come questa discontinuità nella traccia di scansione porti alla generazione di nuovi micro-vuoti e ad una maggiore rugosità della superficie. Al fine di evitare l'insorgere di questo effetto si deve porre attenzione ai parametri di processo impiegati ed alla densità di energia trasmessa al letto di polvere. La durata prolungata della fase liquida potrebbe infatti accentuare questo problema [19].

Come visto precedentemente i forti gradienti termici, intrinsecamente presenti nel processo, generati dall'utilizzo di una sorgente ad elevata potenza come quello laser, giocano un ruolo molto importante in questa fase del processo. Oltre ad influenzare i moti all'interno del melt-pool bisogna soffermarsi anche su un altro effetto da loro generato, ovvero quello delle **tensioni residue**. Esse possono avere diverse origini. Quando il laser effettua una scansione lo strato sottostante che si trova allo stato solido, viene raggiunto dal calore e tende quindi ad espandersi ma non avendo spazio per farlo si ritrova sottoposto ad uno stato tensionale di compressione. Le tensioni che si vengono così a creare possono talvolta raggiungere il limite di snervamento e indurre quindi una deformazione plastica [21]. Durante la fase di raffreddamento il substrato tende invece a ridursi ma il restringimento è di nuovo limitato dagli strati più freddi adiacenti, portando a delle nuove tensioni di trazione lungo la superficie superiore. Questo tipo di stato tensionale che si viene a creare all'interno della parte può portare alla nascita e alla propagazione di **crepe** interne e anche "all'arricciamento" dei bordi del componente. Per ridurre lo stato tensionale all'interno del componente si devono quindi prendere delle contromisure. Diversi tipi di operazioni possono essere eseguite per mitigare tale fenomeno e quindi ridurre il valore delle tensioni residue sul componente:

- Un'opportuna scelta della strategia di scansione;
- Pre-riscaldamento della piattaforma di costruzione;
- Un trattamento termico sul componente nella fase di post-processo;

Conseguenza diretta di uno stato tensionale elevato all'interno del componente sono le **deviazioni geometriche**, ovvero differenze tra il modello CAD e il pezzo finito. Possono essere però causate anche da altri fattori come una scelta erronea dei parametri di processo, inopportuna calibrazione del macchinario o ancora un'inaccurata pulizia di elementi come

la lama del recoter o della lente costituente in sistema ottico. Si rende necessario, delle volte, inserire delle strutture di supporto anche dove non normalmente richieste sia per migliorare la diffusione del calore sia per conferire maggior stabilità alla struttura e precisione realizzativa a determinati elementi del componente come ad esempio garantirne una maggiore circolarità della superficie.

Infine, troviamo il **Keyhole** un tipo di difetto riscontrabile anche nei processi di saldatura. Ciò è giustificato dalla somiglianza che vi è tra i due processi. Infatti, la sorgente laser colpisce il letto di polvere, come già detto, fondendolo localmente. Si forma quindi un melt-pool di fusione che può avere, sotto determinati parametri di processo come ad esempio una elevata potenza laser, una forma stretta e profonda. In seguito ad i moti convettivi precedentemente visti ed ai fumi che si generano è possibile che durante la solidificazione del fuso si vengano a generare dei micro-vuoti dovuti ad i fumi rimasti intrappolati nel fuso. Più è profondo il melt-pool più è probabile che un fenomeno simile si verifichi.

Di seguito è stata rappresentata una tabella che mette in relazione tra loro *parametri di processo, difetti e fasi di processo*. Da essa è possibile avere una visione schematica e riassuntiva dei difetti e dei parametri di processo che li determinano, facendo un'ulteriore distinzione in base alla fase di processo nella quale ci si trova. Sono quindi state scelte quattro fasi principali che sono state chiamate: *materia prima, preparazione file macchina, macchinario e processo*, riassuntive del processo di produzione. All'interno della tabella sono invece presenti i parametri di processo; individuato uno, salendo verticalmente è possibile vedere in che fase del processo siamo, mentre traslando orizzontalmente vedere che tipo di difetto induce sul pezzo finito un valore inappropriato di tale parametro (Tabella 3).

FASE					
	Materia prima	Preparazione file macchina	Macchinario	Processo	
DIFETTI NEL PEZZO	Porosità	<ul style="list-style-type: none"> ● Forma e dimensione della particella ● Distribuzione particella ● Contaminazioni 		<ul style="list-style-type: none"> ● Spessore dello strato ● Hatching distance ● Strategia di scansione ● Potenza laser ● Velocità di scansione 	
	Deviazioni geometriche	<ul style="list-style-type: none"> ● Forma e dimensione della particella ● Contaminazioni 	<ul style="list-style-type: none"> ● Discretizzazione modello matematico (STL) ● Orientamento della parte ● Progettazione supporti 	<ul style="list-style-type: none"> ● Spessore dello strato ● Strategia di scansione ● Fattore di scala (Δx, Δy) ● Beam offset 	
	Tensioni residue		<ul style="list-style-type: none"> ● Orientamento della parte ● Progettazione supporti 	<ul style="list-style-type: none"> ● Pre-riscaldamento piattafoma ● Potenza laser 	<ul style="list-style-type: none"> ● Spessore dello strato ● Potenza laser ● Strategia di scansione ● Velocità di scansione
	Balling	<ul style="list-style-type: none"> ● Forma e dimensione della particella 		<ul style="list-style-type: none"> ● Ossigeno in camera 	<ul style="list-style-type: none"> ● Spessore dello strato ● Potenza Laser ● Velocità di scansione
	Keyhole				<ul style="list-style-type: none"> ● Potenza Laser ● Velocità di scansione

Tabella 3 - Influenza dei parametri di processo su specifici difetti

2 – Qualifica di processo

2.1 Materia prima

In un processo di L-PBF la materia prima si trova sottoforma di polvere con particelle della dimensione media di 20-60 μm [24] e variabile, più nello specifico, in base al materiale impiegato. Essa costituisce la base di partenza per la realizzazione del componente e assume un ruolo di notevole importanza. Infatti, si sono riscontrate diverse relazioni tra le proprietà della polvere e le caratteristiche del prodotto finito. Di conseguenza servirà un'opportuna analisi della materia prima al fine di valutarne le caratteristiche e quindi l'idoneità con i requisiti richiesti affinché si raggiungano i risultati desiderati sul prodotto finito. Inoltre, è di primaria importanza conoscere le caratteristiche della materia prima in quanto necessarie per la corretta scelta dei *parametri di processo* da impiegare nella lavorazione al fine di ottenere un prodotto di qualità e rendere più efficiente la produzione. Uno degli aspetti più importanti della polvere è che sia affidabile, ovvero che possa garantire la *prevedibilità* e *ripetibilità* del processo.

Si riportano di seguito alcune delle proprietà che è opportuno conoscere della materia prima che si intende utilizzare:

- Forma e dimensione della particella
- Distribuzione delle particelle
- Composizione chimica
- Temperatura di fusione
- Conducibilità termica
- Calore specifico

- Assorbanza

L'assorbanza viene definita come il rapporto tra la parte di radiazione assorbita dal materiale e la radiazione incidente emessa dalla sorgente laser. La conoscenza di tale valore ci permette di regolare opportunamente la *potenza laser* ed altri parametri di processo. Inoltre, ci permettono di valutare la densità di energia trasmessa al materiale e rendere confrontabili i *parametri di processo* con materie prime differenti. Raggiunta la fase liquida invece assumono importanza valori quali capacità termica e calore latente, nell'eventuale caso si volesse approfondire lo studio analizzando la diffusione del calore all'interno della parte.

La polvere, per essere di buona qualità, deve possedere determinate caratteristiche tra le quali un elevato valore di sfericità, una superficie molto liscia e di conseguenza non presentare satelliti, un valore alto di densità apparente ovvero non deve presentare porosità interne e più in generale, un lotto di polvere deve possedere una buona distribuzione granulometrica. Infatti, proprio quest'ultimo aspetto risulta di primaria importanza quando si vuole ottenere uno strato di polvere omogeneo e compatto, con un valore di micro-vuoti più basso possibile. Come si evince in Figura 18 tale obiettivo si può raggiungere con una determinata distribuzione granulometrica che prevede anche una, seppur ridotta, presenza di particelle di dimensioni inferiori che vadano ad occupare i vuoti lasciati da quelle più grandi. La corretta combinazione di particelle di differente dimensione porta ad un lotto di polvere di buona qualità.

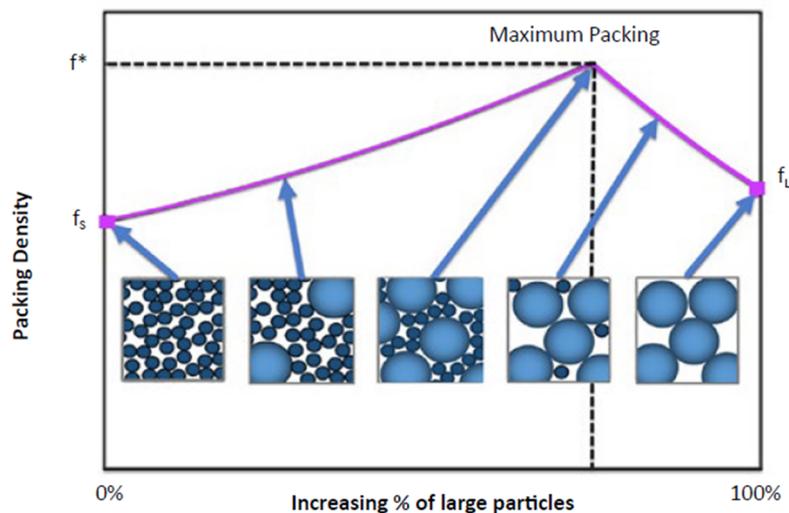


Figura 18 – Relazione tra distribuzione della polvere e livello di impacchettamento [24]

Riuscire a creare uno strato di polvere compatto ed omogeneo nella piattaforma di costruzione, strato dopo strato, ci consentirà di raggiungere una densità nel prodotto finito

molto vicina a quella teorica. Un'altra caratteristica molto importante che deve possedere la polvere, per far sì che la lama di distribuzione formi uno strato di polvere con le proprietà prima citate, è che abbia un buon valore di scorrevolezza, che come vedremo successivamente rappresenta uno dei valori da misurare quando si analizza un campione di polvere. Al contrario particelle con forme più allungate e irregolari, ruvide e con distribuzione non opportuna portano alla nascita di diversi micro-vuoti all'interno della parte con ripercussioni sia sulla densità che sulle caratteristiche meccaniche del componente finito.

La Figura 19 invece riporta diverse immagini, ottenute attraverso il microscopio elettronico a scansione (SEM), di alcune particelle di polvere in funzione della forma e delle caratteristiche esterne. La singola particella può assumere forme e caratteristiche non conformi al tipo di impegno richiesto. Per riuscire quindi ad ottenere una particella con le caratteristiche desiderate (Figura 19 a) è opportuno scegliere il metodo di produzione della polvere che più si presta a tale scopo. Possono presentarsi particelle con forma non sferica ma allungata (Figura 19 d), sferica ma con presenza di satelliti (Figura 19 h), veri e propri agglomerati di particelle di diversa dimensione (Figura 19 f), particelle con porosità aperte o addirittura interne (Figura 19 c) o ancora rotte (Figura 19 e). Sono difetti tendenzialmente indesiderati che vengono tenuti in considerazione da chi utilizza tecnologie additive quando si tratta di valutare la qualità delle polveri perché, al pari di altri difetti come la presenza di ossidi superficiali, possono contribuire alla formazione di porosità all'interno dei pezzi prodotti e ad abbassarne quindi gli standard qualitativi.

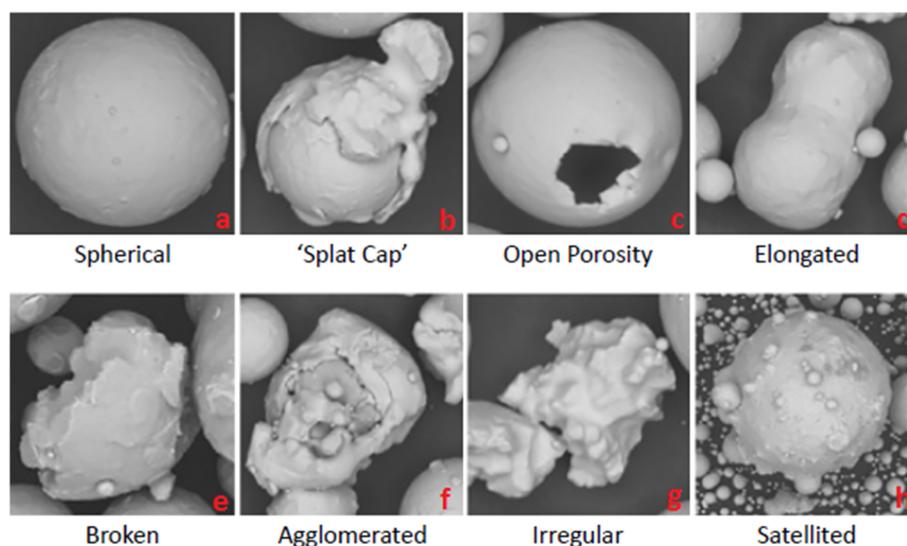


Figura 19 – Forme sotto le quali si può presentare una particella di polvere [24]

Questa tecnologia vede l'impiego di diversi materiali per differenti applicazioni, di cui si vuole riportare una breve sintesi:

- Acciaio e leghe ferrose: se ne trovano diverse, tra le quali l'acciaio inox 316L e il 904L, l'AISI Maraging 300, acciai da utensile H20 e X110CrMoVAI 8-2 e leghe Fe-Ni, Fe-Ni-Cr, Fe-Al e Fe-Cr-Al. Grazie alla combinazione di resistenza, duttilità e biocompatibilità questi materiali trovano applicazione in settori che producono componenti ad alto valore aggiunto, come ad esempio protesi per il settore medico, scambiatori termici nel settore energetico e componenti leggeri per il settore automotive e aerospace. [25]
- Leghe di titanio: oltre al titanio commercialmente puro, vengono utilizzate anche leghe come Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Ti-24Nb-4Zr-8Sn, Ti-13Zr-Sn, Ti-13Nb-13Zr; le applicazioni più interessanti riguardano la realizzazione di protesi per il settore medico e la produzione di palette di turbina per motori aeronautici. In letteratura viene inoltre riportato un caso in cui con una macchina EOSINT M270 (molto simile a quella studiata in questo elaborato) è stata prodotta una protesi cranica personalizzata per il paziente, la quale ha permesso di ridurre molto le ore dell'intervento. [25]
- Leghe a base di Nichel: Tra queste leghe le più usate sono quelle per applicazioni ad elevate temperature come Inconel 625, Inconel 718, Chromel, Hastelloy X, Nimonic 263, IN738LC e MAR-M 247; Queste superleghe sono caratterizzate da un'eccellente resistenza alla corrosione e resistenza meccanica alle alte temperature, ottima resistenza a fatica e all'usura e buona saldabilità per questo sono impiegate soprattutto per la realizzazione di palette di turbina per motori aeronautici o turbine a gas per la produzione di energia. [25]
- Leghe d'alluminio: come materiali sono stati utilizzati alluminio puro, Al6061, AlSi12, AlMg, AlSi7Mg e soprattutto l'**AlSi10Mg**, una lega da fonderia caratterizzata da buona resistenza meccanica e durezza e ampiamente utilizzata nel settore automotive. [25]

Come precedentemente detto nei precedenti capitoli, in questo caso studio ci si è concentrati sulla lega d'alluminio AlSi10Mg ricercando le principali caratteristiche di questo tipo di polvere che vede ancora oggi subire delle modifiche da parte dei produttori al fine di perfezionarla per meglio adattarla a questo processo produttivo.

2.1.1 Metodi di produzione

Vengono utilizzate diverse tecniche di produzione di polveri metalliche pensate per soddisfare le esigenze di una grande varietà di applicazioni. È possibile produrre polveri di quasi tutti i metalli ed i sistemi attualmente in uso consentono di controllare con un alto livello di precisione la composizione chimica e le caratteristiche fisiche delle polveri prodotte. Inoltre, consentono la personalizzazione di specifici attributi per renderle funzionali a ben specifiche applicazioni. Nonostante ciò, ancora oggi si cerca di migliorare lo sviluppo e l'innovazione tecnica per la produzione di polveri metalliche al fine di soddisfare requisiti di qualità più elevati, cercare di ridurre il costo di produzione e raggiungere caratteristiche per nuove applicazioni emergenti.

Le tecniche per la produzione di polveri metalliche possono essere suddividere in *metodi meccanici* o *chimici*. I metodi comunemente utilizzati comprendono l'atomizzazione in acqua o in gas, la macinatura (milling), l'elettrolisi ed altri metodi chimici. La scelta della tecnica di produzione più opportuna viene fatta in base fattori come: tassi di produzione richiesti, proprietà della polvere e dalle caratteristiche chimico-fisiche del materiale. Ad esempio, per polveri con elevato gradi di purezza si utilizzano metodi chimici ed elettrolitici, per metalli duri e ossidi invece si ricorre alla comminazione meccanica (o milling). L'atomizzazione invece risulta essere il metodo più versatile che permette di produrre con una vasta gamma di velocità di produzione, che può andare da 1 a 105 tonnellate/anno, ed offre anche una buona varietà di dimensione della particella che si aggira nel range dei 10-1000 μm [26]. Dimensioni tipiche delle particelle di polvere metallica ottenute per atomizzazione sono visibili in Figura 20.

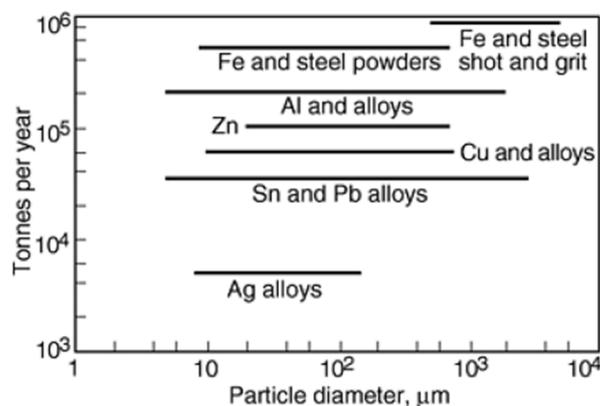


Figura 20 – Range di dimensioni delle particelle per differenti materiali [26]

L'**atomizzazione** è il metodo dominante per la produzione di polveri metalliche e per questo motivo proprio su di essa ci concentreremo maggiormente. Grazie ad essa si possono ottenere polveri di alluminio, leghe di alluminio, ferro, leghe leggere di acciai, acciai inossidabili, acciai per utensili, titanio e leghe di titanio, ottone ed altre leghe. Inoltre, l'atomizzazione è diventata la tecnica dominante per la produzione di polveri metalliche in quanto gli elevati tassi di produzione giocano a favore dell'economia di scala del processo e perché polveri di materiali pre-legati possono essere ottenute solo con questo metodo [26].

L'atomizzazione non è altro che la rottura di un liquido in goccioline molto fini. Qualsiasi materiale che si trovi in forma liquida può quindi essere atomizzato. In generale la dimensione media della particella è inferiore ai 150 μm , ma si possono ottenere anche particelle con dimensioni maggiori con metodi simili ma che prendono il nome di "shotting" o "granulazione".

Esistono a loro volta differenti metodi di atomizzazione industriale tra cui troviamo:

- Atomizzazione a due fluidi: il metallo liquido viene disgregato in goccioline tramite un urto con getti ad alta pressione di gas, acqua o olio. (Figura 21 "a" e "b")
- Atomizzazione centrifuga: una corrente liquida viene dispersa in goccioline dalla forza centrifuga trasmessa da un disco, una tazza o un elettrodo, in rotazione. (Figura 21 "c")
- Atomizzazione del gas solubile: il metallo fuso è reso sovrassaturo da un gas che causa l'atomizzazione nel vuoto del metallo. (Figura 21 "d")
- Atomizzazione ad ultrasuoni: un film di metallo liquido è agitato dalla vibrazione ultrasonica e porta alla formazione delle goccioline. (Figura 21 "e")

Tutte queste tecniche produttive sono impiegate per la produzione commerciale di polveri metalliche, ma il metodo di atomizzazione a due fluidi (con gas o acqua) rappresentano circa il 95% della capacità produttiva mondiale. Le polveri di Alluminio e leghe di Alluminio sono prodotte quasi esclusivamente con il metodo dell'atomizzazione a due fluidi, per questo motivo nel proseguo ci si concentrerà su di esse.

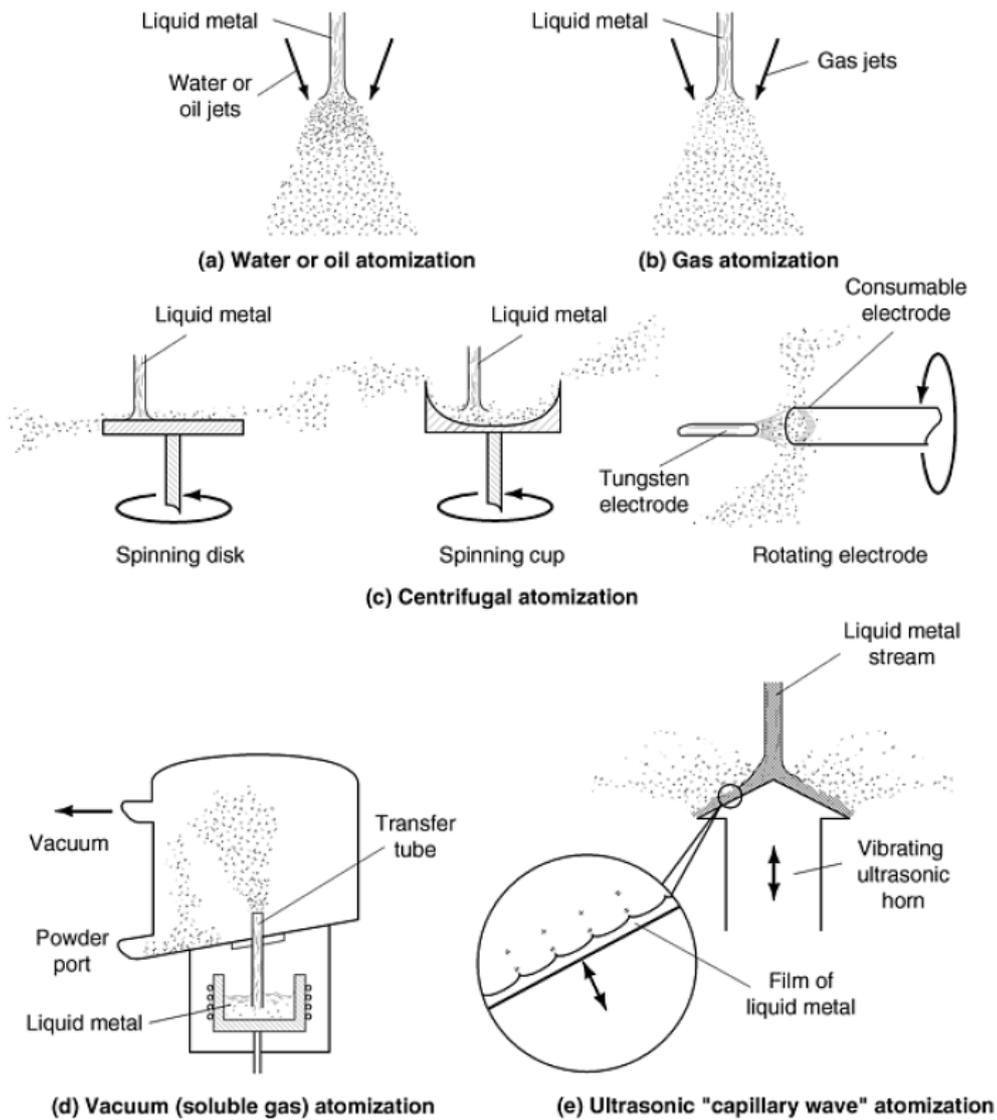


Figura 21 - Tipologie di atomizzazione industriale [26]

2.1.1.1 Atomizzazione a due fluidi: Gas

Questo tipo di processo è stato brevettato da Marriot of Huddersfield nel 1872 ed è tradizionalmente impiegato per ottenere delle particelle di polvere con la forma sferica. Il metodo di funzionamento consiste nel separare e disperdere il metallo liquido grazie all'azione di un getto ad alta velocità di un gas, che può essere aria, azoto, argon, o elio. La scelta del tipo di gas da impiegare nel processo dipende dal materiale che si sta lavorando infatti quando si atomizzano materiali reattivi è opportuno usare gas inerti per evitare l'ossidazione della particella. Questa tecnica consente di lavorare diversi metalli come alluminio e le sue leghe, titanio e le sue leghe, leghe a base di nichel, magnesio, zinco ed

altri ancora. Com'è possibile vedere in Figura 22, all'interno dell'ugello vi è il materiale fuso che scorre, per effetto della gravità, all'interno di un canale alla fine del quale viene colpito da un getto di gas che separa il fuso. L'opportuna calibrazione di parametri come la velocità e la densità del getto di gas che investe il flusso fuso ci consente di ottenere particelle dell'ordine dei 40-60 μm . In figura è presente anche una immagine al SEM delle particelle della lega Ti64 in cui è possibile osservare uno degli aspetti che contraddistingue questa tecnologia, ovvero che permette la realizzazione di particelle dalla forma sferica e liscia. Il gas possiede una capacità termica inferiore a quella dell'*acqua* e ciò comporta un tempo di solidificazione della particella maggiore che porta ad ottenere una forma sferica e una superficie più liscia.

Un grande pregio di questa tecnologia è proprio la morfologia della particella che si riesce ad ottenere. Bisogna però anche evidenziare due aspetti negativi legati a questo processo. È possibile che durante la rottura del fuso che porta alla generazione della particella una parte del gas resti intrappolata all'interno di essa generando così delle porosità interne alla particella. Le dimensioni di questi micro-vuoti possono variare sostanzialmente ed in alcuni casi estremi possono raggiungere anche i 50 μm . Tali difetti sono rilevabili successivamente mediante TAC o cross-section del campione di polvere, ma essendo intrinseci alla tecnologia non sono evitabili. Un'altra imperfezione legata al processo è la presenza di piccoli "satelliti" (particelle di dimensioni molto piccole) sulla superficie di particelle più grandi. Ciò è causato dal fatto che all'interno della camera di atomizzazione il flusso di gas trasporta con sé le particelle più piccole, le quali urtano particelle più grandi ancora parzialmente fuse rimanendovi attaccate.

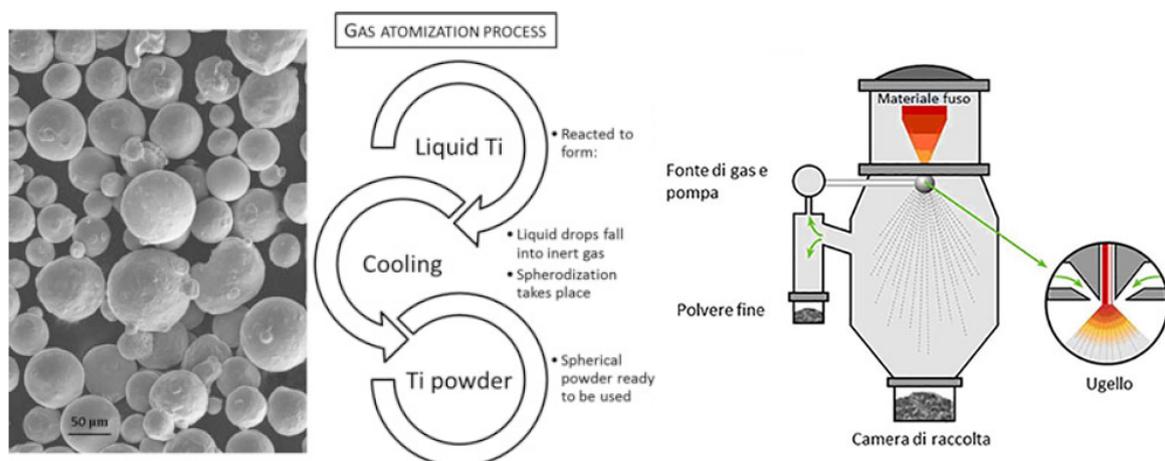


Figura 22 - Atomizzazione tramite gas [7] [27]

2.1.1.2 Atomizzazione a due fluidi: acqua

Rappresenta uno dei metodi più usati nella produzione di polvere metallica, ma può essere impiegato solo quando si lavorano materiali non reattivi, come ad esempio l'acciaio. Questo tipo di tecnica è molto simile a quella analizzata precedentemente, ma presenta qualche piccola differenza che però porta a risultati notevolmente diversi. A causa della presenza dell'acqua è necessario modificare l'impianto, rispetto al caso precedente, con l'aggiunta di dispositivi per la disidratazione e asciugatura delle polveri ottenute. In questo caso il mezzo impiegato per la rottura del fuso e quindi per l'ottenimento della polvere è l'*acqua*.

La quantità di ossigeno durante l'atomizzazione influenza fortemente la morfologia della particella di Alluminio, e si riscontra una notevole differenza tra quelle ottenute in atmosfera inerte e quelle in atmosfera non controllata. Gli ossidi che si formano sulla superficie liquida della particella infatti contrastano le forze di tensione superficiali le quali garantirebbero una forma sferica. Test specifici, con atmosfere gassose a differente contenuto di ossigeno, hanno evidenziato come questo fenomeno si manifesti bruscamente quando la presenza di ossigeno raggiunge il 2- 4% [26]. Inoltre, l'acqua possiede una capacità termica più alta rispetto a quella del *gas*, determinando tempi di solidificazione molto rapidi i quali ostacolano la sferoidizzazione delle particelle formando così particelle di polvere dalla forma irregolare. Tra i vantaggi offerti da questa tecnica vi è quello economico, infatti l'utilizzo dell'acqua permette di ridurre i costi sia per il mezzo in sé sia per la sua gestione. Di contro si ha la presenza di impurità, specialmente di ossidi, ed una morfologia che non si presta a dovere a quella che rappresenta la condizione di ottimo per il tipo di processo in esame in questo elaborato.

2.1.1.3 Atomizzazione al plasma

Una tecnica più moderna rispetto a quelle viste precedentemente, che consente di arrivare ad ottimi risultati dal punto di vista delle caratteristiche finali delle particelle prevede l'impiego del *plasma*. Questa tecnica si divide in due varianti, molto simili tra loro, a seconda della materia prima trattata [24]:

- RF-PA (Radio Frequency Plasma Atomisation): si parte da un filamento metallico
- RF-PS (Radio Frequency Plasma Spheroidisation): si parte da della polvere metallica grezza

Entrambi i processi al plasma consistono nel riscaldamento e nella fusione del materiale alimentato, che sia esso sotto forma di filamento o di polvere, seguito da una fase di solidificazione in condizioni controllate. È importante che le goccioline fuse abbiano il tempo di completare la loro solidificazione prima di raggiungere il fondo della camera e per far ciò si deve controllare il tempo di volo della particella al suo interno. Inoltre, la morfologia della polvere che si ottiene è funzione del design dell'ugello e della velocità d'uscita del materiale da esso, oltre al già citato tempo di volo. La dimensione media della particella ottenibile con questo processo varia in base ad i parametri prima citati e va da pochi micrometri fino a 200 μm [27].

Questa tecnica viene utilizzata nel caso di RF-PA per ottenere della polvere da quello che è inizialmente un filamento metallico, invece nel caso di RF-PS si ha una trasformazione meno netta. In questo caso infatti l'obiettivo è quello di cambiare le caratteristiche della polvere (prodotta con differenti metodi, di qualità peggiore o riciclate) e si ha la possibilità di migliorare la morfologia, rendendo le particelle inizialmente di forma irregolare sferiche, aumentarne quindi le proprietà di scorrevolezza, diminuirne la porosità interna ed infine aumentarne la purezza. In Figura 23 è possibile vedere un'immagine al SEM della polvere di Titanio ottenuta con tale processo, un diagramma di processo per il caso sferoidizzazione e infine sulla destra uno schema di funzionamento della camera di processo per il caso atomizzazione [7].

È possibile trattare con questa metodologia differenti materiali come leghe di Titanio, di Acciaio inossidabile, leghe di Alluminio e superleghe di Nichel.

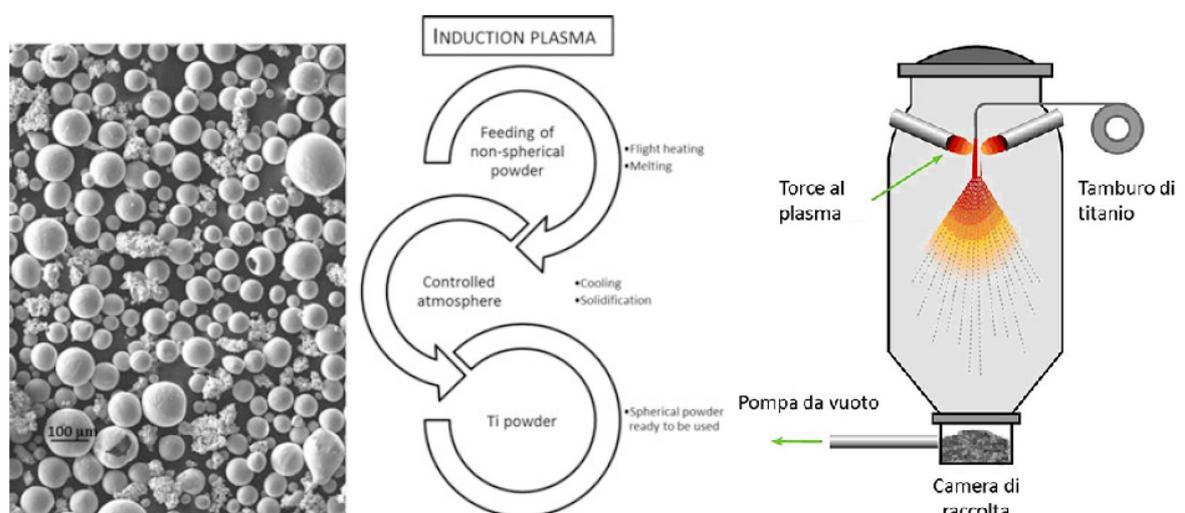


Figura 23 – Sferoidizzazione e atomizzazione al plasma [7] [27]

2.1.2 Caratterizzazione della materia prima

Uno dei passaggi più importanti nell'intero ciclo produttivo riguarda proprio la caratterizzazione della materia prima. Come visto precedentemente essa ricopre un ruolo fondamentale per la realizzazione di un componente di buona qualità. Bisogna quindi disporre di una procedura di caratterizzazione delle polveri che assicuri che la materia prima che si intende utilizzare soddisfi i requisiti dalla specifica tecnica produttiva. È quindi stata condotta una ricerca bibliografica con l'obiettivo di raccogliere tutte le prove eseguibili su un campione di polvere, per poi selezionare le più significative, da effettuare ogniqualvolta si debba validare un nuovo lotto di polvere. Di seguito verranno riportate le principali prove da eseguire su di un campione con i relativi riferimenti normativi.

2.1.2.1 Composizione chimica

La composizione chimica può essere valutata con il test Inductively Coupled Plasma (ICP) standardizzato dalla ASTM E1479 in accordo con la ISO/IEC 17025 [28]. Questo test permette di conoscere la percentuale in peso dei principali elementi di lega. Si riportano i valori di tale test forniti nella scheda tecnica di EOS per la lega AlSi10Mg di sua produzione e oggetto di studio:

Elemental analysis according to ASTM E1479 (ICP/OES).					
Element	Unit	DIN EN 1706	Lower limit	Upper limit	Result
Al	wt.%	Balance	bal	bal	Bal
Si	wt.%	9.0 – 11.0	9.0	11.0	9.7
Fe	wt.%	max. 0.55	-	0.55	0.2
Cu	wt.%	max. 0.05	-	0.05	<0.01
Mn	wt.%	max. 0.45	-	0.45	<0.01
Mg	wt.%	0.20 – 0.45	0.20	0.45	0.38
Ni	wt.%	max. 0.05	-	0.05	0.01
Zn	wt.%	max. 0.10	-	0.10	<0.01
Pb	wt.%	max. 0.05	-	0.05	<0.05
Sn	wt.%	max. 0.05	-	0.05	<0.05
Ti	wt.%	max. 0.15	-	0.15	0.01
Other elements, each	wt.%	max. 0.05	-	0.05	<0.05
Other elements, total	wt.%	max. 0.15	-	0.15	<0.15

Figura 24 - Composizione chimica AlSi10Mg, produttore EOS [29]

Nella colonna con la dicitura “DIN EN 1706” i valori che la stessa norma stabilisce per poter definire la lega di Alluminio come AlSi10Mg. È quindi necessario che i risultati di tale prova rientrino in tali valori. Inoltre, occorre assicurarsi che la lega non presenti contaminanti.

Questa procedura è applicabile in ugual modo sia per un campione di polvere vergine sia per uno di polvere riciclata da precedenti lavorazioni.

2.1.2.2 Morfologia e analisi al SEM

Come visto la forma della particella ha un notevole peso sulle caratteristiche finali del componente. Bisogna quindi assicurarsi che le particelle siano della forma desiderata, ovvero il più possibile sferica e presentino una superficie liscia. Particelle così fatte infatti presenteranno anche miglior scorrevolezza oltre a favorire un grado di impaccettamento migliore. Non sono presenti degli standard precisi legati alla valutazione della polvere utilizzata nel campo dell’additive manufacturing e l’unico riferimento normativo in questo campo è legato alla terminologia da impiegare nella descrizione metallurgica delle polveri. Gli standard ASTM B243 o ISO 3252 vanno infatti a definire un vocabolario di termini da utilizzare nella descrizione della particella. Infine, ISO 9276 parte 6, fornisce un modello per descrivere e rappresentare quantitativamente la morfologia delle particelle.

Prima di poter descrivere le particelle è però necessario acquisire delle immagini che permettano di valutare le loro caratteristiche. A tale scopo si ricorre al microscopio elettronico a scansione “SEM” (Scanning Electron Microscope) il quale ci permetterà di catturare delle immagini chiare che mostrino particelle fino ad una dimensione di 0.02 nm. A conferma di quanto detto viene riportato in Figura 25 un esempio estratto dalla ISO/ASTM DIS52907 (2018), di come dovrebbe avvenire la fase di caratterizzazione della morfologia della polvere.

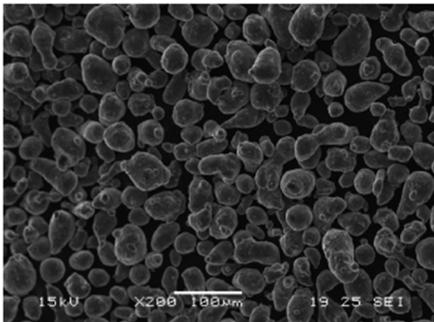
Pictures	Description
	<p>Alloy base: Aluminium</p> <p>Powder production process and product description: Gas atomization AlSi10Mg 10 - 45µm.</p> <p>Particle shape: The virgin batch appears to consist of relatively small, and a mix of elongated and spherical particles. The surface of the particles is smooth. The phenomenon of “Satellite” particles is barely noticeable in this batch.</p>

Figura 25 - Esempio di caratterizzazione della morfologia della polvere [30]

2.1.2.3 Dimensione e distribuzione delle particelle

Ulteriore aspetto chiave in un processo di AM è la dimensione media della particella e la sua distribuzione. Infatti, questi due valori sono specifici per il processo di deposizione del letto di polvere e per quello di fusione. Di conseguenza la dimensione della particella andrà ad influenzare la scelta del parametro *spessore dello strato*, t .

Il metodo più semplice ed utilizzato per misurare la dimensione delle particelle è il setacciamento. Questo strumento viene impiegato non solo per misurare la dimensione delle particelle di un campione vergine, ma può essere usato anche come strumento per il controllo della polvere riciclata da impiegare nella produzione di un nuovo pezzo. Ci sono però anche metodi elettronici di misura più prestanti, che offrono maggiore velocità, risoluzione e sensibilità maggiore rispetto ai setacci, garantendo una quantità di dati maggiori e più precisi. Per questo scopo è prevista una procedura standardizzata per la caratterizzazione delle polveri utilizzate in processi AM, ovvero lo standard ASTM F3049-14. Si riporta di seguito una parte di una tabella estrapolata dalla ISO/ASTM/DIS 52907 contenente le tecniche, con relativi riferimenti normativi, più comunemente impiegate e riscontrabili in una scheda tecnica fornita da un produttore di queste polveri (Tabella 4).

Method	Typical range (varies between instruments)	Expression of results
Laser diffraction (ISO 133320)	0.1 μm - 3mm	Cumulative volume percentages on a plot, with calculated values D_x at which X% of the total volume is below this value.
Light scattering (ISO 22412, ASTM B822)	1 nm- 0.1mm	Either the number or volume of particles in each size interval.
Sieving (ISO 2591-1, ISO4497, ASTM B214)	$\geq 45\mu\text{m}$	The amounts of particles present in specified particle size intervals, expressed as a percentage of the total particles.

Tabella 4 - Metodi di analisi di dimensione e distribuzione polveri. [ISO/ASTM/DIS 52907]

Morfologia, dimensione e distribuzione delle particelle costituiscono gli aspetti chiave che permettono un confronto qualitativo tra lotti di polvere differente.

In Figura 26 possiamo vedere il risultato che si ottiene dall'analisi della distribuzione di un campione di polvere. Inoltre, vengono solitamente riportati in una tabella a parte i valori corrispondenti al 10% (d_{10}), 50% (d_{50}), 90% (d_{90}) della curva cumulata di distribuzione.

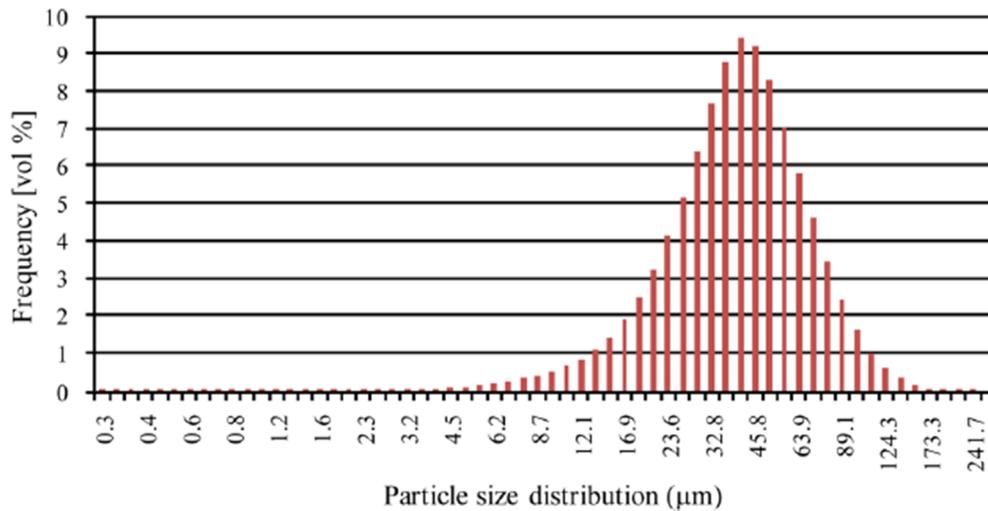


Figura 26 - distribuzione polvere di un campione di AlSi10Mg [28]

2.1.2.4 Densità

Si riscontrano due principali densità nella caratterizzazione di questo tipo di polveri, che la British Standards Institution definisce come:

- Apparent density: Massa di polvere diviso il suo volume apparente. In questo caso la polvere viene messa in un contenitore di volume noto, senza in alcun modo agevolare la compattazione della polvere.
- Tap density: Densità apparente ottenuta sotto condizioni standard di “tocco”. Questo valore di densità viene raggiunto in seguito ad una compattazione che avviene grazie a delle vibrazioni meccaniche eseguite da un apposito strumento, sotto condizioni standard.

La *Tap density* non è una proprietà intrinseca del materiale ma è strettamente dipendente dalla forma, dimensione e distribuzione delle particelle oltre che dallo standard eseguito per l'esecuzione della prova. Questo tipo di prova è standardizzata secondo le norme ISO 3953 o ASTM B527 e per la determinazione del cilindro graduato più adatto ad essere utilizzato in questa prova è necessario prima misurare la densità apparente.

La *densità apparente* può essere determinata con il metodo ad imbuto di *Hall* secondo lo standard ISO 3923-1 o ASTM B212 per la polvere che scorre libera. Per la polvere che non riesce a scorrere libera ci si riferisce al metodo ad imbuto di *Carney* in accordo ancora con ISO 3923-1 e nel caso in cui nemmeno questo dovesse portare ad un esito positivo della prova si passa all'apparecchio *Scott* con riferimento a ISO 3923-2 o ASTM B329 [30].

Sia la *densità apparente* sia la *tap density*, con i riferimenti precedentemente riportati, si prestano in modo opportuno all'analisi delle polveri impiegate nei processi di AM [31].

2.1.2.5 Flowability

Per le polveri impiegate in processi di AM è richiesta una caratterizzazione dal punto di vista della scorrevolezza, in particolar modo per i processi che si basano sul letto di polvere come quello in esame. Bisogna quindi valutare la capacità con cui le particelle possono scorrere l'una sull'altra, proprietà che risulta essere dipendente da fattori come: forma e distribuzione, attrito tra le particelle (funzione della morfologia e della rugosità superficiale) e dal livello di umidità nella polvere.

Un buon livello di scorrevolezza può rendere il letto di polvere più compatto riducendo così il rischio di porosità interne.

La scorrevolezza può essere determinata tramite le seguenti prove così standardizzate:

- ISO 4490 o ASTM B213 test *Hall*: risultati espressi in [s/50g]
- ASTM B964 test *Carney*: risultati espressi in [s/150g] o [s/200g]
- ISO 13517 con imbuto *Gustavsson*: risultati espressi in [s/50g]

Queste prove sono molto simili tra loro, la differenza sostanziale sta nella geometria dell'imbuto, che presenta diametri dei fori di uscita differenti. È possibile che la polvere non riesca a scorrere attraverso il foro, bloccandosi. Solo in questi casi è possibile battere col dito sull'imbuto una sola volta al fine di agevolare la fuoriuscita della polvere attraverso il foro. Se tale procedura non dovesse essere sufficiente o se il flusso si interrompesse nuovamente la prova sarà da ritenersi nulla. Quando la prova con l'imbuto di *Hall* risulta nulla è possibile passare all'imbuto *Carney*. Quando si vuol fare un confronto tra polveri differenti bisogna però fare attenzione alla dimensione del risultato di ciascuna prova, che come riportato precedentemente differisce a seconda del test utilizzato. È buona norma infatti verificare la normativa di riferimento e la dimensione del risultato.



Figura 27 - Strumentazione per il test di scorrevolezza

2.1.2.6 TAC (Tomografia Assiale Computerizzata)

Parlando di metodi di produzione delle polveri si è analizzato il metodo di atomizzazione a due fluidi, con mezzo di rottura del flusso il *gas*. Abbiamo visto che questa tecnica produttiva può presentare lo svantaggio di produrre alcune particelle con delle porosità interne. Per controllare la presenza di queste porosità e valutarne la dimensione è possibile ricorrere alla TAC. Questo esame ci permette di acquisire diverse sezioni della particella, con estrema facilità a differenza della *cross-section*, consentendoci così di calcolare la dimensione massima del vuoto all'interno di essa. Occorre però sottolineare due aspetti:

- Questo tipo di analisi non è standardizzata da nessuna normativa nel campo dell'additive manufacturing e non risulta di impiego comune.
- Quello delle porosità interne alle particelle è un difetto intrinseco al metodo di produzione della polvere, il quale può portare a porosità anche sul pezzo finito. Nonostante ciò non si può eliminare il problema.

Di conseguenza quella della porosità interna risulta essere una variabile incontrollata.

2.1.3 Materiale riciclato

Nel settore industriale ci sono diverse procedure messe in atto per il riciclo della materia prima. Nello specifico tale procedura è dipendente dal tipo di materia prima trattata. Nel campo dell'additive manufacturing, nella fattispecie di L-PBF, è anche possibile riciclare quella parte della polvere che non è stata coinvolta nel processo di produzione e utilizzarla nuovamente per successive lavorazioni. Questa procedura però è attualmente sprovvista di un metodo che standardizzi tale operazione, il quale verrà probabilmente sviluppato nel prossimo futuro, ma ciò non significa che non sia necessario adottare degli opportuni accorgimenti fin da subito. Infatti, la polvere che non è stata lavorata può essere quella adiacente a della polvere che invece è stata fusa e quindi protagonista di qualche cambiamento morfologico. La diffusione del calore, nelle zone prossime a quelle lavorate, può portare alla fusione, anche solo parziale, delle particelle più piccole (qualche decina di micrometri o meno) le quali possono così fondersi con le particelle adiacenti dando vita a particelle con dei satelliti le cui dimensioni diventano maggiori di quelle desiderate. Per quello che riguarda invece la polvere che si trova lontana dal componente realizzato si può assumere che essa non subisca variazioni significative. Per questo motivo alla fine di un job la polvere viene aspirata sia per consentire all'operatore di prelevare dalla macchina il pezzo prodotto, ma anche per consentire il setacciamento della polvere con lo scopo di eliminare gli agglomerati prodotti in precedenza (gestione delle polveri, Figura 42).

Bisogna anche considerare che la polvere non rimane perennemente sotto gas inerte, ma durante tutte le fasi di movimentazione viene a contatto con l'atmosfera e con diverse strumentazioni. In queste fasi infatti possono mischiarsi elementi contaminanti, l'ossigeno nell'atmosfera potrebbe ossidare il materiale e l'umidità potrebbe alterarne le caratteristiche. È quindi necessario tenere conto di questi aspetti e adottare un piano di controllo per le polveri di riciclo.

Si rende necessario quindi tenere un conto dei cicli di lavoro fatti da un determinato quantitativo di polvere e dell'eventuale miscelazione tra polvere vergine e di riciclo e di conseguenza programmare un piano di intervento, di controllo e di sostituzione una volta raggiunto il valore prestabilito. Non essendo presente nessuna normativa a riguardo, al momento, ci si può riferire alle informazioni fornite dal produttore o all'esperienza personale accumulatasi con specifici piani di controllo e monitoraggio della polvere.

2.1.4 Conservazione

L'intera fase di movimentazione e di conservazione della materia prima deve essere sempre tenuta sotto controllo per ridurre al minimo i rischi di contaminazione. Di conseguenza la polvere deve essere sempre all'interno di specifici contenitori, o quelli originali con il quale il produttore la invia al cliente o in quelli specifici per la raccolta del materiale di riciclo. Questi contenitori, devono essere sempre ben chiusi e riposti all'interno di appositi armadietti antincendio a causa dell'infiammabilità del materiale. Inoltre, sia la conservazione che la movimentazione devono avvenire all'interno di un ambiente controllato con una temperatura di 20°C e un'umidità del 30% circa.

2.2 Preparazione file macchina

Si presenta adesso la necessità di fornire alla macchina un file che contenga tutte le informazioni necessarie per la produzione del componente e che soprattutto sia in grado di elaborare. In questa fase del processo si aprono due differenti scenari percorribili a seconda del campo in cui ci si trova:

- Design for Additive: progettazione del componente per la realizzazione in AM.
- Prototipazione: Adattamento di un modello esistente per la realizzazione in AM.

Queste due strade per quanto simili tra loro contengono delle differenze non tanto da un punto di vista del contenuto ma soprattutto dall'ordine di esecuzione di determinate sottofasi. Si analizzerà più nel dettaglio questo aspetto nel prossimo capitolo, dedicato alla metodologia da eseguire per ciascuna fase del processo. Compito di questo paragrafo è invece la caratterizzazione, per quanto possibile, delle singole sottofasi relative alla preparazione del file macchina.

Bisogna quindi convertire il modello matematico dell'oggetto che si vuole realizzare, sia che esso arrivi al lato della Prototipazione sia nel caso appartenga alla categoria di Design for Additive, in un file che la macchina possa leggere. Il file macchina impiegato nel campo dell'additive manufacturing prende il nome di file STL (*STereo Lithography interface format* o acronimo di "Standard Triangulation Language" [32]). Questo tipo di formato cattura tutte le superfici del modello matematico tramite triangoli di varia forma e vettori normali ad ogni triangolo posizionati sull'intera superficie. La posizione spaziale dei vertici

di ciascun triangolo unita ai vettori normali ci permette di determinare sia la posizione spaziale delle superfici sia il lato interno della parte.

In riferimento a questi triangoli si potrebbe implementare una tolleranza di progetto, come ad esempio la *densità della triangolazione*, ovvero quanti triangoli mediamente devono essere presenti in una data unità di superficie. Valori crescenti determinano una rete di triangoli sempre più fitta, la quale riesce a discretizzare con maggior precisione il modello da realizzare. È possibile vedere in Figura 28 come una triangolazione più fitta ci permetta di rappresentare meglio la parte e coglierne maggiori dettagli.

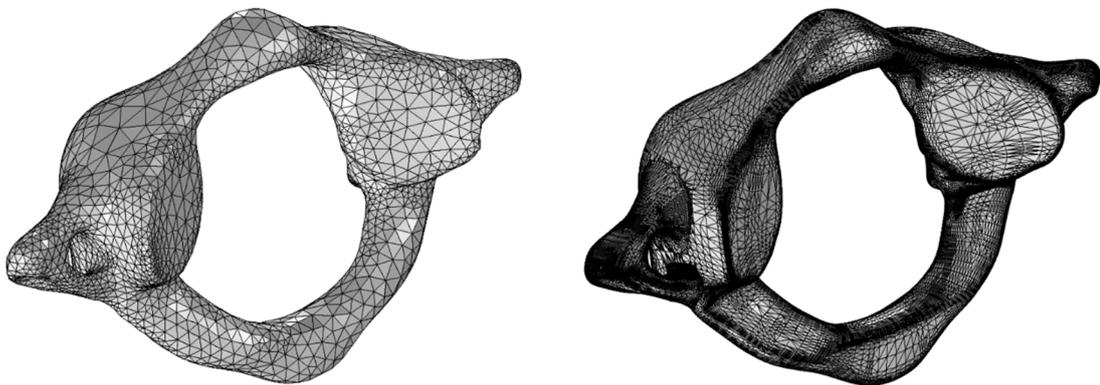


Figura 28 -Vertebra dorsale con differente densità di triangolazione [33]

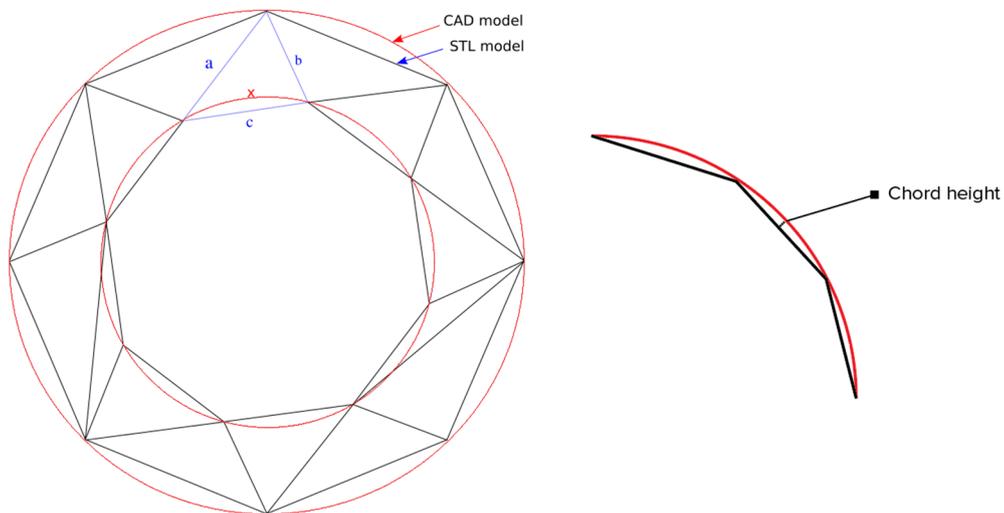


Figura 29 - Differenza modello CAD e STL

Un altro parametro che può essere usato come tolleranza per generare una corretta triangolazione è mostrato in Figura 29, ovvero il valore indicato come *altezza della corda*. Questo valore può essere inteso come una misura della discrepanza che si viene a creare tra il modello CAD, che rappresenta l'oggetto originale, ed il modello STL che rappresenta

l'oggetto discretizzato. Sempre nella stessa figura è possibile notare come una triangolazione grossolana, ovvero con una lunghezza della corda elevata, possa portare ad un modello STL che si discosti troppo dall'originale.

Nonostante l'impiego del formato STL sia largamente diffuso, ed a oggi risulti essere il formato più utilizzato, presenta una limitazione intrinseca: in questo tipo di file vengono salvate solo le informazioni relative alla geometria della parte, mentre informazioni come materiale, colore, unità di misura, vengono perse durante la conversione.

In risposta a questo problema è stato sviluppato un nuovo formato che prende il nome di "Additive Manufacturing Format" (AMF), il quale supera i precedenti limiti ed oggi rappresenta il formato standard ISO/ASTM. In riferimento a questo, gli standard pubblicati riguardano la ISO/ASTM 52915 (2016), normativa specifica per la Fabbricazione Additiva File Format nella versione 1.2. Viene richiamata l'attenzione sulla versione del programma utilizzato e dei suoi successivi aggiornamenti in quanto potrebbero influenzare la corretta scelta di parametri usati da una versione all'altra, portando ad errori nella geometria che pezzo [31].

Nonostante esista un formato standardizzato, al momento il formato STL rimane il più usato, anche se un numero sempre più crescente di utenti sta passando al formato AMF [7].

Convertito il modello si deve quindi provvedere a verificare la correttezza del file STL o AMF, ovvero la geometria che è stata generata, andando a correggere dei possibili errori che possono verificarsi durante tale operazione di conversione. Può verificarsi infatti che si incorra in *difetti* come spazi vuoti tra triangoli adiacenti, inversione dei vettori normali che indicano il lato interno della parte, triangoli doppi, bordi e contorni aperti.

Effettuare la conversione del file non è però sufficiente a completare questa fase. Il sistema di AM richiede ulteriori informazioni, nello specifico possono variare in funzione della tecnologia impiegata.

Superata questa verifica, nel caso della prototipazione, occorre prendere visione di quelle che devono essere le caratteristiche del pezzo da produrre. Esse infatti condizioneranno i passaggi successivi della preparazione del file macchina. Queste informazioni sono solitamente riportate nella messa in tavola del componente, nella quale sono indicati valori di rugosità superficiale delle superfici e le caratteristiche meccaniche richieste dal pezzo, come ad esempio resistenza a rottura o durezza superficiale. Preso atto di queste informazioni si può dunque andare avanti.

Nel caso in cui il componente sia stato progettato proprio per essere prodotto mediante questa tecnologia (Design for Additive), la scelta dell'orientamento e quella dei supporti è già stata fatta proprio in sede di progettazione dell'oggetto. Invece nel caso di prototipazione, si passa alla scelta della posizione e dell'orientamento che avrà la parte all'interno della piattaforma di costruzione. Esiste la possibilità, in questa fase del processo, di sfruttare l'aiuto di determinati software per l'orientamento della parte. Un esempio, per una tecnologia come quella del Powder Bed Fusion, è il software "Magics" realizzato dalla casa Materialise, il quale supporta tutta la fase manipolazione del file, dalla conversione del modello matematico fino al lancio sulla macchina. Spesso i software calcolano l'orientamento del componente in modo da minimizzare le strutture di supporto, ma questa non è sempre la scelta vincente. Può essere utile effettuare una scelta più ponderata che tenga in considerazione non solo un singolo componente, ma tutti quelli presenti all'interno del Job, e cercare una soluzione di ottimo per l'intera lavorazione. Inoltre, bisogna tenere a mente che la funzione delle **strutture di supporto** non è soltanto quella di sorreggere la struttura in particolari sottosquadri o sporgenze del componente. Funge anche da mezzo per aiutare la dissipazione del calore, per ancorare meglio la struttura alla piastra di costruzione e quindi, di conseguenza, per garantire una maggior precisione dimensionale, che potrebbe essere compromessa da tensioni residue che si generano durante la fase di solidificazione. Deciso quindi l'orientamento della parte e progettati i supporti, strutture per le quali si è in grado di decidere anche la densità che esse devono possedere, si può passare allo step successivo.

Si passa quindi alla fase di Slicing. Il modello in formato STL o AMF viene quindi tagliato per piani normali all'asse di costruzione z , distanti l'uno dall'altro di una misura pari a t , ovvero lo spessore di uno strato. Il valore di questo parametro incide significativamente sulla qualità del prodotto finito, in quanto determina la discretizzazione della superficie del pezzo. Quanto più lo spessore t sarà piccolo, più la superficie avrà una rugosità superficiale bassa. Viceversa, aumentando lo spessore dello strato si andrà incontro ad una rugosità crescente ed alla nascita del "staircase effect", ovvero l'effetto a scalino. Esiste un metodo alternativo chiamato "Adaptive slicing" il quale "affetta" il pezzo secondo valori di t non più costanti ma variabili a seconda della superficie della parte. Se vi sono bordi rettilinei o poco curvi si userà un valore di t più alto, se invece la superficie è molto curva, per riuscire a ridurre l'effetto a scalino e ricreare meglio la curva del modello CAD, il valore di t andrà diminuendo Figura 31.

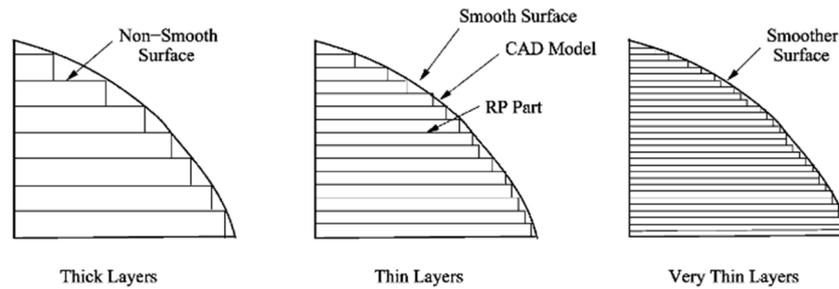


Figura 30 - Incidenza del parametro t su superfici curve [34]

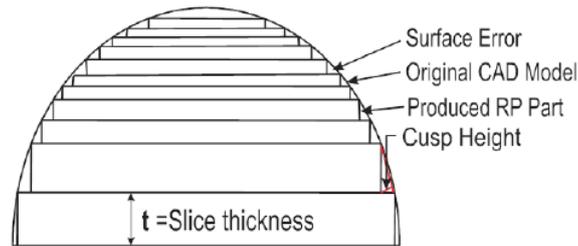


Figura 31 - Adaptive slicing [35]

L'operazione di slicing riguarda sia il pezzo che i supporti. Scegliendo quindi il valore di t vengono generate, mediante questo procedimento, tutte le superfici 2D che la macchina dovrà realizzare, una dopo l'altra, per la realizzazione del componente. In un processo come quello di Powder Bed Fusion, che stiamo qui analizzando, è importante ricordare che quando si realizza un nuovo strato bisogna assicurare l'adesione allo stato precedente. Più nello specifico quando la sorgente laser fonde localmente la polvere, il melt-pool di fusione che si viene a creare deve coinvolgere anche una parte dello strato precedente, così che una volta solidificato i due strati consecutivi risultino un tutt'uno. Ne consegue che il valore di t non deve essere troppo grande. I valori che può assumere questo parametro dipendono sicuramente dal materiale di polvere che si sta utilizzando, dalla grandezza media delle particelle e dalla combinazione con altri parametri di processo come *potenza laser* e *velocità di scansione*.

Superata anche la fase di slicing non rimane che impostare i valori dei **parametri di processo**, di cui si è discusso precedentemente. La scelta dei valori di questi parametri è piuttosto complicata in quanto non risultano indipendenti l'uno dall'altro e variano a seconda della materia prima utilizzata e del risultato che si vuole ottenere sul pezzo finito. Inoltre, modificando un determinato parametro, con lo scopo di migliorare una caratteristica sul componente, si dovrà con ogni probabilità modificare, uno o anche più, diversi altri parametri e verificare che tali variazioni non portino ad altri effetti indesiderati.

Non sono presenti normative che standardizzino queste ultime operazioni descritte se non quella prima citata riguardante il file AMF da utilizzare. La restante parte non può essere caratterizzata in modo assoluto in quanto coinvolge parametri che possono variare da pezzo a pezzo, da macchinario a macchinario e da materiale a materiale.

Completata anche questa importante fase, il file è pronto per essere inviato alla macchina.

2.2.1 Parametri di processo – densità di energia

Si vuole dedicare una sezione a parte ad i *parametri di processo* dato il ruolo chiave che svolgono all'interno del processo. Come si è precedentemente detto nel precedente capitolo, vi è un gran numero di parametri di processo che devono essere opportunamente scelti e alcuni possono essere determinati dall'operatore tramite software ed altri vengono controllati e monitorati dalla macchina stessa. Solitamente le macchine nel settore dell'AM sono programmate in modo tale che l'utilizzatore non possa conoscere o controllare tutti i parametri di processo coinvolti, principalmente per due diverse ragioni: poter vendere delle specifiche licenze per il controllo di alcuni parametri, ed in secondo luogo per poter difendere la proprietà intellettuale del funzionamento specifico del proprio macchinario da parte del costruttore. Ciò però comporta una non completa comprensione, da parte dell'utilizzatore, degli effetti che hanno alcuni parametri sull'esito della lavorazione.

La complessità dell'operazione di determinazione di tali parametri richiede uno specifico studio (che esula dallo scopo di questo elaborato) che miri all'ottimizzazione del processo, dipendente però da fattori come: macchinario utilizzato, materia prima e caratteristiche del componente. Dalla moltitudine di variabili coinvolte e dalle osservazioni fatte si deduce come tale operazione sia particolarmente difficile da caratterizzare e standardizzare.

Nonostante ciò si è però voluto affrontare questo problema cercando di fornire una linea guida base che aiuti il personale incaricato ad avere un'idea più chiara nella scelta di tali parametri. Si vuole cioè provare a suggerire un campo di accettabilità di tali valori, i quali possono essere successivamente studiati ed ottimizzati.

L'**accettabilità** dei *parametri di processo* però deve essere dimostrata tramite produzione e verifica di appositi provini per far sì che la qualificazione del processo sia valida. Inoltre, le modifiche a tali valori al di fuori di determinato intervallo, anch'esso qualificato, richiederanno la riqualificazione completa o parziale della procedura adottata. Il criterio appena esposto è analogo a quello che si incontra nella qualifica di un processo di saldatura [31].

Come abbiamo visto precedentemente non esiste un valore assoluto corretto di un parametro di processo, ma ciascuno è dipendente da uno o più altri parametri. Ad esempio, non esiste un valore corretto ed uno sbagliato di *potenza laser* ma esso dipende anche da altri parametri come ad esempio la *velocità di scansione*. Una combinazione di questi due valori sarebbe più facile da giudicare più o meno corretta in relazione ad i difetti che possono insorgere durante la lavorazione. Allora ci si è posto l'obiettivo di determinare quelli che possono essere considerati i parametri principali di tale processo e concentrarsi su di essi. Si è quindi scelto di prendere in esame:

- Potenza laser, P
- Velocità di scansione, v
- Spessore dello strato, t
- Hatching distance, h_d

Questi parametri però abbiamo visto in precedenza che sono tra loro collegati da una precisa relazione che definisce la *densità di energia*:

$$E = \frac{P}{v t h_d} \quad \left[\frac{J}{mm^3} \right]$$

Si rende necessario quindi restringere ancora il campo d'azione, allora in seguito ci si riferirà solamente al caso che vede come materiale d'impiego la lega di Alluminio AlSi10Mg. È stata quindi condotta una ricerca su eventuali relazioni esistenti tra la *densità di energia* e le *caratteristiche* del prodotto finito per il caso specifico in esame.

Tali ricerche hanno portato ad uno specifico manuale tecnico [21] il quale riporta degli importanti esempi proprio sulla lega di nostro interesse e riguardante la tecnologia di L-PBF qui affrontata. In primo luogo, si può vedere il grafico riportato in Figura 32, il quale riporta i risultati ottenuti dalla fusione di una singola traccia per diverse combinazioni di *potenza laser* e *velocità di scansione*. Dai risultati riportati è possibile vedere come dalla combinazione di alta *potenza laser* e bassa *velocità* si incorre nel difetto del **Keyhole**, in quanto a causa di questa combinazione di valori viene trasmessa al letto di polvere una quantità di energia elevata che porta alla vaporizzazione del fuso e quindi alla generazione del difetto. Un'altra tipologia di difetto si riscontra invece con un'alta *velocità di scansione* e una bassa *potenza laser*. In questo caso l'energia trasmessa non è sufficiente a generare un corretto melt-pool e si va incontro al fenomeno del **Balling**, ovvero una traccia discontinua formata da piccole sfere.

Vi è invece una regione del grafico, data da un'opportuna combinazione di *velocità* e *potenza*, che porta ad una corretta fusione del materiale. Da qui appare quindi chiaro come esista una correlazione tra questi due parametri di processo e come la loro combinazione determini una finestra di risultati accettabili.

Questi sono però solo due dei tanti parametri coinvolti nel processo. Sarebbe interessante riprodurre un caso analogo che però coinvolga più parametri possibili.

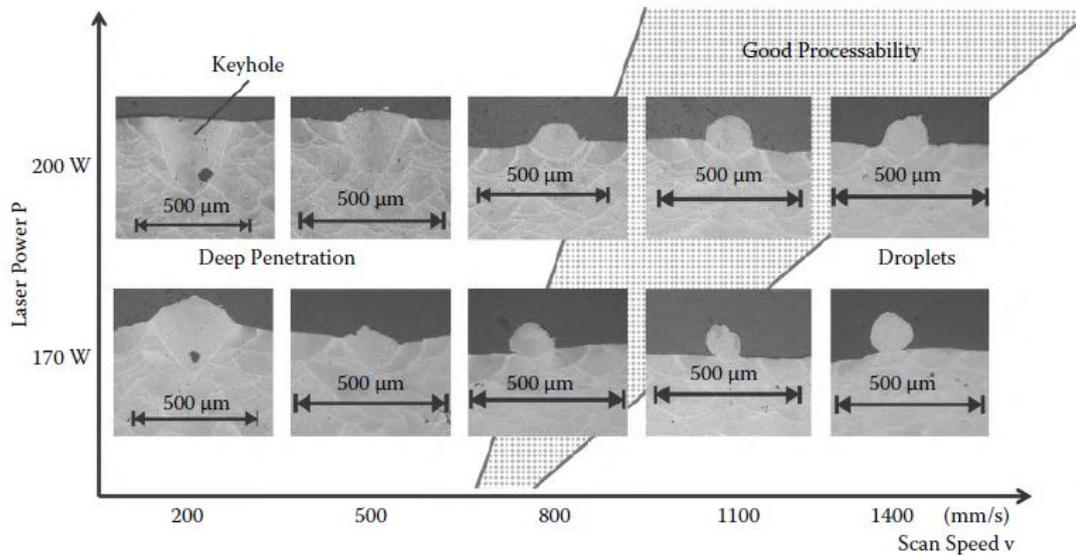


Figura 32 - Relazione potenza laser- velocità di scansione per traccia singola con lega AlSi10Mg [21]

Approfondendo lo studio in questa direzione si arriva al caso in Figura 33, il quale rappresenta il caso che ci eravamo preposti inizialmente. L'immagine "A" in figura riporta diverse curve, ciascuna corrispondente ad un determinato valore *potenza laser* in funzione della *velocità di scansione*, che rappresentano la *densità relativa* del componente prodotto con questi determinati valori. Si noti come, a conferma di quanto detto precedentemente, i punti di massimo delle curve si trovano per coppie *potenza-velocità* crescenti, ovvero all'aumentare della *potenza* aumenta anche la *velocità* di scansione. Questi valori sono stati ottenuti utilizzando un valore di *hatching distance* pari a 105 µm e uno *spessore dello strato* di 30 µm.

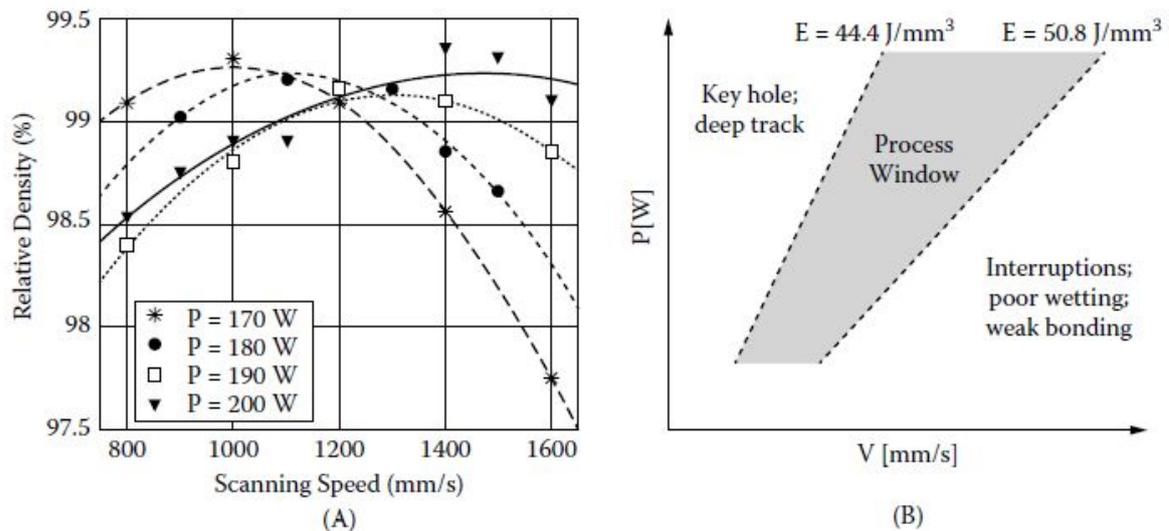


Figura 33 - (A) Densità relativa dei provini in AlSi10Mg per diverse combinazioni di potenza laser e scansione velocità; (B) corrispondente finestra di processo [21]

L'immagine "B" invece riesce ad avere un carattere più generale in quanto ingloba tutti i parametri principali, che avevamo scelto precedentemente come maggiormente influenti, sotto il valore di **densità di energia**. A tal proposito individua una finestra di accettabilità di valori di **densità di energia** compresa tra 44.4 J/mm^3 e 50.8 J/mm^3 . Tale risultato risponde alla ricerca intrapresa nella fase di ottimizzazione della densità relativa posseduta dal componente finito. Si ricorda che questo intervallo è stato ottenuto appositamente per il tipo di lega in esame, e che potrebbe variare anche in base al macchinario utilizzato.

Il concetto energetico, ovvero della quantità di energia trasferita dalla sorgente laser al letto di polvere affinché il processo di fusione avvenga secondo i criteri desiderati, potrebbe quindi rappresentare una strada verso la determinazione di combinazioni tra alcuni parametri di processo.

Si è quindi voluto approfondire questo aspetto provando a ricreare una "finestra" sul grafico *velocità di scansione - potenza laser* come quella che si ha in Figura 33 (B). Per fare ciò si è deciso di bloccare due dei quattro parametri scelti, ovvero *spessore dello strato* t e *hatching distance* h_d usando i valori riportati in Tabella 5.

Parametri di processo

<i>spessore dello strato, t</i>	0.03 mm
<i>hatching distance, h_d</i>	0.105 mm

Tabella 5 - Parametri di processo

Per questi due parametri è stata trovata una linea guida per la determinazione dei loro valori [19]: per *hatching distance*, h_d , viene suggerito un valore in funzione alla larghezza della

traccia laser tale da garantire un *overlap* di circa il 30%; per lo *spessore del strato*, t , invece viene richiamato un concetto legato al numero di strati di polvere da voler depositare in funzione della dimensione media della particella “ d ” (Figura 34). Quindi se si desidera avere orientativamente due strati di polvere il valore di t sarà dato dal prodotto di “ d ” per 1.87, un coefficiente legato al livello di impacchettamento delle sfere.

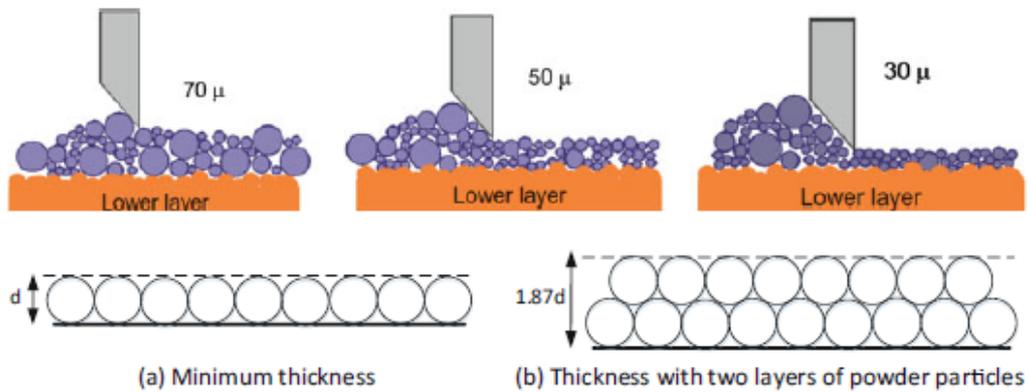


Figura 34 - Relazione tra dimensione particella e spessore dello strato t [19]

Si passa quindi al calcolo della *densità di energia* per numerose combinazioni di *velocità* e *potenza*, tenendo come riferimento per la finestra di accettabilità i valori trovati relativi alla lega AlSi10Mg e riportati in Tabella 6. Per far ciò, si ricorre ad un foglio di calcolo implementato su Microsoft Excel. Volendo, in Figura 35, riprodurre il modello di Figura 33 (B) si ha la stessa ascissa, *velocità di scansione*, e la stessa ordinata, *potenza laser*. I valori all'interno sono proprio quelli della *densità di energia*, di cui quelli che ricadono nel nostro intervallo sono evidenziati in verde.

Intervallo di accettabilità Densità di energia [J/mm ³]	
Min.	Max.
44.4	50.8

Tabella 6 - Intervallo accettabilità AlSi10Mg [21]

P [W]	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750
400	141,1	133,7	127,0	120,9	115,4	110,4	105,8	101,6	97,7	94,1	90,7	87,6	84,7	81,9	79,4	77,0	74,7	72,6
390	137,6	130,3	123,8	117,9	112,6	107,7	103,2	99,0	95,2	91,7	88,4	85,4	82,5	79,9	77,4	75,0	72,8	70,7
380	134,0	127,0	120,6	114,9	109,7	104,9	100,5	96,5	92,8	89,4	86,2	83,2	80,4	77,8	75,4	73,1	71,0	68,9
370	130,5	123,6	117,5	111,9	106,8	102,1	97,9	94,0	90,4	87,0	83,9	81,0	78,3	75,8	73,4	71,2	69,1	67,1
360	127,0	120,3	114,3	108,8	103,9	99,4	95,2	91,4	87,9	84,7	81,6	78,8	76,2	73,7	71,4	69,3	67,2	65,3
350	123,5	117,0	111,1	105,8	101,0	96,6	92,6	88,9	85,5	82,3	79,4	76,6	74,1	71,7	69,4	67,3	65,4	63,5
340	119,9	113,6	107,9	102,8	98,1	93,9	89,9	86,3	83,0	80,0	77,1	74,4	72,0	69,6	67,5	65,4	63,5	61,7
330	116,4	110,3	104,8	99,8	95,2	91,1	87,3	83,8	80,6	77,6	74,8	72,2	69,8	67,6	65,5	63,5	61,6	59,9
320	112,9	106,9	101,6	96,7	92,4	88,3	84,7	81,3	78,1	75,2	72,6	70,1	67,7	65,5	63,5	61,6	59,8	58,0
310	109,3	103,6	98,4	93,7	89,5	85,6	82,0	78,7	75,7	72,9	70,3	67,9	65,6	63,5	61,5	59,6	57,9	56,2
300	105,8	100,3	95,2	90,7	86,6	82,8	79,4	76,2	73,3	70,5	68,0	65,7	63,5	61,4	59,5	57,7	56,0	54,4
290	102,3	96,9	92,1	87,7	83,7	80,1	76,7	73,7	70,8	68,2	65,8	63,5	61,4	59,4	57,5	55,8	54,2	52,6
280	98,8	93,6	88,9	84,7	80,8	77,3	74,1	71,1	68,4	65,8	63,5	61,3	59,3	57,3	55,6	53,9	52,3	50,8
270	95,2	90,2	85,7	81,6	77,9	74,5	71,4	68,6	65,9	63,5	61,2	59,1	57,1	55,3	53,6	51,9	50,4	49,0
260	91,7	86,9	82,5	78,6	75,0	71,8	68,8	66,0	63,5	61,1	59,0	56,9	55,0	53,3	51,6	50,0	48,6	47,2
250	88,2	83,5	79,4	75,6	72,2	69,0	66,1	63,5	61,1	58,8	56,7	54,7	52,9	51,2	49,6	48,1	46,7	45,4
240	84,7	80,2	76,2	72,6	69,3	66,3	63,5	61,0	58,6	56,4	54,4	52,5	50,8	49,2	47,6	46,2	44,8	43,5
230	81,1	76,9	73,0	69,5	66,4	63,5	60,8	58,4	56,2	54,1	52,2	50,4	48,7	47,1	45,6	44,3	43,0	41,7
220	77,6	73,5	69,8	66,5	63,5	60,7	58,2	55,9	53,7	51,7	49,9	48,2	46,6	45,1	43,7	42,3	41,1	39,9
210	74,1	70,2	66,7	63,5	60,6	58,0	55,6	53,3	51,3	49,4	47,6	46,0	44,4	43,0	41,7	40,4	39,2	38,1
200	70,5	66,8	63,5	60,5	57,7	55,2	52,9	50,8	48,8	47,0	45,4	43,8	42,3	41,0	39,7	38,5	37,3	36,3
190	67,0	63,5	60,3	57,4	54,8	52,4	50,3	48,3	46,4	44,7	43,1	41,6	40,2	38,9	37,7	36,6	35,5	34,5
180	63,5	60,2	57,1	54,4	51,9	49,7	47,6	45,7	44,0	42,3	40,8	39,4	38,1	36,9	35,7	34,6	33,6	32,7
170	60,0	56,8	54,0	51,4	49,1	46,9	45,0	43,2	41,5	40,0	38,5	37,2	36,0	34,8	33,7	32,7	31,7	30,8
160	56,4	53,5	50,8	48,4	46,2	44,2	42,3	40,6	39,1	37,6	36,3	35,0	33,9	32,8	31,7	30,8	29,9	29,0
150	52,9	50,1	47,6	45,4	43,3	41,4	39,7	38,1	36,6	35,3	34,0	32,8	31,7	30,7	29,8	28,9	28,0	27,2
140	49,4	46,8	44,4	42,3	40,4	38,6	37,0	35,6	34,2	32,9	31,7	30,7	29,6	28,7	27,8	26,9	26,1	25,4
130	45,9	43,4	41,3	39,3	37,5	35,9	34,4	33,0	31,7	30,6	29,5	28,5	27,5	26,6	25,8	25,0	24,3	23,6
120	42,3	40,1	38,1	36,3	34,6	33,1	31,7	30,5	29,3	28,2	27,2	26,3	25,4	24,6	23,8	23,1	22,4	21,8
	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750
																		v [mm/s]

Figura 35 - Calcolo della densità di energia per combinazioni di P e v

Come è possibile vedere dall'immagine si è riusciti a riprodurre il modello desiderato, con una regione di valori evidenziati appartenenti all'intervallo, frutto della combinazione dei 4 parametri di processo coinvolti. Risulta interessante notare, a conferma di quanto discusso precedentemente, le due zone estreme di questa mappa di valori (per problemi di dimensioni non è stato possibile riportare l'intera mappa, ottenuta facendo partire ascisse ed ordinate dal valore di zero, ma la sezione riportata risulta ugualmente rappresentativa del fenomeno):

- *Bassa potenza, alta velocità*: si noti come nella regione in basso a destra i valori di densità di energia siano relativamente bassi. L'energia trasmessa al letto di polvere infatti è insufficiente ad avere un buon meccanismo di fusione, portano ad avere tracce discontinue ed alla presenza del fenomeno del **balling**.
- *Alta potenza, bassa velocità*: appare evidente che spostandoci verso la regione in alto a sinistra i valori di energia trasmessa vanno sempre più crescendo. In questa regione infatti si manifesta difatti il **Keyhole**, in quanto l'eccessiva energia comporta l'evaporazione del fuso con le conseguenze discusse precedentemente.

Alla luce di questa osservazione appare ancora più chiaro come la regione intermedia, tra le due precedenti, sia quella che porti al meccanismo di fusione desiderato.

Bisogna però osservare che quello che si è ottenuto è anche il frutto di una pura combinazione numerica di determinati valori. Per essere più chiari si osservi come il medesimo valore di *densità di energia* può essere ottenuto con la combinazione di diversi valori *velocità-potenza* (Tabella 7):

<i>Velocità di scansione</i> [mm/s]	<i>Potenza laser</i> [W]	<i>Densità di energia</i> [J/mm ³]
500	70	44.4
1000	140	44.4
1500	210	44.4

Tabella 7 - Combinazione di valori estratti dalla Figura 35

Da un punto di vista microstrutturale però i risultati del processo di fusione-solidificazione ottenuti con combinazioni di parametri diversi, seppure a parità di *energia* trasmessa, possono differire tra loro. È influente infatti anche la velocità con la quale avviene tale fenomeno in quanto gioca un ruolo chiave nella microstruttura finale del pezzo.

A tal proposito uno studio [23] affronta l'influenza della *densità di energia* e mostra i risultati visibili in Figura 36, ottenuti mediante L-PBF con la lega AlSi10Mg. Le singole tracce sono state ottenute per valori di $h_d = 0.40$ mm e $t = 0.03$ mm. È possibile vedere come a parità di

$E_p=50 \text{ J/mm}^3$, ma per diversi valori di P e v si ottengono tracce molto diverse tra loro: a non omogenea e discontinua nel caso “a”, più uniforme e continua nel caso “b”.

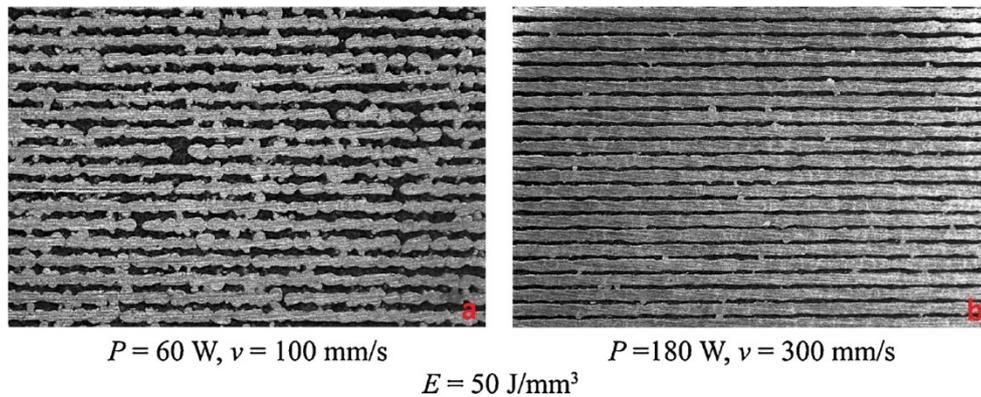


Figura 36 – Confronto tra due lavorazioni L-PBF ottenute a parità di densità di energia ma con combinazioni di P e v diverse; [23]

Infine, si è svolta un’analisi dei risultati ottenuti dall’esecuzione della prova di durezza Brinell eseguita su 27 provini realizzati presso lo stabilimento FCA tramite il sistema EOS M290 (si veda Appendice A.1), per diverse combinazioni di *parametri di processo* riportati in Tabella 8. Per ogni provino vengono indicati i parametri di processo con cui è stato realizzato, ad eccezione dello spessore dello strato, che risulta essere pari $t = 0.03 \text{ mm}$ per tutti i provini; nell’ultima colonna invece è riportato il valore di durezza finale, frutto della media di 3 diverse misurazioni.

Provino	Potenza laser [W]	Velocità di scansione [mm/s]	Hatching distance [mm]	Durezza HB
1	340	900	0.11	85,7
2	340	900	0.15	90,3
3	340	900	0.19	103,7
4	340	1300	0.11	96,7
5	340	1300	0.15	115
6	340	1300	0.19	121
7	340	1700	0.11	120,3
8	340	1700	0.15	118,7
9	340	1700	0.19	119,7
10	355	900	0.11	76
11	355	900	0.15	87,7
12	355	900	0.19	99,7
13	355	1300	0.11	108
14	355	1300	0.15	116,3
15	355	1300	0.19	119,7
16	355	1700	0.11	114,7
17	355	1700	0.15	118,7
18	355	1700	0.19	115,3

19	370	900	0.11	78,67
20	370	900	0.15	87,3
21	370	900	0.19	84,7
22	370	1300	0.11	100,3
23	370	1300	0.15	110,3
24	370	1300	0.19	118,3
25	370	1700	0.11	120,3
26	370	1700	0.15	116,3
27	370	1700	0.19	116,3

Tabella 8 - Valori dei parametri di processo per i singoli provini e durezza HB

h_d [mm]	P [W]	v [mm/s]	Durezza HB	E [J/mm ³]
0,11	340	900	85,7	114,5
		1300	96,7	79,3
		1700	120,3	60,6
	355	900	76,0	119,5
		1300	108,0	82,8
		1700	114,7	63,3
	370	900	78,7	124,6
		1300	100,3	86,2
		1700	120,3	66
0,15	340	900	90,3	84
		1300	115,0	58,1
		1700	118,7	44,4
	355	900	87,7	87,7
		1300	116,3	60,7
		1700	118,7	46,4
	370	900	87,3	91,4
		1300	110,3	63,2
		1700	116,3	48,4
0,19	340	900	103,7	66,3
		1300	121,0	45,9
		1700	119,7	35,1
	355	900	99,7	69,2
		1300	119,7	47,9
		1700	115,3	36,6
	370	900	84,7	72,1
		1300	118,3	49,9
		1700	116,3	38,2

Tabella 9 – Riclassificazione in base ai parametri di processo

I dati vengono riordinati in Tabella 9 in base ad i parametri di processo che caratterizzano i provini ed accostati dal valore di E corrispondente, ed evidenziato in verde nel caso in cui tale valore rientri nell'intervallo di accettabilità. In particolare, sono stati raggruppati in base al valore di h_d il quale ci permette di creare 3 diversi scenari proprio in base a tale valore. Infatti, fissati t e h_d è possibile ricreare il modello sviluppato precedentemente su Excel per questo specifico caso, come mostrato in Figura 37. Si è scelto di riportare solamente questo caso, con un valore di $h_d = 0.19$ mm, in quanto risulta essere il più esaustivo, ma analoghe considerazioni sono da ritenersi valide anche per gli scenari con $h_d = 0.11$ mm e $h_d = 0.15$ mm. Anche in Figura 37, sono evidenziati in verde i valori che ricadono all'interno dell'intervallo di accettabilità, mentre troviamo in giallo i 3 valori di *velocità di scansione* usati e di differenti colori i valori di *potenza laser*. All'interno del grafico sono invece evidenziati 9 punti, rappresentativi dei 9 provini realizzati con quel determinato valore di h_d . Si noti come, per ogni valore di P , i provini che presentano una durezza maggiore sono proprio quelli che ricadono all'interno dell'intervallo in esame. Più in generale, a parità di P , più il valore di E si avvicina all'intervallo più è grande il valore di durezza. Ciò è valido sia per i valori superiori che inferiori all'intervallo a conferma del fatto che, quantomeno dal punto di vista della durezza, la regione di ottimo si trova nell'intorno dell'intervallo considerato. Infatti, più ci si allontana da questi valori più la durezza decresce, sia superiormente che inferiormente.

P [W]												
400	100,3	87,7	78,0	70,2	63,8	58,5	54,0	50,1	46,8	43,9	41,3	
395	99,0	86,6	77,0	69,3	63,0	57,7	53,3	49,5	46,2	43,3	40,8	
390	97,7	85,5	76,0	68,4	62,2	57,0	52,6	48,9	45,6	42,8	40,2	
385	96,5	84,4	75,0	67,5	61,4	56,3	52,0	48,2	45,0	42,2	39,7	
380	95,2	83,3	74,1	66,7	60,6	55,6	51,3	47,6	44,4	41,7	39,2	
375	94,0	82,2	73,1	65,8	59,8	54,8	50,6	47,0	43,9	41,1	38,7	
370	92,7	81,1	72,1	64,9	59,0	54,1	49,9	46,4	43,3	40,6	38,2	
365	91,5	80,0	71,2	64,0	58,2	53,4	49,3	45,7	42,7	40,0	37,7	
360	90,2	78,9	70,2	63,2	57,4	52,6	48,6	45,1	42,1	39,5	37,2	
355	89,0	77,9	69,2	62,3	56,6	51,9	47,9	44,5	41,5	38,9	36,6	
350	87,7	76,8	68,2	61,4	55,8	51,2	47,2	43,9	40,9	38,4	36,1	
345	86,5	75,7	67,3	60,5	55,0	50,4	46,6	43,2	40,4	37,8	35,6	
340	85,2	74,6	66,3	59,6	54,2	49,7	45,9	42,6	39,8	37,3	35,1	
335	84,0	73,5	65,3	58,8	53,4	49,0	45,2	42,0	39,2	36,7	34,6	
330	82,7	72,4	64,3	57,9	52,6	48,2	44,5	41,4	38,6	36,2	34,1	
325	81,5	71,3	63,4	57,0	51,8	47,5	43,9	40,7	38,0	35,6	33,5	
320	80,2	70,2	62,4	56,1	51,0	46,8	43,2	40,1	37,4	35,1	33,0	
	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	
												v [mm/s]

Figura 37 – Rappresentazione nel grafico P-v dei risultati dei provini in Tabella 9 per $h_d = 0.19$ mm

Adesso a conferma di quanto detto, è possibile constatare gli stessi risultati, tramite Tabella 9, per gli altri due scenari con differenti valori di *hatching distance*.

In conclusione, il sistema di valutazione energetico, ovvero della *densità di energia*, risulta essere un riferimento valido per quello che riguarda la durezza del componente finito. È stata infatti dimostrata una relazione tra l'intervallo di accettabilità precedentemente individuato con la durezza Brinell misurata sui provini. Lo stesso esito positivo però non si è avuto nel caso della valutazione della singola traccia ottenuta con uno stesso valore di E , ma con diverse combinazioni di P e v , in quanto i risultati si discostavano molto e uno dei due (del caso d'esempio, Figura 36) non risultava essere concorde agli obiettivi desiderati. Risulterebbe però interessante approfondire questo studio per cercare correlazioni con altre caratteristiche del componente e poter sfruttare questo ragionamento per poter in modo abbastanza semplice ed immediato avere una garanzia dei risultati ottenuti a partire dalla scelta dei parametri di processo.

2.3 Preparazione macchina

Ogni macchinario ha parametri ed aspetti di configurazione specifici, a seconda della tecnologia sfruttata e in base anche alla materia prima impiegata. A seconda del macchinario saranno quindi diversi gli aspetti da controllare e le operazioni da eseguire. Una preparazione inadeguata della macchina porterà con ogni probabilità alla realizzazione di un componente che non sia in grado di soddisfare le caratteristiche di qualità richieste. Al momento non sono presenti standard che regolino questa fase del processo, la quale resta affidata all'attenzione ed al *know-how* dell'utilizzatore. Bisogna però garantire aspetti come la calibrazione e la manutenzione preventiva della macchina, in quanto possono influire notevolmente sull'esito del processo. È quindi richiesta una programmazione di un piano di manutenzione, che assicuri controlli periodici di tutta la macchina e che ne certifichi il corretto funzionamento. Per questo tipo di macchinari viene consigliato un piano di intervento ogni 6 o 12 mesi a seconda dell'utilizzo. La programmazione di interventi straordinari è prevista in casi più particolari come fermi macchina per periodi superiori ai 12 mesi o quando la macchina deve essere ricollocata in una nuova posizione. Solitamente si ricorre ad un piano di ricalibrazione della macchina anche in seguito ad un aggiornamento del software della stessa. Il ciclo di

manutenzione si conclude con il lancio di un job di prova il quale viene sottoposto a determinati controlli, con l'obiettivo di garantire il corretto funzionamento della macchina.

La fase di preparazione della macchina rappresenta l'ultimo step da superare prima che la lavorazione vera e propria possa iniziare. Gli aspetti legati alla macchina possono essere suddivisi in due punti principali:

- *Preparazione della macchina*, vera e propria.
- *Controllo di processo*, durante la lavorazione.

Partendo quindi dalla ***preparazione della macchina***, un aspetto chiave è la pulizia della camera di processo. È infatti di fondamentale importanza che prima di iniziare una nuova lavorazione la camera di costruzione sia perfettamente pulita. Oltre ad una pulizia dell'intera camera risulta opportuno assicurare un livello di pulizia accurato di due elementi fondamentali:

- i sensori di ossigeno, presenti all'interno della camera, i quali tengono costantemente sotto controllo questo parametro, tenuto ad un livello inferiore all'0.1% garantendo, prima, la sicurezza dell'intera lavorazione (si ricordi che la polvere di alluminio è infiammabile e la presenza di ossigeno unita alla sorgente laser potrebbe causare un'esplosione), poi, l'interazione tra la lega e l'ossigeno così da evitare la formazione di ossidi durante la lavorazione.
- la lente, attraverso la quale passa il laser che esce dal gruppo ottico, nella parte superiore della macchina, per raggiungere il letto di polvere. La presenza di polvere su questa lente, o altre forme di sporcizia, potrebbero infatti interferire con il fascio laser e non garantire che la *potenza laser* desiderata raggiunga il letto di polvere.

Un'altra operazione è la fase di carico della polvere all'interno della macchina, la quale viene eseguita tramite la strumentazione atta alla gestione della polvere discussa in precedenza (Figura 42). Una volta caricata nell'apposita camera di raccolta è richiesto che essa raggiunga un buon livello di compattamento.

Occorrerà quindi che la lama del recoter sia ben affilata e correttamente installata. Si passa all'installazione della piastra di costruzione la quale verrà ancorata alla piattaforma mobile tramite il serraggio di 4 viti. Fatto ciò sarà necessario orientarla correttamente, in posizione perfettamente orizzontale.

Infine, occorre portare la camera di processo ad un livello di ossigeno inferiore allo 0,1% tramite l'introduzione di un gas inerte, Argon nel nostro caso.

Passando al **controllo di processo**, vengono considerati tutti i sistemi di controllo applicabili in questo tipo di lavorazione. Non essendoci nessuno standard a riguardo, che indichi il controllo di determinati parametri piuttosto che altri, non vi sono particolari restrizioni. Sarebbe tuttavia importante che i produttori dei sistemi di L-PBF forniscano componenti aggiuntivi per il controllo del processo in corso d'opera così da avere un'ampia gamma di informazioni riguardanti la lavorazione. Di conseguenza qualora fosse rilevata un'anomalia o un difetto si può immediatamente intervenire bloccando il processo, o semplicemente registrandolo nel caso in cui sia impossibile intervenire per porvi rimedio. I parametri sono generalmente controllati tramite software e vengono registrati e confrontati con dei valori di riferimento e qualora superassero uno dei limiti di soglia, la lavorazione può essere messa in pausa per provvedere a correggere il difetto, quando possibile. Questi sistemi di monitoraggio vengono chiamati *feedback in-process* e possono riguardare aspetti come: monitoraggio del pool di fusione, in cui viene controllata la dimensione e la temperatura del pool; acquisizione ed analisi di un'immagine di ogni strato, volta ad individuare una corretta distribuzione del letto di polvere o la presenza di qualche imperfezione[19].

Alla fine di questa fase la macchina è pronta per avviare la lavorazione vera e propria che ci porterà ad avere il componente desiderato.

2.4 Post-Processo

Completata la lavorazione il componente deve essere estratto dalla macchina e sottoposto ad un insieme di operazioni che prendono il nome di "*post-processo*" prima che esso sia pronto per l'ispezione, i test e la certificazione. Questa fase può differire a seconda della tecnologia AM impiegata per creare il componente, il quale può avere scopi e requisiti molto diversi l'uno dall'altro. Può infatti presentarsi il caso in cui il componente richieda diversi passaggi aggiuntivi mirati a migliorare determinate caratteristiche del componente, ma anche il caso in cui non sia richiesta nessuna operazione aggiuntiva se non la rimozione dalla piastra di costruzione e la rimozione di eventuali supporti. Più in generale però possiamo dire che i punti chiave della fase di *post-processo* sono comuni a tutte le tecnologie AM, i quali si differiscono l'uno dall'altro nella modalità esecutiva. Nel caso specifico di sistemi AM

basati su letto di polvere, le operazioni minime da eseguire sul componente sono la rimozione dalla piastra di costruzione e la rimozione delle strutture di supporto.

La fase di *post-processo* raggruppa quindi un insieme di operazioni atte a conferire al componente le caratteristiche e le proprietà meccaniche e geometriche richieste. Risulta quindi di fondamentale importanza per far sì che un componente prodotto in AM diventi un prodotto finito. Queste operazioni si possono riassumere in quattro punti principali:

- Rimozione del materiale di supporto
- Miglioramenti alla finitura superficiale
- Miglioramenti delle proprietà tramite trattamenti termici
- Miglioramenti estetici

Il primo passaggio necessario riguarda la rimozione del materiale di supporto. Possiamo suddividerlo in due categorie:

- materiale che circonda la parte: inteso come sottoprodotto naturale del processo, quindi nel caso di L-PBF si intende la polvere non coinvolta nella lavorazione, la quale funge da supporto naturale;
- strutture rigide: hanno lo scopo di supportare ed ancorare la parte che viene costruita su una piattaforma di costruzione (supporti sintetici).

Il primo passaggio, per tutti i sistemi basati sul letto di polvere, è rappresentato dall'aspirazione della polvere non utilizzata mediante un apposito aspirapolvere facente parte dell'apparecchiatura di gestione delle polveri. Fatto ciò è possibile estrarre il componente dalla macchina e spostarlo nel reparto di post-processo dove può essere spazzolato o sottoposto a dei getti di aria compressa per eliminare parte della polvere rimasta ancora attaccata al componente. Solitamente prima di far ciò però si preferisce lasciare raffreddare il pezzo all'interno della macchina, per tempi che variano in base alla dimensione del componente.

Si passa quindi alla rimozione delle **strutture di supporto** rigide. Esse fungono, oltre che da sostegno per sottosquadri, anche come “ancoraggi” per mantenere il componente nella posizione corretta e quindi assicurare la geometria desiderata, in quanto le tensioni termiche che nascono all'interno del pezzo causerebbero delle distorsioni. Per far fronte a questo problema infatti, prima della rimozione dalla piastra di costruzione, è necessario effettuare un trattamento termico mirato ad eliminare le tensioni residue. Fatto ciò, è possibile staccare

il componente dalla piastra di costruzione rimuovendo i supporti senza il pericolo che si verifichino distorsioni della parte. Nel caso di componenti metallici tali strutture sono rimosse a mano utilizzando martello e scalpello. Qualora la parte sia stata costruita direttamente sulla piattaforma senza l'utilizzo di supporti, si ricorre all'uso di fresatrici, seghe a nastro, elettroerosione a filo ed altre tecniche ancora di generico impiego.

Rimossi i supporti si deve curare la **finitura superficiale** del componente. È possibile intervenire subito nelle zone dove erano presenti i supporti, in quanto dopo la loro rimozione è possibile che ne sia rimasta qualche traccia. A seconda del livello di finitura desiderato è inoltre possibile lavorare tutta la parte. Si può ricorrere quindi ad un processo di *sabbatura* (procedura meccanica mirata all'abrasione della superficie per mezzo di un getto di sabbia e aria) se si desidera un effetto opaco della superficie, il quale consente anche di attenuare un eventuale effetto *a gradino* eventualmente presente. Se si desidera invece un effetto più liscio ed una superficie lucida si eseguono operazioni come finitura abrasiva, la lucidatura e la carteggiatura.

È anche possibile migliorare le proprietà del componente prodotto ricorrendo ad i **trattamenti termici**, ovvero specifici cicli termici che prevedono il riscaldamento e il successivo raffreddamento del pezzo sotto determinate condizioni di temperatura, tempo e velocità. Un singolo trattamento può inoltre richiedere diversi cicli.

Nel caso di componenti realizzati tramite L-PBF, possono essere usati per ridurre le tensioni residue, per incrementare la resistenza tramite processo di indurimento per precipitazione, per formare le microstrutture desiderate, per aumentare caratteristiche come la duttilità o per rendere determinate proprietà isotropiche. A seconda del materiale coinvolto è opportuno eseguire i trattamenti in atmosfere controllate, sottovuoto o con gas inerte.

Esistono diversi standard che riguardano i tradizionali trattamenti termici. Sono presenti anche degli standard che riguardano cicli termici semplificati per componenti metallici realizzate tramite sistemi PBF in funzione dei materiali trattati, tra cui troviamo ASTM F2924 e ASTM F3001 che riguardano l'Alluminio. Sono in fase di sviluppo ulteriori standard che coinvolgono altri trattamenti termici e altri materiali che riguardano sempre sistemi PBF tra cui ASTM WK53423 che riguarda proprio la lega di Alluminio **AlSi10Mg** ed altri come ASTM WK48732 per acciai inossidabili e ASTM WK51329 per il cobalto [31].

Per migliorarne ulteriormente l'**estetica** è possibile ricorrere a processi di verniciatura o cromatura. In questo caso le tecnologie impiegate sono quelle tradizionali.

Si capisce, quindi, come a causa della forte incidenza che ha questa fase del processo sulle caratteristiche finali del prodotto finito sarebbe richiesta una procedura di standardizzazione specifica. Tale procedura è attualmente in fase di sviluppo, ma si pensi a come tale standardizzazione sia ampia per comprendere tutte le metodologie costruttive, tutti i materiali trattati e gli effetti delle operazioni di *post-processo* su di essi. Tale mancanza però rappresenta adesso una delle maggiori problematiche di tale processo [31].

2.5 Collaudo

La caratterizzazione delle proprietà del prodotto finito, per componenti realizzati sia con metodo tradizionale sia con metodo AM, è necessaria per garantire che le prestazioni richieste dalla parte siano rispettate. Quest'ultima fase valuta i risultati ottenuti sul prodotto finito, coinvolgendo aspetti dall'intera catena di processo studiata finora, dal controllo della materia prima fino alla fase di post-processo. Pertanto, avere degli standard che ci permettano di stabilire e quantificare le proprietà dei prodotti finiti è fondamentale in ottica di un ulteriore sviluppo della FA.

Allo stesso tempo però definire delle proprietà minime per i componenti realizzati tramite AM è molto difficile in quanto possono dipendere da diversi fattori, come: dal processo, dai parametri di processo utilizzati, dalla direzione con cui è stato costruito il provino rispetto alla direzione di costruzione, dalla posizione del campione all'interno della piastra di costruzione, dalla macchina utilizzata ed ovviamente dal materiale. Le relazioni tra tutte queste variabili e le proprietà del prodotto finito non sono ad oggi ben definite, e ciò rende ancora più difficile la stesura di un corretto piano di caratterizzazione. Inoltre, i risultati ottenuti sarebbero da ritenere validi solo per quella specifica lavorazione, quindi dipendenti da tutti gli specifici fattori precedentemente elencati. Attualmente sono presenti solo degli standard che riguardano delle proprietà minime per i componenti prodotti in L-PBF, del comitato ASTM F42, lasciando il metodo di qualificazione ad un accordo instaurato tra l'acquirente ed il fornitore.

La standardizzazione di un processo già ottimizzato però potrebbe portare ad una riduzione significativa del numero di prove necessarie per la determinazione delle caratteristiche meccaniche garantite, ma resterebbe comunque specifica per quel tipo di macchina.

Non esistono inoltre standard sui metodi d'esecuzione di prove per la determinazione di proprietà meccaniche di componenti realizzati tramite AM, ma vengono impiegate le prove tradizionali che risultano comunque accettabili per diversi scopi. Quello che manca è quindi una standardizzazione che tenga conto di caratteristiche specifiche di questo processo di produzione come ad esempio l'anisotropia.

All'atto pratico, al momento, all'interno di ogni job vengono caricati anche dei provini sui quali in questa fase di *collaudo* verranno eseguite alcune prove. Viene sempre inserito un provino ad osso di cane, per eseguire la *prova di trazione*, infatti da questa prova è possibile estrapolare diverse informazioni che caratterizzano il componente e possono dare un giudizio sul buon esito o meno del processo. Da questa prova è infatti possibile ottenere:

- resistenza allo snervamento;
- resistenza a rottura;
- allungamento percentuale;
- modulo elastico;

È anche possibile inserire nel job dei piccoli cubi sui quali verificare la *densità* effettiva che è stata raggiunta sul componente, e verificare la presenza di eventuali porosità tramite sezioni dello stesso. Per la lega di alluminio AlSi10Mg, stando a quanto indicato dalla scheda tecnica del produttore della polvere EOS GmbH, si dovrebbe arrivare ad ottenere una *densità* di 2.67 g/cm^3 per una *densità relativa* del 99.85%.

Senza dover ricorrere ad altri provini specifici è possibile eseguire un test di *durezza* su quelli già a disposizione. È possibile confrontare i risultati ottenuti quando si parlava della relazione tra densità di energia e caratteristiche del pezzo (Tabella 9), con le caratteristiche riportate dal produttore visibili in Tabella 10, dove i risultati sotto la voce trattamento termico si riferiscono ad un trattamento di tempra di 2 ore a 300°C . Dal confronto emerge come il valore di *durezza* raggiunge, sotto specifici parametri, quello dichiarato.

Infine, un'altra prova che viene eseguita è quella la *verifica a fatica*, inserendo appositi provini all'interno del job.

	As built	Heat treated [9]
Tensile strength [6]		
- in horizontal direction (XY)	460 ± 20 MPa 66.7 ± 2.9 ksi	345 ± 10 MPa 50.0 ± 1.5 ksi
- in vertical direction (Z)	460 ± 20 MPa 66.7 ± 2.9 ksi	350 ± 10 MPa 50.8 ± 1.5 ksi
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]		
- in horizontal direction (XY)	270 ± 10 MPa 39.2 ± 1.5 ksi	230 ± 15 MPa 33.4 ± 2.2 ksi
- in vertical direction (Z)	240 ± 10 MPa 34.8 ± 1.5 ksi	230 ± 15 MPa 33.4 ± 2.2 ksi
Modulus of elasticity		
- in horizontal direction (XY)	75 ± 10 GPa 10.9 ± 0.7 Msi	70 ± 10 GPa 10.2 ± 0.7 Msi
- in vertical direction (Z)	70 ± 10 GPa 10.2 ± 0.7 Msi	60 ± 10 GPa 8.7 ± 0.7 Msi
Elongation at break [6]		
- in horizontal direction (XY)	(9 ± 2) %	12 ± 2%
- in vertical direction (Z)	(6 ± 2) %	11 ± 2%
Hardness [7]		
	approx. 119 ± 5 HBW	
Fatigue strength [1] [8]		
- in vertical direction (Z)	approx. 97 ± 7 MPa approx. 14.1 ± 1.0 ksi	

Tabella 10 - Scheda tecnica per la lega AlSi10Mg del produttore EOS GmbH

Su determinate superfici, per carattere generale o per specifiche esigenze come ad esempio superfici destinate ad un accoppiamento, è anche possibile effettuare una **misura di rugosità**. Infine, è opportuno effettuare un **controllo dimensionale** per verificare che il componente realizzato rispetti le dimensioni e le tolleranze predisposte a progetto. Per far ciò, a seconda della complessità del componente e dei risultati che si vogliono raggiungere, è possibile effettuare delle misurazioni per mezzo di calibro o meglio effettuare diverse misurazioni su specifici punti chiave del componente tramite specifiche strumentazioni a tastatore.

In base ai risultati che emergono dalla fase di collaudo è quindi possibile validare il processo produttivo, fissare tutte le fasi per come sono state eseguite e passare alla produzione. Nel caso in cui si abbiano risultati negativi occorre affrontare uno studio della parte critica e apportare le opportune modifiche all'interno del processo.

3 – Qualifica e Metodologia

3.1 Qualifica di processo

In questo capitolo si vuole dare una visione più schematica e riassuntiva dello studio fatto finora, con il duplice obiettivo di fornire sia una visione più chiara dell'intero processo sia un vero e proprio piano di *qualifica*. Si vuole quindi ricorrere a dei diagrammi di processo che schematizzino le fasi principali del processo di qualifica e ne approfondiscano la fase operativa. Si parte da una visione generale di processo AM, per passare poi al caso particolare oggetto di studio, ovvero il processo di **L-PBF**, con la lega di Alluminio **AlSi10Mg**. Vengono richiamati questi particolari in quanto, si ricordi, il processo di qualifica è specifico per *processo, macchinario, materiale e componente*, ma non tutti questi aspetti si sono voluti fissare per dare al lavoro svolto una valenza più generale. Qualora uno di questi elementi del processo cambiasse sarà necessario predisporre un nuovo piano di qualifica congruo al nuovo scenario.

Come primo obiettivo ci si pone quello di determinare i passaggi fondamentali di un generico processo di Additive Manufacturing, i quali vengono identificati in 3 fasi principali:

- Fase digitale;
- Fase di produzione;
- Fase di post-processo;

Ognuna di esse a sua volta racchiude diverse sottofasi, la maggior parte delle quali trattate nel precedente capitolo. Una visione più chiara di quanto detto è riportata in Figura 38.

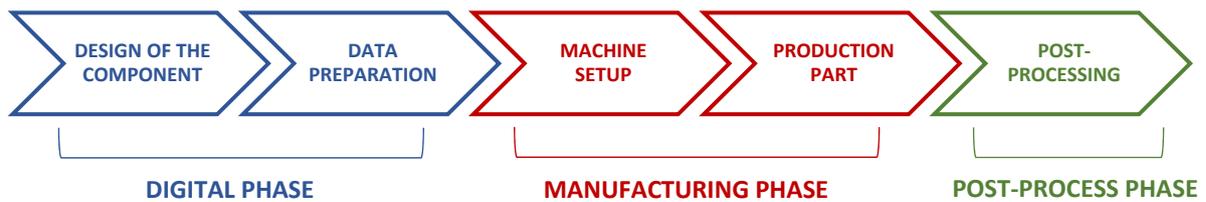


Figura 38 – Fasi principali di un processo di AM

La **fase digitale** viene suddivisa in due sottocategorie: la *progettazione del componente*, nonché la realizzazione di un modello CAD del pezzo che si vuole realizzare e la *preparazione* di tale *file* per l’invio alla macchina, quindi conversione del file e scelta di tutti i parametri di processo ed altre operazioni ad esse legate.

Successivamente troviamo **fase di produzione** la quale racchiude tutte quelle procedure legate alla *preparazione della macchina* e la *costruzione* vera e propria del componente.

Infine, troviamo la **fase di post-processo** composta da un numero di operazioni variabili, a seconda della finalità del componente, ed esposte precedentemente, come trattamenti termici, pulizia, rimozione supporti ed altro.

Determinati i punti cardine del processo, si vuole adesso completare la visione d’insieme e predisporre un modello per la qualifica di processo. Ciò è stato rappresentato in Figura 39 e mostra come il primo compito da svolgere è quello di identificare l’oggetto che si vuole produrre e la tecnologia con la quale realizzarlo, scelta che dovrà ovviamente tenere conto del materiale e delle proprietà finali che dovrà possedere il componente. Si passa quindi alla *fase digitale* e parallelamente ad essa è possibile condurre la fase di *controllo* sulla *materia prima* da impiegare nella lavorazione, per verificare che essa risulti idonea al processo. Seguono quindi la fase di *produzione*, di *post-processo* e di *certificazione* finale.

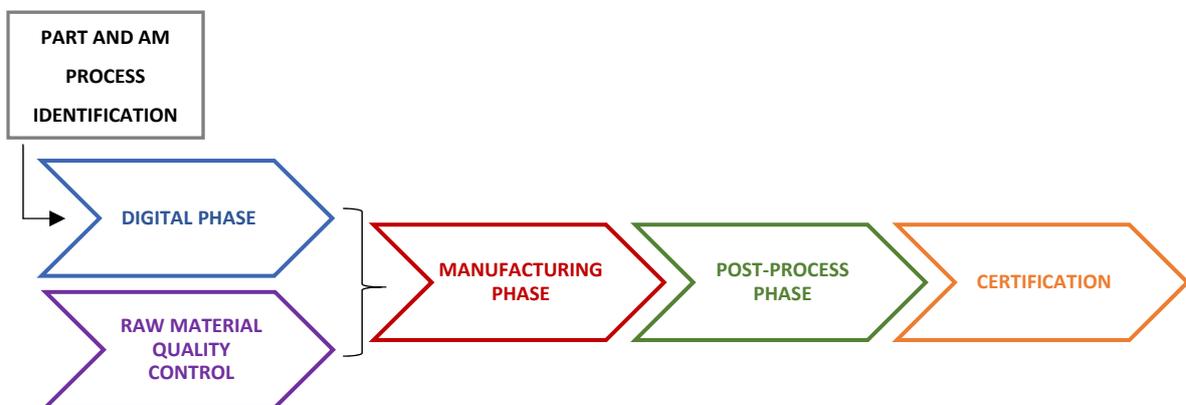


Figura 39 – Schema della qualifica di processo

Si noti come questo schema riporti gli aspetti chiave del processo in modo del tutto generale, offrendo la possibilità di sfruttare tale schema per qualsiasi processo di fabbricazione additiva, specificando punto per punto, le fasi ed i metodi esecutivi che lo contraddistinguono. Si è quindi deciso di partire proprio da questo schema per svilupparne uno specifico e maggiormente dettagliato per il caso studio in esame. Esso dovrà tenere conto di tutte le fasi e sottofasi già trattate nel capitolo precedente, assimilarne i concetti, ed essere completato dalle fasi operative. Tale lavoro ha portato alla stesura dello schema di *qualifica di processo* per la tecnologia di L-PBF riportato in Figura 40.



Figura 40 – Schema di qualifica di processo per tecnologia L-PBF

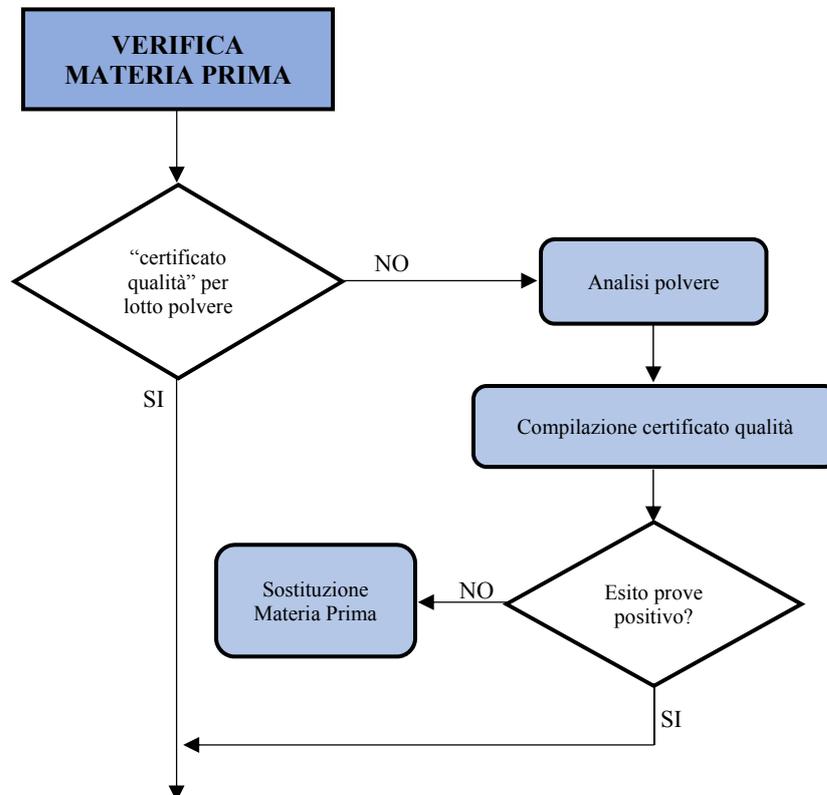
Ogni blocco di questo diagramma rappresenta una delle fasi principali del processo e ne riassume i concetti sotto un'unica dicitura. Nella parte successiva invece ci si concentra su ogni singola fase analizzandola più nel dettaglio.

3.2 Metodologia

Si affrontano ora le singole fasi del processo, riportando per ciascuna di esse, ove possibile, nuovi diagrammi di flusso che rappresentino la fase operativa da eseguire con maggior dettaglio rispetto a quanto fatto precedentemente. Tutto ciò tenendo in considerazione i risultati dello studio affrontato finora e richiamando gli aspetti della caratterizzazione riportata al capitolo 2.

I diagrammi che seguono sono da intendersi come una continuazione del precedente, costituendo quindi un diagramma di processo unico. Esso è stato frammentato in più parti al fine di analizzarle singolarmente e fornire, di conseguenza, maggior chiarezza espositiva.

3.2.1 Verifica della materia prima



La fase operativa può partire dal controllo della materia prima da impiegare nel processo. È infatti necessario assicurarsi che essa risulti idonea con i requisiti richiesti per questo tipo di lavorazione. La prima cosa da chiedersi è quindi se esiste già un “certificato di qualità” per il lotto di materiale da cui verrà presa la polvere per eseguire la lavorazione. Questo certificato di qualità si riferisce ad una certificazione interna, condotta a carico dall’utente del macchinario, volta a verificare che il lotto di polvere acquistato sia conforme ai propri standard. Questa certificazione può essere fatta dall’utente stesso se dispone di appositi laboratori e strumentazioni o condotta da un ente esterno.

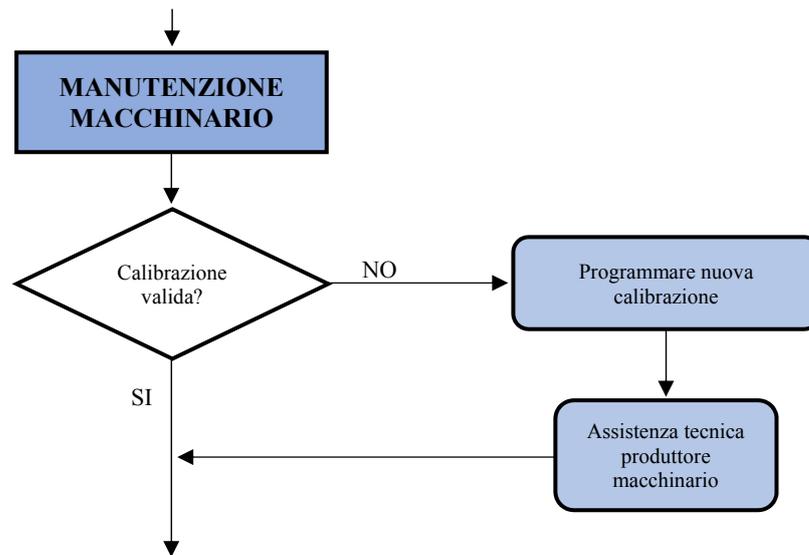
Se si dispone già di questo certificato per il lotto di polvere che si intende utilizzare nel processo, perché precedentemente analizzato, è possibile procedere alla fase successiva, se invece se n’è sprovvisti è opportuno procedere con tale controllo. Delle variazioni sulla materia prima si possono verificarsi anche all’insaputa dell’utente, il quale si rifornisce sempre dallo stesso fornitore. Piccole variazioni, pur rimanendo all’interno dei criteri di accettabilità e quindi tali da ritenere il materiale sempre valido, possono comportare delle correzioni ai parametri di processo impiegati al fine di mantenere gli standard desiderati.

Questa documentazione deve contenere gli esiti delle prove relative alla caratterizzazione della materia prima analizzate precedentemente e verificare che tali risultati rientrino nei limiti imposti ed evidenziarne significativi cambiamenti. Questo documento dovrà contenere quindi i risultati delle seguenti prove:

- Composizione chimica
- Analisi della morfologia ed immagini al SEM
- Analisi della dimensione e della distribuzione delle particelle
- Calcolo della *densità apparente* e della *densità al tocco* (tap density)
- Flowability

Tutte queste prove devono essere eseguite in accordo con gli standard precedentemente citati. Qualora i risultati di tali test risultino idonei si può passare alla fase successiva, in caso contrario si deve cambiare la materia prima impiegata nel processo e ripetere tale procedura per il nuovo lotto.

3.2.2 Manutenzione macchinario



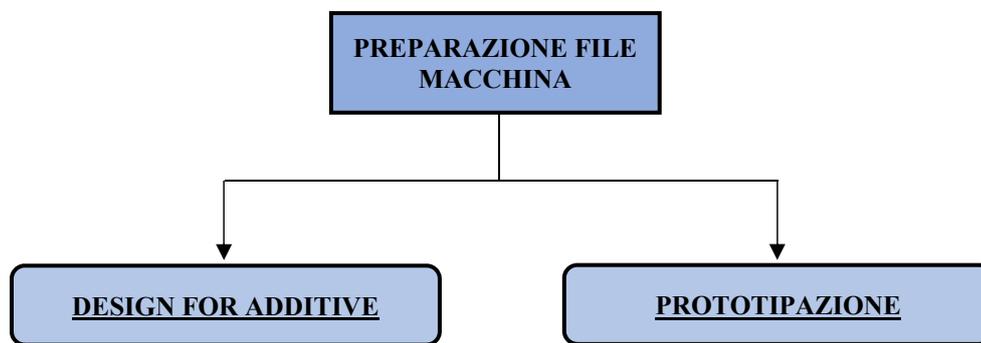
Va eseguita un'ulteriore verifica preliminare, che questa volta riguarda il macchinario che si intende utilizzare nel processo. Generalmente, questi tipi di dispositivi richiedono un piano di manutenzione che può verificarsi ogni 6 o 12 mesi a seconda dell'utilizzo fatto. Di conseguenza è necessario chiedersi se si è all'interno o meno di questo intervallo temporale e quindi se la calibrazione della macchina è da ritenersi valida o meno. Se l'esito è positivo si può passare alla fase successiva, sennò è opportuno programmare un piano di intervento rivolgendosi alla ditta produttrice, per ricevere l'opportuna assistenza. Tale operazione può essere richiesta anche qualora la macchina fosse stata ferma per un periodo superiore ai 12 mesi o se è stata ricollocata in una nuova posizione. Il piano di intervento ad opera della ditta produttrice prevede un controllo dettagliato di tutti i componenti del macchinario con particolare attenzione per quello che riguarda l'intero sistema ottico. Alla fine dell'intervento di manutenzione viene eseguito un lancio di un job di prova. Sul componente prodotto vengono eseguite opportune verifiche mirate a determinare il corretto funzionamento del dispositivo e vengono anche determinati alcuni parametri correttivi da impostare nella fase digitale e caratteristici del tipo di materiale impiegato.

Una programmazione attenta sulle tempistiche di questo tipo di intervento, facilmente controllabile, permette di evitare un'interruzione della produzione per tempi prolungati.

3.2.3 Preparazione file macchina

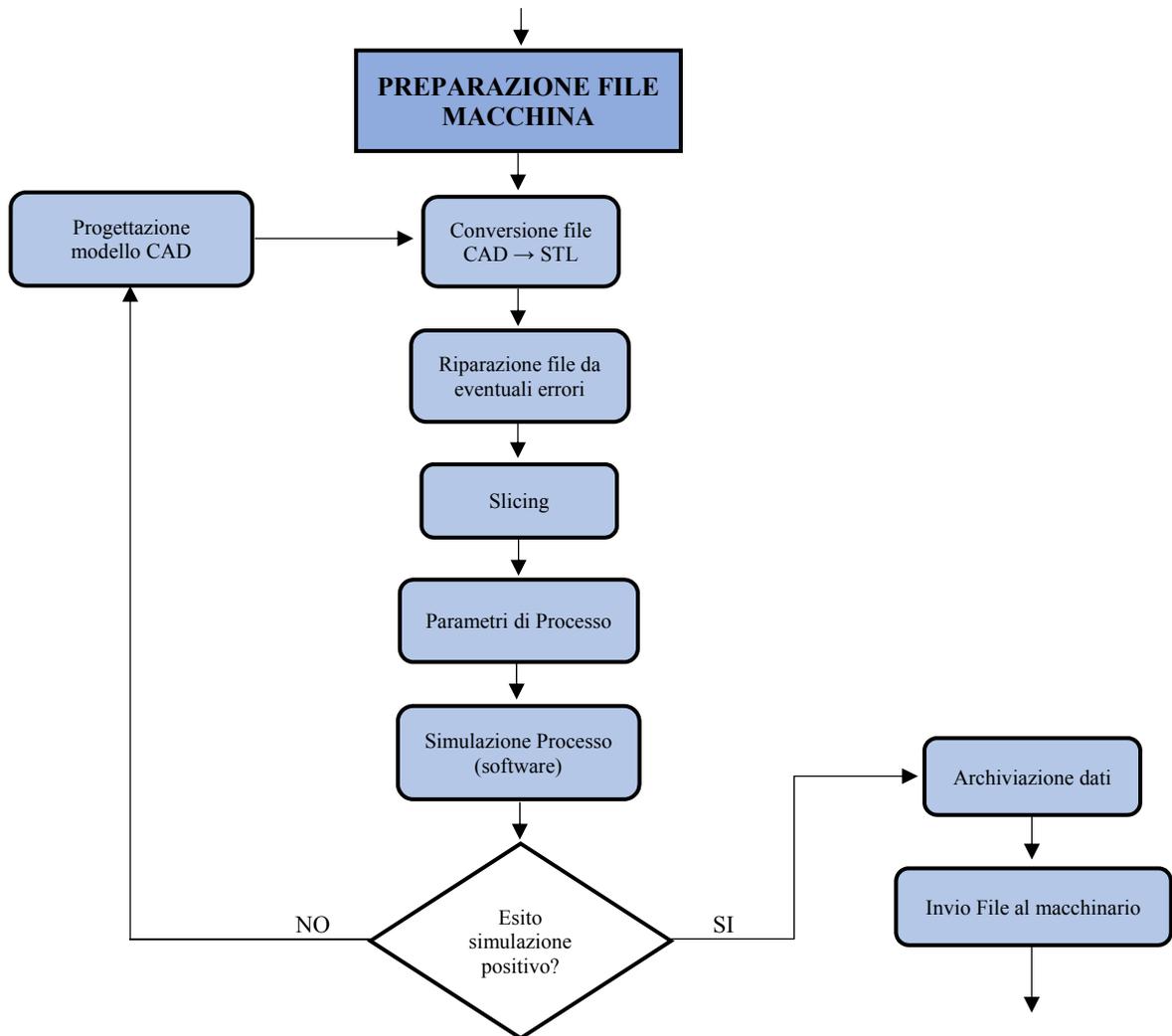
Concluse le fasi preliminari, è possibile passare alla **fase digitale**. Occorre adesso richiamare una precisazione su quanto segue, infatti è possibile che si verifichino due differenti scenari, presentati precedentemente:

- Design for additive: progettazione specifica del componente per la realizzazione secondo tecnologie di AM.
- Prototipazione: adattamento di un modello esistente, prodotto con tecniche tradizionali, per la nuova realizzazione tramite tecnologie di AM.



È quindi necessario fare questa distinzione in quanto le fasi che seguono pur essendo simili tra loro presentano delle differenze non trascurabili. Sono quindi stati sviluppati due piani di processo alternativi, riguardanti solo questa fase, a seconda della condizione nella quale ci si trova.

3.2.3.1 Design for additive



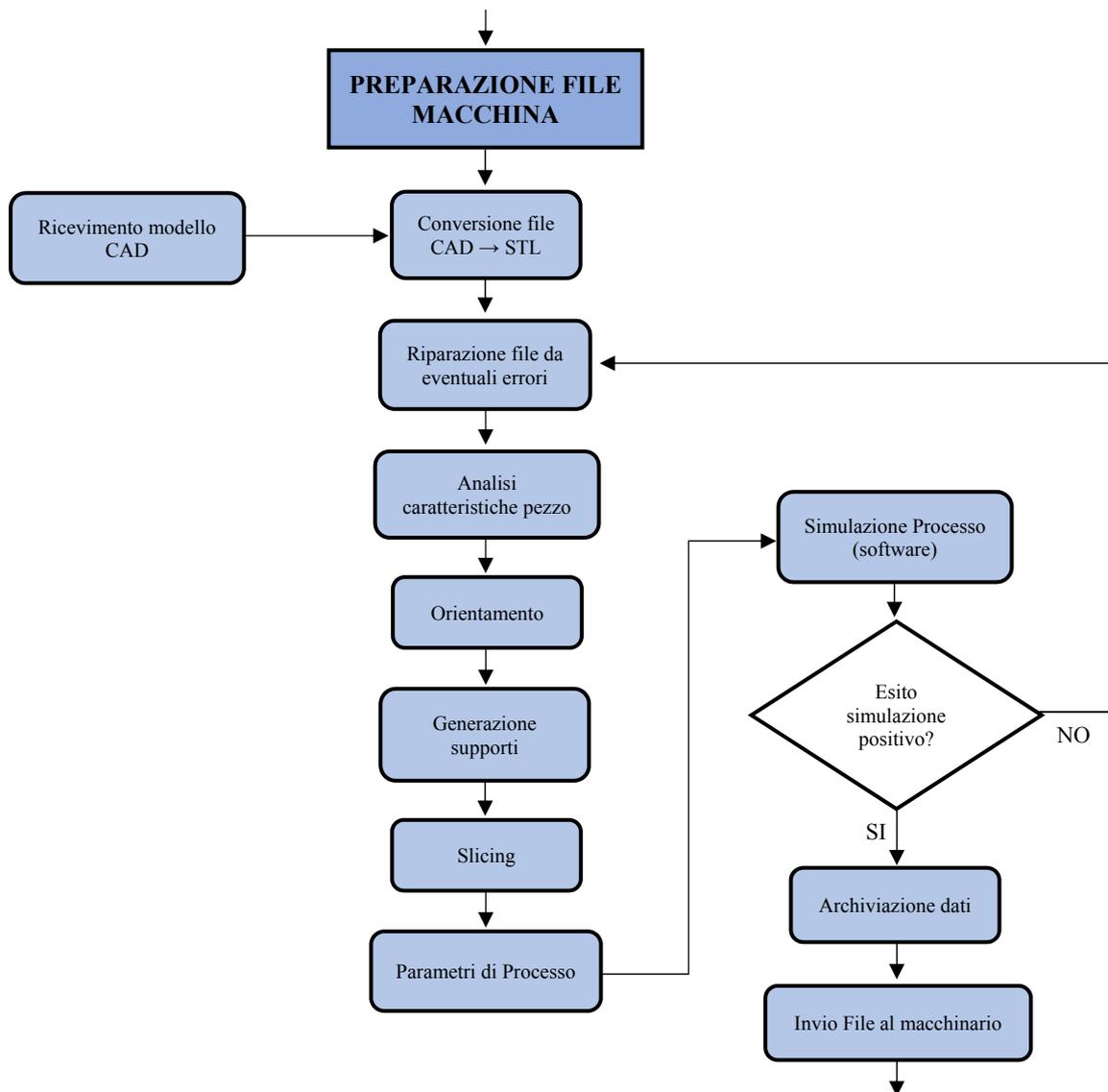
Il primo caso affrontato è quello di “design for additive” dove il componente è stato già progettato per questa specifica produzione. Questo comporta che in fase di progettazione sono già state effettuate delle operazioni che tengano conto delle *caratteristiche* che dovrà avere il *componente* ed altre, come l’*orientamento* che esso dovrà avere all’interno della piattaforma di costruzione e la fase di *generazione di supporti*. Su queste operazioni, essendo inglobate nella fase di progettazione del componente, l’operatore incaricato alla produzione non avrà più la possibilità di intervenire. Fatta tale precisazione si passa fase di preparazione del file macchina. Una volta ricevuto il modello CAD dal reparto di progettazione si deve provvedere alla sua conversione nel formato STL (o AMF). Risulta necessario verificare che tale operazione sia avvenuta con successo in quanto è possibile riscontrare degli errori durante la conversione (vedi 2.2 Preparazione file macchina). Fatte le opportune correzioni

(quando necessarie), è possibile passare alla fase di *slicing* andando quindi a determinare il primo dei principali parametri di processo, ovvero lo spessore dello strato t . Generate quindi tutte le sezioni 2D che la macchina dovrà eseguire si passa all'impostazione di tutti i restanti *parametri di processo*. Ciò avviene tramite un apposito software gestibile da remoto e che rende non necessario intervenire direttamente sulla macchina. Per tale operazione come già ampiamente discusso in precedenza non ci sono specifici riferimenti ma ci si basa sul proprio *know-how*.

Successivamente troviamo la parte di *simulazione di processo*, seppure in questo momento sono presenti software che consentono la simulazione solo di alcune fasi del processo. Con la speranza che tali software vengano migliorati e che riescano a simulare l'intera fase di lavorazione, si vuole lasciare questa voce, seppur oggi non particolarmente esaustiva, in quanto, in futuro, potrebbe rappresentare un importante mezzo per la verifica di quanto fatto finora. Qualora l'esito di tale simulazione risultasse negativa è necessario individuare l'errore e porvi rimedio. Nel caso trattato di "design for additive" sarebbe possibile tornare indietro direttamente alla fase di progettazione del modello CAD per far fronte alle correzioni del caso, e ripartire con la procedura appena esposta. Se invece, come ci si augura, l'esito fosse positivo è opportuno passare alla registrazione di tutti i dati relativi alla lavorazione impostati fino a questo momento, in quanto potrebbero in futuro tornare utili per ulteriori indagini sul componente, ma soprattutto costituiscono un'informazione fondamentale per il pezzo prodotto.

Si può quindi ritenere completata la fase digitale e procedere con l'invio del file al macchinario per le operazioni successive.

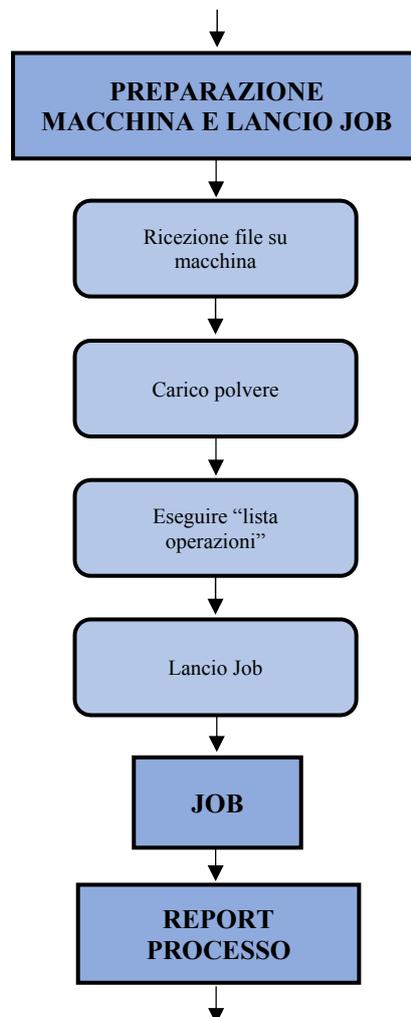
3.2.3.2 Prototipazione



Si passa quindi al caso della “prototipazione” sul quale però ci concentreremo solamente su quelle che riguardano le differenze rispetto al caso precedente al fine di evitare ripetizioni. Appare da subito evidente una prima differenza nella fase di ricezione del modello CAD. In questo caso infatti il componente non deve essere progettato appositamente ma ne esiste già una sua versione CAD precedentemente usata per metodi di produzione tradizionali. Su tale componente non si ha quindi margine di manovra ma si dovrà comunque lavorare per ottenere un risultato conforme agli standard qualitativi desiderati. Eseguita quindi la conversione del file, e verificata la sua corretta esecuzione ci si ritrova davanti ad una nuova fase operativa. È infatti necessario controllare le caratteristiche che dovrà avere il componente, come ad esempio il livello di rugosità delle superfici, al fine di effettuare in

modo corretto le fasi successive, che risultano avere una forte influenza su questi aspetti. Occorre infatti determinare la posizione e l'*orientamento* che dovrà avere il pezzo all'interno della piastra di costruzione, provvedere alla fase di *generazione di supporti* secondo i criteri e funzionalità precedentemente trattate, e solo successivamente passare alla fase di *slicing*. Queste operazioni precedentemente non erano state eseguite in quanto rientravano all'interno del lavoro svolto dai progettisti in fase di progettazione del componente. Si può quindi passare all'impostazione dei *parametri di processo* ed alla *simulazione* tramite software. Adesso però nel caso in cui la simulazione restituisca esito negativo, non è possibile ritornare alla fase di *progettazione del componente* per effettuare modifiche ma si è costretti a ritornare alla fase di *riparazione del file* in quanto impossibile intervenire a livello di progettazione del componente.

3.2.4 Preparazione macchina e lancio job

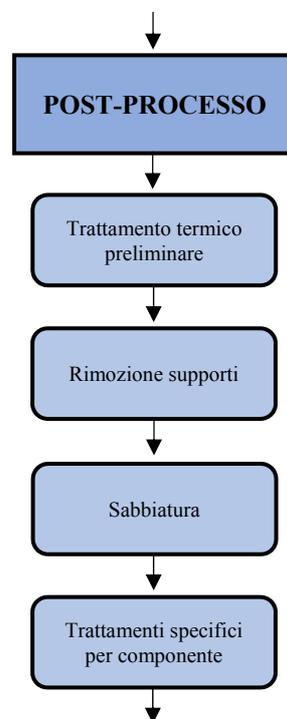


Si abbandona ora la postazione dedicata alla *fase digitale* per spostarsi a bordo macchina arrivando così alla *fase di produzione*. Ricevuto il file, precedentemente elaborato, sul

macchinario, si passa alla preparazione di quest'ultimo per la lavorazione. Occorre innanzitutto caricare la macchina con il materiale sufficiente per la lavorazione. Abbassando la base della camera di fornitura della polvere, comandata da un pistone mobile, è possibile predisporre tale area per la fase di carico della materia prima la quale avviene tramite la strumentazione precedente illustrata per il sistema di gestione delle polveri qualora si trattasse di polvere riciclata o direttamente dalle confezioni originali se si impiega polvere nuova. Caricata la polvere nel macchinario è opportuno eseguire diverse operazioni, le quali al fine di offrire maggior chiarezza espositiva vengono raggruppate, nel diagramma precedente, sotto la voce "lista operazioni". È infatti compito dell'operatore incaricato seguire l'iter di operazioni contenute in un apposito documento riassuntivo. Vediamo quindi le operazioni contenute al suo interno. Come prima cosa è necessario occuparsi del *compattamento della polvere* all'interno della camera di fornitura. Tramite operazioni manuali infatti bisogna cercare di raggiungere un grado di compattamento più alto possibile, fondamentale per evitare la presenza di porosità durante la fase di deposizione dello strato di polvere e quindi sul componente finito. Fatto ciò si può portare il pelo libero della polvere alla quota di riferimento tale da permettere al recoter di prelevare il materiale. È buona norma assicurarsi dello stato di *pulizia della lama* del recoter, infatti essa può essere smontata per essere controllata pulita ed eventualmente affilata qualora si utilizzi una lama in acciaio, prima di essere rimontata sul recoter. Successivamente risulta fondamentale effettuare una *pulizia accurata dell'intera camera di processo* come discusso precedentemente (2.3 Preparazione macchina), con particolare cura per elementi come i sensori di ossigeno e la lente posta nella parte superiore della camera. Si passa quindi al *fissaggio della piastra di costruzione*, sulla quale verrà costruito il pezzo, alla base mobile centrale ed al suo corretto *allineamento*. È infatti fondamentale che essa risulti perfettamente orizzontale e tale regolazione è resa possibile tramite degli opposti comandi che ne permettono la rotazione intorno agli assi x e y ed un ulteriore comando che ne regola la quota z . Si faccia attenzione alla quota z e si verifichi che non vi sia alcun punto di contatto tra piastra di costruzione e lama. Fatto anche questo si può passare al fissaggio di un elemento, una sorta di ugello, responsabile dell'aspirazione per l'inertizzazione e l'aspirazione dei fumi della camera di processo posto nella parte frontale di quest'ultima. Si può quindi passare alla sua chiusura ed avviare la procedura di inertizzazione della camera. Si aspetta quindi che il livello di ossigeno scenda al di sotto dello 0,1%, il cui stato di questa operazione è controllabile tramite lo schermo touch screen di interfaccia macchina-utente, per poter *avviare la lavorazione*.

Sempre tramite l'apposita interfaccia è possibile controllare lo stato di avanzamento della lavorazione. Alla fine di tale operazione è possibile estrarre dalla macchina, tramite apposito software, un file che rappresenta un *report di processo* al cui interno possiamo trovare informazioni generali di tutta la fase della lavorazione. Un esempio è l'andamento del livello di ossigeno all'interno della camera di processo durante la lavorazione. Riporta inoltre eventuali anomalie registrate dalla macchina durante il processo, che potrebbero tornare di primaria importanza qualora l'esito della fase finale di collaudo risultasse negativa. Conclusa tale fase il pezzo è fisicamente completo e pronto per la fase di post-processo.

3.2.5 Post-processo



La prima operazione da eseguire è la rimozione di quelli che sono stati precedentemente definiti come supporti naturali (3.2.5 Post-processo), ovvero la polvere non coinvolta nel processo di fusione. Successivamente si può passare alla rimozione della piastra di costruzione dal macchinario, con ancorato il pezzo realizzato. Si procede quindi con un'operazione di pulitura superficiale tramite soffiaggio ad aria compressa sul componente per la rimozione di eventuale polvere rimasta attaccata alle superfici o all'interno di cavità. Specialmente in questo tipo di processi di L-PBF le tensioni residue interne alla parte possono essere notevoli e se non opportunamente trattate possono portare, una volta rimosso dai supporti rigidi, alla distorsione del pezzo. È quindi necessaria come prima cosa sottoporre

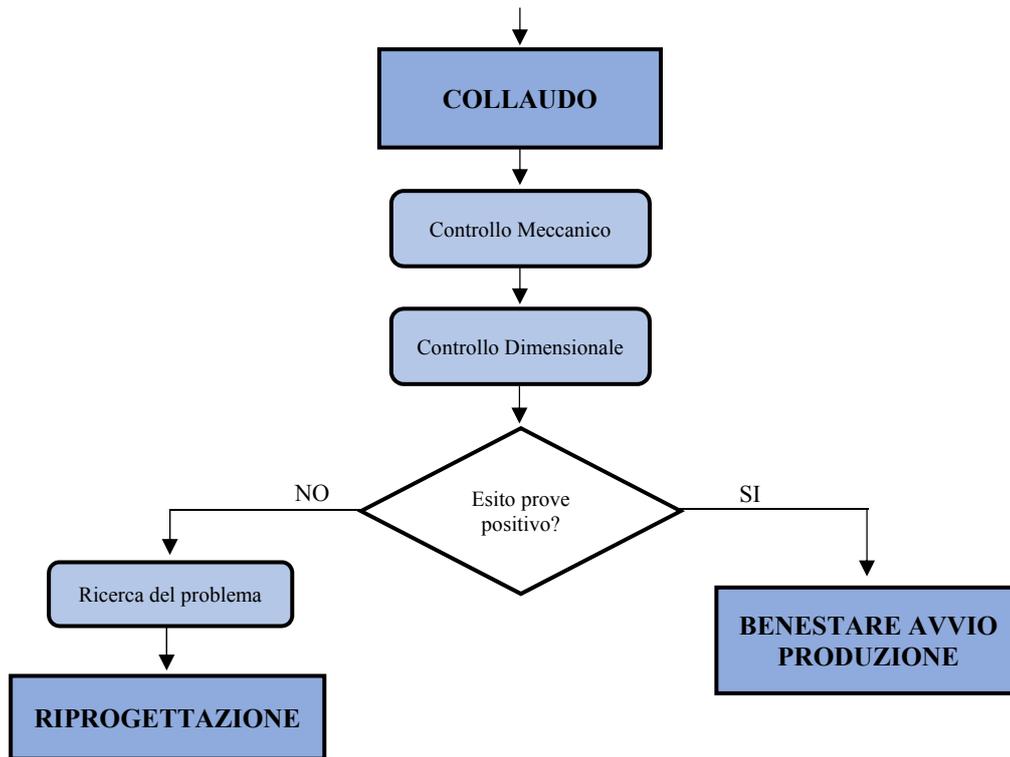
il componente ad un *trattamento termico preliminare* mirato all'eliminazione di tali tensioni residue. Solo successivamente è possibile staccare il pezzo dalla piastra base tramite *la rimozione dei supporti rigidi*. Tale operazione può essere effettuata tramite l'impiego di una sega a nastro o tramite fresatrice dopo la rimozione manuale dei supporti presenti nelle varie parti a sbalzo.

Una volta liberato il componente dai supporti è possibile intervenire sulla superficie del componente. In primo luogo, si cerca di intervenire sulle superfici della parte in cui era presente la struttura di supporto, al fine di correggere eventuali imprecisioni dovute ad un taglio non pulito. Successivamente ci si sposta verso la cura dell'intera superficie e per fare ciò si ricorre solitamente al processo di *sabbiatura*. Se è richiesta una superficie più lucida è possibile ricorrere ad un processo di finitura abrasiva o carteggiatura.

Infine, il componente può essere sottoposto ad ulteriori trattamenti, ma ciò dipende dalle proprietà e dalla funzionalità richiesta. Tali trattamenti aggiuntivi andranno opportunamente specificati di volta in volta.

Si conclude così la fase di *post-processo*, al termine della quale si può ritenere che il componente realizzato sia finito. Resta quindi da verificare che tutte le operazioni eseguite finora abbiano portato ai risultati desiderati attraverso la fase di collaudo.

3.2.6 Collaudo



Una volta completato il componente bisogna che esso passi alla fase di *collaudo*. Si ricorda che insieme al pezzo all'interno del job sono stati inseriti degli appositi provini, in previsione proprio di questa fase. Anche essi dovranno essere sottoposti a tutte le fasi di *post-processo* a cui è sottoposto il componente. Ottenuti quindi i provini è possibile passare all'esecuzione delle prove che vengono in questa sezione semplicemente richiamate:

- Prova di trazione
- Misura della densità
- Test di durezza
- Verifica resistenza a fatica

Mentre direttamente sul componente è possibile eseguire:

- Misurazione di rugosità delle superfici
- Controllo dimensionale

Effettuate queste prove e misurazioni, si rende necessario confrontare i risultati ottenuti con i valori di riferimento prestabiliti, che essi siano quelli forniti dalla scheda tecnica del

materiale (Tabella 10), o scelti dal produttore in base alle proprie esigenze. Per quanto riguarda il controllo dimensionale invece le misurazioni rilevate andranno confrontate con le dimensioni del modello CAD, così da valutare la fedeltà di riproduzione del componente fisico.

Qualora i risultati, anche di una sola di queste prove, non fossero concordi con i valori di riferimento è necessario passare ad una fase di *ricerca del problema*, ovvero condurre un'analisi mirata alla caratteristica del componente che non è stata rispettata al fine di porvi rimedio con le opportune modifiche. Determinato quindi un piano di modifica volto alla risoluzione del problema sarà quindi necessario metterlo in atto in una fase di *riprogettazione* del processo.

Se invece i risultati di tutte le prove dovessero essere concordi con i valori prefissi, è possibile approvare e fissare l'intero processo produttivo, così per come è stato eseguito, dando quindi il *benestare* all'avvio della *produzione*.

4 – Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro svolto in collaborazione con il Gruppo FCA è stato quello di realizzare un modello di qualifica per il processo di produzione L-PBF nel settore dell'autoveicolo. In seguito ad un'approfondita ricerca bibliografica che ha portato all'identificazione di alcuni standard di riferimento da utilizzare in questo contesto, è stato possibile redigere un piano di *qualifica di processo* completo, che analizzi tutte le fasi coinvolte nel processo e che provi a fornire delle linee guida di riferimento dove gli standard normativi risultano assenti. A tale proposito si richiama lo studio condotto sulla caratterizzazione dei *parametri di processo* e della loro correlazione con la *densità di energia* (2.2.1 Parametri di processo – densità di energia). Se da un lato i risultati prodotti non confermano a pieno la validità di tale criterio, esso può rappresentare comunque un fattore di cui tenere conto in fase decisionale, quantomeno in prima approssimazione. Dall'altro, hanno invece evidenziato che una relazione con la durezza superficiale esiste. Sarebbe quindi interessante approfondire gli aspetti di questa ricerca, in quanto i risultati prodotti potrebbero portare un vero valore aggiunto al lavoro di qualifica.

Sulla base di questi studi è stata inoltre redatta una normativa interna per il gruppo FCA, presso il quale è stato trascorso un periodo di tempo dedicato all'apprendimento della realtà pratica volta a definire un modello di qualifica che possa integrarsi con le specifiche procedure interne aziendali.

Un'ulteriore considerazione sul lavoro svolto è che il modello di *qualifica di processo* qui presentato ben si presta a fungere come modello di riferimento per lo sviluppo futuro di ulteriori piani di qualifica destinati ad altre tecnologie e macchinari AM.

Si è inoltre individuato che per la realizzazione di un prodotto di qualità elevata, occorre rivolgere particolare attenzione alle fasi di controllo della materia prima, di preparazione del

file macchina e di determinazione dei parametri di processo. Sono infatti questi i punti fondamentali su cui concentrarsi per assicurare la produzione di un componente di qualità.

Appendice

A.1. Il macchinario EOS M290

La macchina nel suo insieme è composta da più elementi, una struttura centrale ed una adiacente visibili in Figura 41 e una apparecchiatura ausiliaria chiamata Conveyor, a sé stante. La parte centrale, ed anche più grande, della macchina è quella dove avviene la produzione del componente. Nella parte superiore è collocato l'intero sistema ottico dotato di un laser Yb (Ytterbium), laser alle fibre ottiche, con una potenza nominale di 400W. Di seguito, in Tabella 11, sono riportate le caratteristiche del laser. Si noti come la potenza massima effettiva sull'area di lavoro sia leggermente inferiore e pari a 370W.



Figura 41 - EOS M290 [17]

Tipo di laser: Yb (Ytterbium) - laser alle fibre ottiche	
Potenza nominale	400W
Potenza sul campo di lavoro	370W
Lunghezza d'onda	1060 - 1100 nm
Lunghezza d'onda della radiazione	960 - 980 nm

Tabella 11 – Dati tecnici laser [18]

Specifiche tecniche generali per EOS M290	
Volume di costruzione	250 mm x 250 mm x 325mm
Ottica di precisione	F-theta-lens; scansione ad alta velocità
Velocità di scansione	fino a 7.0 m/s
Diametro di messa a fuoco	100 µm
Alimentazione elettrica	32 A
Consumo di energia	max. 8.5 kW / tipico 3.2 kW
Generatore di Azoto	integrato
Fornitura di aria compressa	7,000hPa; 20m ³ /h
Dimensioni (B x D x H)	
Sistema	2,500 mm x 1,300 mm x 2,190 mm
Spazio di installazione consigliato	min 4,800mm x 3,600 mm x2,900
Peso	circa 1,250 kg

Tabella 12 – Dati tecnici EOS M290 [18]

Coadiuvato da un sistema di lenti, tra cui la F-theta lens che previene la deformazione ellittica del punto laser, il fascio riesce a raggiungere tutti i punti della piastra di costruzione. Altri dati tecnici caratteristici della macchina sono riportati in Tabella 12.

Nella parte sottostante il sistema ottico, troviamo la camera di processo. È qui che avviene la realizzazione del pezzo. L'operatore può accedere a quest'area attraverso l'apertura dello sportello frontale, per la fase di carico e scarico macchina, mentre attraverso il vetro, con sportello chiuso, è possibile vedere la piattaforma di lavoro e assistere quindi alla realizzazione del componente. La base di questo ambiente e lo spazio sottostante sono raffigurati in Figura 10. A destra è presente l'ambiente di raccolta e fornitura della polvere, il cui basamento è costituito da una piastra e un pistone, mobile verticalmente, che traslando verso l'alto fornisce nuova polvere al recoter. Questo trasla orizzontalmente sul piano x-y dove prima raccoglie la polvere dalla cima della camera di fornitura e dopo la distribuisce

nell'area di lavoro fino ad arrivare nell'ultima area, a sinistra, dove la polvere in eccesso viene scaricata.

Infine, è presente un display touch-screen attraverso il quale l'operatore può comandare e monitorare la macchina.

L'elemento a sinistra è un sistema di filtrazione dell'aria. L'aria prelevata dalla camera di processo viene infatti inviata all'interno di questa apparecchiatura che la filtra, ne raccoglie sul fondo eventuali contaminanti solidi e la reimmette nell'ambiente di lavoro.

L'ultima apparecchiatura citata è il Conveyor, che si usa una volta finita la lavorazione per aspirare la polvere che non è stata coinvolta nella realizzazione del componente, oppure, quando richiesto, per la raccolta di tutta la polvere all'interno della macchina. Completata questa operazione si può attivare la vibrazione del sistema, consentendo così alla polvere di passare al setaccio, bloccando eventuali agglomerati che si possono essere creati durante la lavorazione, e di essere raccolta in appositi contenitori. La polvere quindi può essere conservata e riutilizzata per la prossima lavorazione. Si riportano per completezza, in Tabella 13, i dati tecnici relativi a queste ultime apparecchiature. Mentre in Figura 42 è riassunto il ciclo operativo che riguarda la gestione della polvere.

Modulo di trasporto della polvere	
Applicazione	Trasporto di polvere metallica
Fornitura di aria compressa	5.5 – 6 bar, up to 1,204 NI/min
Alimentazione elettrica	100-240V / 0.1 kW
Dimensione (L x P x H)	770 x 690 x 2,060 mm
Modulo per la setacciatura delle polveri	
Applicazione	Setacciatura di polvere metallica
Dimensione della maglia	Standard 63microm, altre dimensioni possibili
Principio di funzionamento	Setacciatura vibrante ultrasonica
Alimentazione elettrica	400 V / 115 W
Dimensione (L x P x H)	750 x 790 x 1,510 mm

Tabella 13 - Dati tecnici Conveyor e modulo di setaccio [18]



Figura 42 – Schema di gestione delle polveri [18]

Bibliografia

- [1] ASTM F2792-12a, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," (Withdrawn 2015) ASTM International, pp. 1–3, West Conshohocken, PA, 2012.
- [2] Kruth, J-P., Ming-Chuan Leu, and Terunaga Nakagawa. "Progress in additive manufacturing and rapid prototyping." *Cirp Annals* 47.2 (1998): 525-540.
- [3] Manfredi, Diego, et al. "Additive manufacturing of Al alloys and aluminium matrix composites (AMCs)." *Light metal alloys applications*. InTech, 2014.
- [4] L. Iuliano. Materiale didattico del corso "Produzione assistita da calcolatore", corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino, Torino, 2017-20
- [5] Wing, Ian, Rob Gorham, and B. Sinderman. "3D Opportunity for Quality Assurance and Parts Qualification. Additive Manufacturing Clears the Bar." (2015).
- [6] Horizon 2020, work programme 2018-2020, Bando Europeo, http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-leit-nmp_en.pdf
- [7] Yang, Li, et al. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Springer, 2017.
- [8] Mueller, Bernhard. "Additive manufacturing technologies–Rapid prototyping to direct digital manufacturing." *Assembly Automation* 32.2 (2012)
- [9] Calignano, Flaviana, et al. "Overview on Additive Manufacturing Technologies." *Proceedings of the IEEE* 105.4 (2017): 593-612.

-
- [10] Multi-jet materials jetting technology. Sorgente immagine www.vt.me.edu
- [11] Stratasys group company, polyjet, sorgente www.technimoldsistemi.com
- [12] Powder Bed Fusion. Sorgente immagine <http://www.lboro.ac.uk>
- [13] Sheet lamination. Sorgente immagine www.compositesworld.com
- [14] Vat Photopolymerization www.engineersgarage.com
- [15] Struttura tradizione struttura AM. Sorgente immagine www.metal-am.com
- [16] Blade Cooling. Sorgente immagine <http://www.turbocam.com>
- [17] EOS M290. Sorgente immagine www.additivemanufacturing.media
- [18] Manuale macchinario EOS M290
- [19] Yang, L., et al. "Additive Manufacturing of Metals: The Technology." *Materials, Design and Production, Springer, Cham* (2017)
- [20] Khairallah, Saad A., et al. "Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones." *Acta Materialia* 108 (2016): 36-45.
- [21] Srivatsan, T. S., and T. S. Sudarshan. Additive manufacturing: innovations, advances, and applications. CRC Press, 2015.
- [22] Calignano F, Manfredi D, Ambrosio EP, Iuliano L, Fino P. Influence of process parameters on surface roughness of aluminium parts produced by DMLS. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013; 67 (9-12): 2743-2751.
- [23] Calignano, F., G. Cattano, and D. Manfredi. "Manufacturing of thin wall structures in AlSi10Mg alloy by laser powder bed fusion through process parameters." *Journal of Materials Processing Technology* 255 (2018): 773-783.
- [24] Debbie Huck-Jones, Cathryn Langley; "Beyond particle size: Exploring the influence of particle shape on metal powder performance"; *Metal AM - The Magazine For The Metal Additive Manufacturing Industry*; vol. 3, n. 4; Winter 2017
- [25] Yap, Chor Yen, et al. "Review of selective laser melting: Materials and applications." *Applied physics reviews* 2.4 (2015): 041101.
- [26] ASM handbook. Volume 7, Powder metal technologies and applications. Materials Park, OH: ASM International, ©1998.
- [27] Atomizzazione. Sorgente immagine www.lpwtechnology.com
-

- [28] Manfredi, Diego, et al. "From powders to dense metal parts: Characterization of a commercial AlSiMg alloy processed through direct metal laser sintering." *Materials* 6.3 (2013): 856-869.
- [29] Scheda tecnica polvere AlSi10Mg di EOS GmbH
- [30] ISO/ASTM DIS 52907 (ASTM F42) Additive manufacturing -- Technical specifications on metal powders
- [31] Standardization Roadmap for Additive Manufacturing version 2, AMSC , June 2018.
- [32] Wikipedia.
- [33] Vertebra dorsale con differente mesh. Sorgente immagine www.comsol.it
- [34] Pandey, Pulak M., N. Venkata Reddy, and Sanjay Govind Dhande. "Real time adaptive slicing for fused deposition modelling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43.1 (2003): 61-71.
- [35] Adaptive slicing. Sorgente immagine www.researchgate.net

Ringraziamenti

Giunto al termine di questo lavoro di tesi desidero ringraziare di cuore il Professor Luca Iuliano per avermi dato la possibilità di far parte di questo progetto e per aver mostrato interesse e fiducia per i miei studi.

Un particolare ringraziamento è rivolto all' Ing. Flaviana Calignano, che con pazienza, professionalità e passione ha seguito tappa per tappa il mio lavoro, rappresentando, con le sue conoscenze e i suoi insegnamenti, un supporto prezioso e imprescindibile per la stesura di questa tesi.

Un sentito grazie va, all' Ing. Roberta Sampieri per avermi dato la possibilità di svolgere parte della mia ricerca presso il reparto Prototipi di FCA e per essere sempre stata disponibile nei miei confronti.

Infine, un profondo ringraziamento va all' Arch. Stefano Paradiso per l'aiuto dato, per avermi sempre coinvolto nel contesto lavorativo e per avermi integrato fin da subito con il resto dei colleghi.