



**POLITECNICO
DI TORINO**

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA

MECCANICA

Collegio di Meccanica, Aerospaziale, Autoveicolo e della Produzione

TESI DI LAUREA

in

TECNICHE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA

**SVILUPPO DEI PARAMETRI DI PROCESSO
PER LEGA AISi7Mg CON TECNOLOGIA SLM**

Relatore accademico:

Chia. mo Prof. Ing. Luca IULIANO

Relatori aziendali:

Ing. Roberta SAMPIERI

Ing. Stefano PARADISO

Laureando:

Antonio DE FRANCESCO

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE..... | 3 |
| CAPITOLO 1 – L’ADDITIVE MANUFACTURING | 5 |
| 1.1. Le tecniche di Fabbricazione Additiva | 8 |
| 1.2. La tecnologia Selective Laser Melting..... | 15 |
| 1.3. Parametri di processo e problematiche | 18 |
| CAPITOLO 2 – MATERIALI PER L’ADDITIVE | 24 |
| 2.1. Le leghe di Alluminio | 27 |
| 2.2. La lega AlSi7Mg..... | 31 |
| CAPITOLO 3 - DESIGN OF EXPERIMENTS..... | 35 |
| 3.1. Tipologie di Piani Sperimentali | 36 |
| 3.2. Response Surface Design: Central Composite | 41 |
| CAPITOLO 4 - PRODUZIONE DEI PROVINI..... | 46 |
| 4.1. Il ciclo produttivo additive | 46 |
| 4.2. Utilizzo della EOS M290 | 52 |
| CAPITOLO 5 - ANALISI DI LABORATORIO | 62 |
| 5.1. Misura della densità | 62 |
| 5.2. Misura della durezza | 65 |
| 5.3. Prova di trazione | 70 |
| 5.4. Analisi micrografica..... | 78 |
| CAPITOLO 6 - OTTIMIZZAZIONE..... | 86 |
| 6.1. Risultati DOE..... | 86 |
| 6.2. Produzione e trazione dei provini ottimizzati | 92 |
| CONCLUSIONI..... | 94 |
| BIBLIOGRAFIA | 98 |

INTRODUZIONE

I primi anni di vita di una nuova tecnologia sono spesso scossi da forti cambiamenti. L'Additive Manufacturing (Fabbricazione Additiva - FA), metodologia di fabbricazione che si basa sull'aggiungere materiale strato per strato, piuttosto che asportarlo, passata dopo passata non fa certo eccezione a tale regola.

Nata nella metà degli anni ottanta del novecento ha subito, in questi suoi primi trent'anni di vita, drastiche evoluzioni sia in termini di processo che di materiali utilizzabili consentendo, inoltre, di definirsi non solo come tecnica di produzione di prototipi ma anche di componenti definitivi.

Il mercato concorrenziale è brutale e la richiesta di elevata qualità, brevi tempistiche di produzione ed ampia scelta di materiali sono i cardini di qualsiasi nuova tecnologia che voglia imporsi nel mercato manifatturiero. Pertanto, nonostante lo sviluppo delle tecniche di Fabbricazione Additiva i margini di miglioramento sono ancora ampi e in tal senso molto può essere ancora fatto sia in termini di materiali processabili che in termini di controllo on line del processo.

Questo è il contesto che ha spinto l'azienda Fiat Chrysler Automobiles ad investire nell'Additive Manufacturing e in particolare nello sviluppo di parametri di processo, finalizzato ad utilizzare la lega di alluminio AlSi7Mg con la tecnologia a letto di polvere Selective Laser Melting. Le motivazioni legate a questa scelta sono da ricercare nel fatto che tale lega ha la stessa composizione chimica di quella utilizzata nel casting.

Le leghe a base alluminio e silicio non sono del tutto nuove nel mondo additivo, infatti la lega AlSi10Mg è già ampiamente utilizzata, ma presenta il 3% in più di Silicio. Il grande vantaggio che, quindi, deriva dall'utilizzo dell'AlSi7Mg è quello di poter realizzare prototipi dello stesso materiale che verrà poi utilizzato nella produzione di larga scala e quindi di avere una previsione più realistica del componente finale. Si sottolinea tuttavia che si è consci che la tecnologia produttiva sarà differente e quindi le proprietà meccaniche potranno subire variazioni.

Il lavoro di tesi proposto nel corso dei prossimi capitoli si è focalizzato appunto nello sviluppo dei parametri di processo per l'utilizzo della lega AlSi7Mg.

L'intero lavoro è stato svolto presso il Centro Additive, FCA EMEA – Mirafiori Torino.

L'obiettivo principale perseguito tramite tale sviluppo di processo è stato individuare la combinazione parametrica ottimale che permettesse sia di ottenere delle proprietà meccaniche maggiori o almeno uguali a quelle possedute dai componenti prodotti tramite processi fusori che minimizzasse i tempi di produzione. Si è tenuto in conto, inoltre anche della densità dei componenti prodotti.

Al fine di adempiere a tale scopo si è creato un apposito Design of Experiments e di conseguenza si è svolta una serie di analisi di laboratorio, per caratterizzare meccanicamente i provini e quindi fornire i dati necessari al completamento del piano sperimentale.

In particolare sono state svolte attività di questo tipo:

- ✓ Misura della densità
- ✓ Determinazione della durezza Brinell;
- ✓ Prove di trazione;
- ✓ Analisi metallografica con microscopio ottico.

I risultati ottenuti hanno permesso di ultimare il DOE e di individuare, quindi, i valori di Potenza Laser, Hatch Distance e Velocità di Scansione ottimali per i fini esposti. Infine si sono ripetute le analisi sopra citate, per verificare la buona riuscita dello sviluppo parametrico.

CAPITOLO 1 – L'ADDITIVE MANUFACTURING

Con il passare degli anni, l'industria ha dovuto far fronte all'esigenza di produrre componenti di qualità sempre più elevata ed in tempi sempre più brevi. Nell'ottica di voler rispondere a queste esigenze, la tecnologia dell'Additive Manufacturing (o Fabbricazione Additiva) acquisisce un ruolo di crescente rilievo. Essa si differenzia dalle tecniche di produzione più tradizionali e maggiormente consolidate: si basa, infatti, sul principio di "addizionare" il materiale strato per strato piuttosto che rimuoverlo passata dopo passata.

Guardando alla storia di tale tecnologia, si può notare come essa sia nata nel 1984 con il nome di "Rapid Prototyping" e abbia trovato applicazione inizialmente solo nel settore dei polimeri, in quanto frequentemente i componenti realizzati con questa tipologia di materiale presentano geometrie complesse e quindi difficilmente realizzabili con le tecniche sottrattive. La società che ha brevettato tale nuova metodologia di produzione è stata la 3D System e il suo inventore è stato il Professor Charles W. Hull. Tuttavia, si dovrà attendere fino all'inizio degli anni 2000 per poter riuscire a processare, oltre che semplici polimeri, anche materiali definitivi, come ad esempio i metalli o polimeri caricati a vetro o con fibre di carbonio[1]. Questo cambiamento ha sancito la nascita dell'Additive Manufacturing per come è conosciuta oggi: una tecnica in grado di produrre anche componenti definitivi e non più solo prototipi.

È comunque importante sottolineare come ancora oggi l'applicazione principale della Fabbricazione Additiva risulti essere la realizzazione di prototipi.

In generale, durante la fase di sviluppo di un prodotto vengono realizzate diverse tipologie di prototipi, che nel dettaglio sono:

- Concettuali: essi vengono comunemente utilizzati per valutare la geometria del prodotto, verificarne il montaggio e studiarne eventuali difficoltà tecnologiche. Per la realizzazione di questa specifica tipologia di prototipo è possibile utilizzare un materiale qualsiasi e non è richiesta una tecnologia di fabbricazione specifica[1].

- Funzionali: essi hanno lo scopo di permettere la valutazione delle prestazioni del prototipo attraverso prove funzionali, consentendo pertanto l'ottimizzazione del prototipo stesso. In questi casi si preferisce utilizzare un materiale simile a quello che poi verrà effettivamente processato in larga scala, mentre la tecnologia di fabbricazione può essere differente, in quanto non considerata nell'analisi [1].
- Tecnici: essi sono utilizzati per riuscire a testare sia le prestazioni del prototipo che il suo ciclo di fabbricazione, consentendo quindi l'ottimizzazione delle tecnologie di produzione utilizzate. Il materiale deve necessariamente essere quanto più simile possibile a quello che verrà successivamente utilizzato nella produzione a regime [1].
- Pre-serie, il prodotto e il processo sono ormai quelli definitivi e si punta a sviluppare le ultime ottimizzazioni, sono ammesse solo poche modifiche marginali [1].

Per quanto detto, le varie tipologie di prototipi si distinguono per gli obiettivi specifici, il materiale e la tecnologia di fabbricazione impiegata. Ebbene, in quest'ottica la Fabbricazione Additiva (FA) è adeguata per la produzione di prototipi sia concettuali, che funzionali, poiché essi non richiedono tecnologie simili a quelle che poi verranno effettivamente utilizzate durante la produzione di larga scala. L'utilizzo della FA nella realizzazione di prototipi ha anche delle valide motivazioni economiche. In primo luogo, nel corso degli anni il numero di varianti di ciascun prodotto, presente sul mercato, è aumentato sempre di più (ad esempio, in passato il modello della Panda era unico, oggi giorno invece è possibile scegliere tra vari allestimenti: benzina, diesel, metano e gpl). Inoltre, il tempo di vita del prodotto, ovvero il periodo di tempo in cui quel determinato prodotto è presente sul mercato, sta diminuendo sempre di più; basti infatti pensare alla frequenza con cui nuovi modelli di smartphone vengono rilasciati, con il preciso obiettivo di andar a sostituire quelli già presenti in commercio. In ultima analisi è possibile constatare, che la complessità generale di ciascun prodotto è in forte crescita, mentre i suoi tempi di consegna sono decisamente più stringenti [1].

Alla luce di quanto esposto, si può notare come nel ciclo di sviluppo di un prodotto il tempo dedicato alla realizzazione del prototipo assuma un ruolo sempre maggiore, in

virtù delle necessità di eseguire test e prove sempre più accurate prima di effettuare investimenti per stampi o per una linea di produzione adeguata. Pertanto, le aziende devono essere rapide a modificarsi se vogliono sopravvivere nel mercato concorrenziale. Al contrario, tramite la Fabbricazione Additiva i tempi di realizzazione del prototipo vengono abbattuti radicalmente, consentendo quindi all'attività aziendale di non subire ritardi nella consegna o nella messa sul mercato di un determinato prodotto, il che si traduce nella libertà di fissare il prezzo della merce (infatti solitamente chi propone per primo un nuovo bene può sceglierne il prezzo senza particolari vincoli) e di avere un vantaggio temporale nel quale poter fortificare il suo Know How del prodotto, rispetto i suoi diretti competitors [1].

Come già accennato in precedenza, da qualche anno a questa parte vi è tuttavia una tendenza, da parte delle tecniche additive, ad imporsi come metodologia di fabbricazione definitiva e non più solo finalizzata alla prototipazione, ciò però risulta possibile solo per alcune tecniche. Per motivi di chiarezza si preferisce comunque fornire, di seguito, una panoramica generale su quelle che sono oggi le tecnologie additive presenti sul mercato.

1.1. Le tecniche di Fabbricazione Additiva

Si pone all'attenzione che l'obiettivo di tale paragrafo è quello di fornire il contesto generale nel quale si inserisce tale lavoro di tesi, pertanto si è scelto di:

- Trattare nel dettaglio la tecnica Selective Laser Melting (SLM) sulla quale si è svolta l'ottimizzazione multi-parametrica oggetto di questa tesi;
- Esporre solo brevemente le altre tecnologie, non direttamente oggetto del lavoro di tesi, ma comunque presenti all'interno del Centro Additive di FCA e con le quali durante il periodo di stage si è venuti contatto.

Visto e considerato le molteplici tecniche di produzione additiva oggi presenti sul mercato, si è scelto di classificarle in base al materiale di partenza e più in particolare in base allo stato (solido, liquido o polvere) dello stesso. La figura sottostante le riassume brevemente tutte. [1]

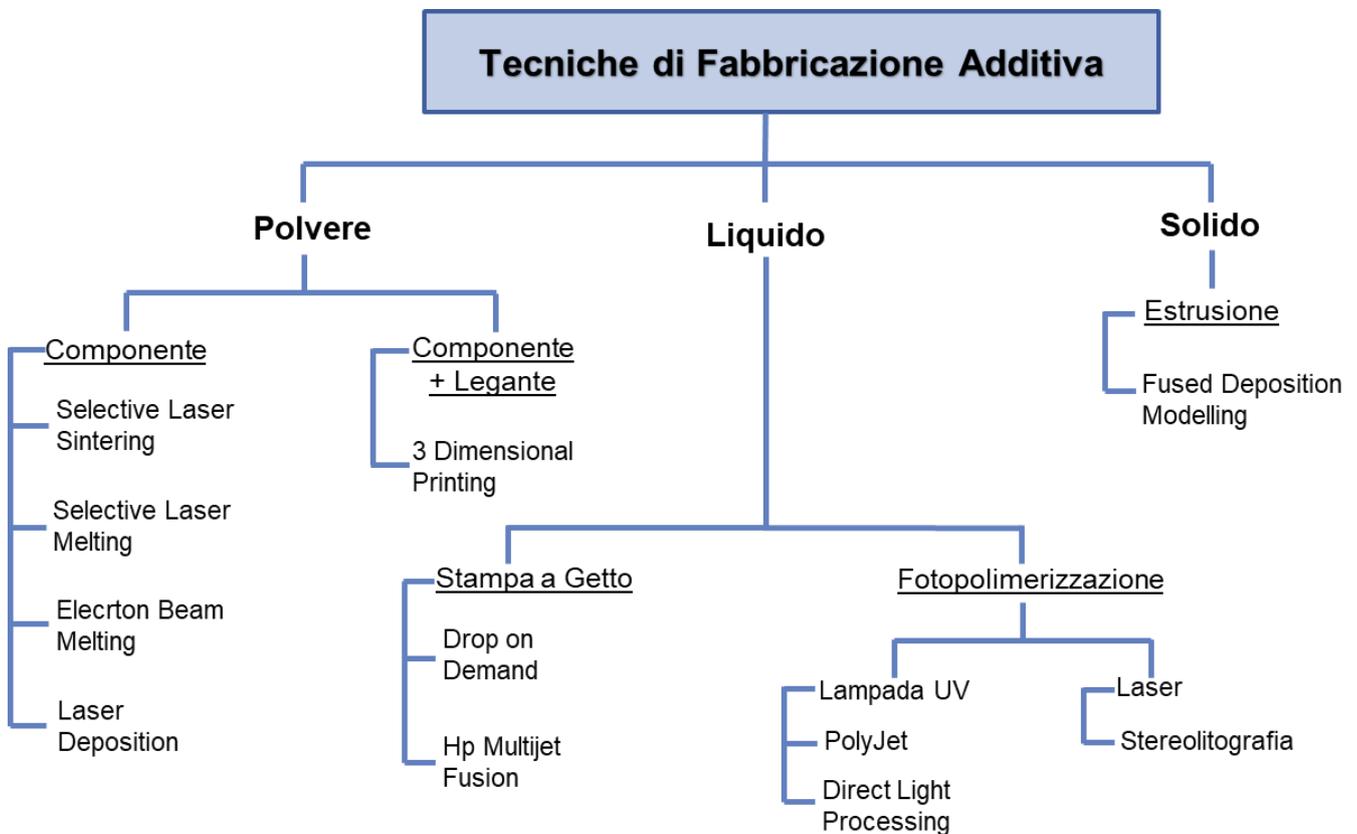


Grafico 1.1

▪ LA STEREOLOGRAFIA

La Stereolitografia (SLA) alla fine degli anni 80 è stata la prima tecnica commerciale ad apparire sul mercato e l'azienda che per prima ha sviluppato tale tecnologia è stata la 3D System (USA). È importante evidenziare come tale tecnica sia, tra tutte le tecnologie additive disponibili oggi, quella che assicura la miglior finitura estetica e la più elevata precisione dimensionale. Tuttavia a causa delle scarse proprietà meccaniche del materiale di partenza, rende il componente prodotto inadatto a subire stress termici e/o meccanici. Per tale motivo la stereolitografia consente la sola produzione di prototipi funzionali e non di componenti definitivi.

Il materiale processato, infatti, è un fotopolimero, ovvero una resina fotoindurente a base epossidica. È possibile individuare due fasi caratteristiche del processo: in primo luogo avviene l'esposizione del materiale di partenza alla sorgente laser che ne causa un indurimento parziale, ottenendo quindi la così detta: "Green Part". Successivamente invece, il semilavorato viene posizionato all'interno di un forno UV che completa la solidificazione del componente; il risultato finale viene detto "Red Part". I componenti prodotti concluderanno il loro ciclo di vita all'interno di un inceneritore [1].

La figura sottostante ne schematizza la struttura del macchinario:

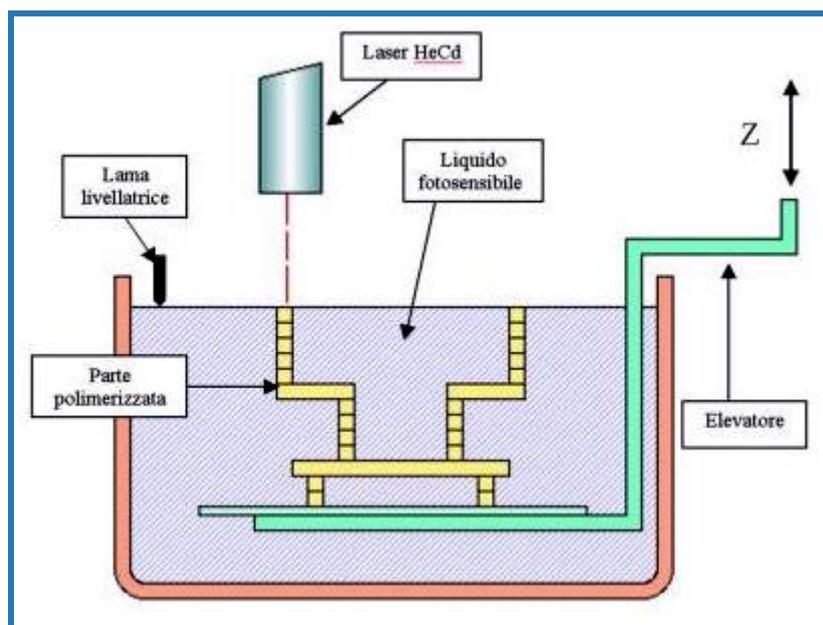


Figura 1.1

Si può osservare la vasca contenente il fotopolimero liquido e l'elevatore che è in grado di spostarsi lungo l'asse Z. Il fascio proveniente dalla sorgente laser viene focalizzato sul pelo libero mediante un sistema di specchi. Di fondamentale importanza risulta essere il sistema di livellamento del liquido che permette di avere una superficie meno increspata possibile questo impedisce che si comprometta la precisione dimensionale del macchinario. Il processo inizia con l'elevatore posizionato ad una quota ΔS al di sotto del pelo libero e solo dopo che è stato realizzato il primo strato, inizia la sua discesa verso il basso. Una volta terminata la fabbricazione, invece, l'elevatore sale e il liquido viene accuratamente evacuato tramite drenaggio, il pezzo viene staccato dalla piattaforma e ne vengono rimossi i supporti, ottenendo quindi la green part, che a questo punto completerà la sua solidificazione all'interno del forno ad UV. La green part viene collocata su una tavola girevole che è circondata da lampade UV ad elevata potenza che permettono di ultimare la sua fotopolimerizzazione. Si può asserire che in questo caso il laser ha a sola funzione di innescare l'indurimento del componente, in modo che esso possa mantenere la sua geometria anche a seguito della sua movimentazione dalla macchina di additive al forno. [1]

Si precisa infine, come la presenza dei supporti sia fondamentale con il doppio scopo di sostenere le parti sporgenti e di ancorare il pezzo alla piattaforma.

▪ FUSED DEPOSITION MODELLING

L'azienda leader del settore è l'americana Stratasys, che è appunto stata la prima ad aver brevettato la tecnologia del Fused Deposition Modelling (FDM); infatti la scadenza di tale brevetto ha portato alla diffusione delle stampati 3D a basso costo. L'FDM è una tecnica che è in grado di processare materiali termoplastici allo stato solido e uno dei suoi vantaggi principali è quello di poter differenziare il materiale del pezzo da quello dei supporti, rendendo quindi più agevole la loro rimozione, in quanto i supporti sono appunto solubili in acqua. Un aspetto negativo, invece, è la precisione finale di tale processo che non è eccellente; tuttavia si presta bene per la produzione sia di prototipi funzionali che di parti definitive o di stampi per le pre-serie. I materiali seppur, come già accennato, sono termoplastici possono essere caricati a vetro o con

fibre di carbonio, andando quindi ad innalzare le proprietà meccaniche del prodotto finale e rendendolo idoneo ad un utilizzo funzionale e non solo estetico. [1]

La figura di seguito riportata illustra la produzione di componenti con questa tecnologia.

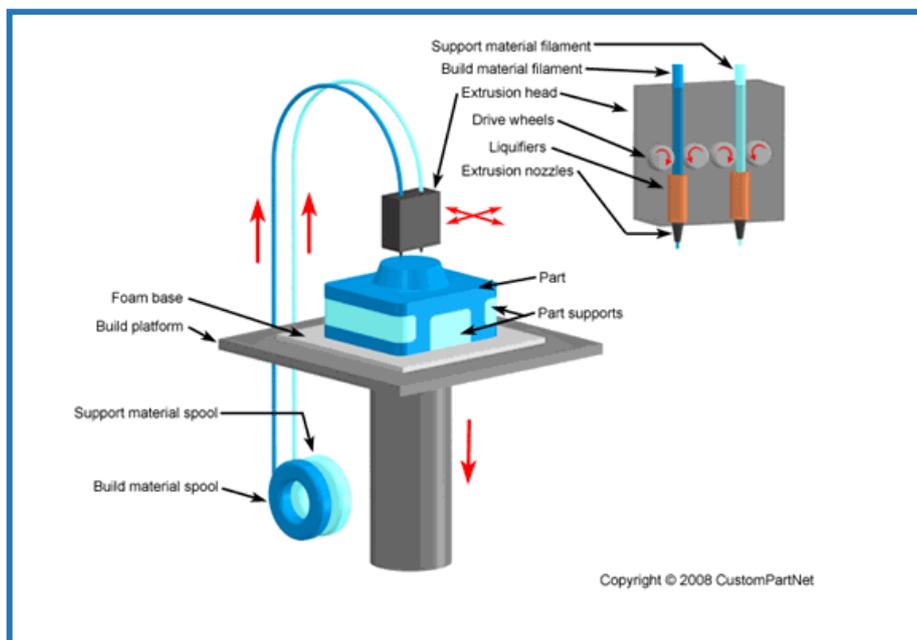


Figura 1.2

Un filamento di materiale termoplastico viene depositato, strato dopo strato, dopo essere stato riscaldato fino alla sua temperatura di transizione vetrosa ed estruso sulla piattaforma di lavoro. La piattaforma è in grado di muoversi lungo l'asse Z, mentre le testine sono libere di spostarsi nel piano XY. Il risultato finale è una tecnica piuttosto semplice, ma che al contempo richiede un sistema di controllo raffinato; questo per via dei ristretti range di temperatura a cui si deve operare, al fine di conferire al polimero la giusta fluidità. Le macchine che dispongono di un solo ugello (solitamente non si tratta di macchine professionali) presentano il limite dei supporti, ovvero: o non vengono stampati oppure sono dello stesso materiale del componente principale e quindi la loro rimozione risulta maggiormente difficoltosa e inoltre, così facendo, viene compromessa la finitura superficiale. Si ricorda che, anche in questo caso, i supporti hanno sia la funzione di separare il modello dalla piattaforma, che quella di sorreggere le sue parti a sbalzo. Tale tecnica, come le altre dal resto, non consente di avere degli spessori variabili degli strati depositati è, infatti, la dimensione stessa

dell'ugello a imporli. Si precisa, ancora, che le cartucce utilizzate sono "smart" in quanto hanno al loro interno un chip che consente di informare l'utente riguardo quanto materiale è ancora disponibile. [1]

- **SELECTIVE LASER SINTERING**

È un processo che è stato sviluppato in parallelo dall'università di Boston e dalla società tedesca EOS. La tecnica Selective Laser Sintering (SLS) basa il suo principio di funzionamento sulla fusione, tramite il laser, di polvere polimerica. Al giorno d'oggi una tecnologia di questo tipo viene utilizzata per la produzione di modelli sacrificali per la fusione a cera persa, per la prototipazione funzionale, per la produzione diretta di componenti e infine per la manifattura di forme e anime per la fusione in sabbia (tale applicazione tuttavia è sempre meno presente). [1]

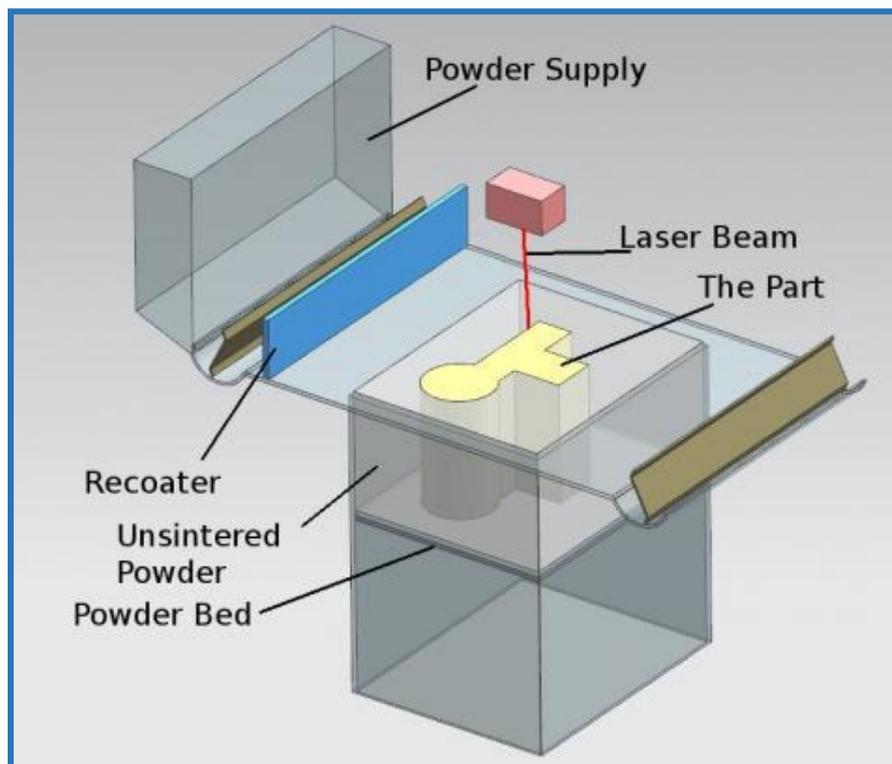


Figura 1.3

La sorgente laser è solitamente CO_2 , il laser viene focalizzato tramite un sistema di specchi sulla superficie superiore del letto di polvere; poi una volta fuso il primo strato, l'elevatore, che è l'unico elemento mobile del macchinario, si abbassa lungo la

direzione Z di un'altezza pari a ΔS . Successivamente una lama va a distribuire un nuovo strato di polvere sull'intera superficie di lavoro e il processo si ripete [1].

Una particolarità di questa tecnica è quella di non richiedere supporti, ciò è dovuto al fatto che la camera di lavoro è mantenuta ad una temperatura costante prossima a quella di fusione, che quindi causa l'addensamento della polvere consentendo alla stessa di supportare il peso del componente in costruzione, evitandone l'affondamento. Ad esempio se la temperatura di fusione del materiale processato è pari a 200°C allora la camera di lavoro verrà fissata ad una temperatura prossima ai 180°C. Per quanto detto il laser dovrà fornire al materiale solo la differenza di temperatura necessario alla fusione e non l'intero contributo termico. Per questo motivo è possibile utilizzare laser con una potenza relativamente bassa e inoltre i ritiri termici, rispetto ad altre tecniche additive, saranno decisamente contenuti. L'assenza di supporti riduce, inoltre, le operazioni di post processing e assicura una buona finitura superficiale oltre che permettere la completa saturazione del volume di lavoro, andando a costruire pezzi l'uno sopra l'altro. [1]

Si precisa, infine, che all'interno della camera di lavoro viene insufflato dell'azoto al fine di non far ossidare il componente; la macchina, infatti, è in grado di filtrare l'aria e di lasciar passare solo azoto, così da non dover necessitare di bombole. Terminato il processo, il risultato è un blocco di polvere contenente i pezzi prodotti che deve essere lasciato raffreddare in aria prima di poter estrarre i componenti, al fine di evitare possibili deformazioni degli stessi. La polvere non trattata tenderà ad invecchiare ed ingiallire a causa dell'inevitabile pick-up di ossigeno, però può essere riutilizzata se mescolata con le giuste proporzioni con polvere vergine.

▪ HP MULTIJET FUSION

Brevettata e immessa nel mercato da HP è una tecnologia che presenta sostanzialmente, molte analogie con i sistemi SLS, nei quali come già visto i componenti vengono costruiti all'interno di un cubo di materiale strato per strato, e solidificati da un raggio laser che ne fonde le molecole. In questo caso l'approccio si differisce in quanto nel MultiJet Fusion avviene la solidificazione del materiale tramite

irradiazione di calore e deposizione di agenti specifici che hanno lo scopo di favorire e/o bloccare la fusione stessa delle molecole. Il Fusing Agent, ove spruzzato, fa fondere la polvere ad una determinata temperatura, mentre il Detailing Agent la blocca, mantenendo in tal modo le geometrie dimensionalmente corrette e senza sbavature dovute dalla fusione [3]. Nell'immagine qui sotto, si riporta un esempio di come questa tecnologia funziona.

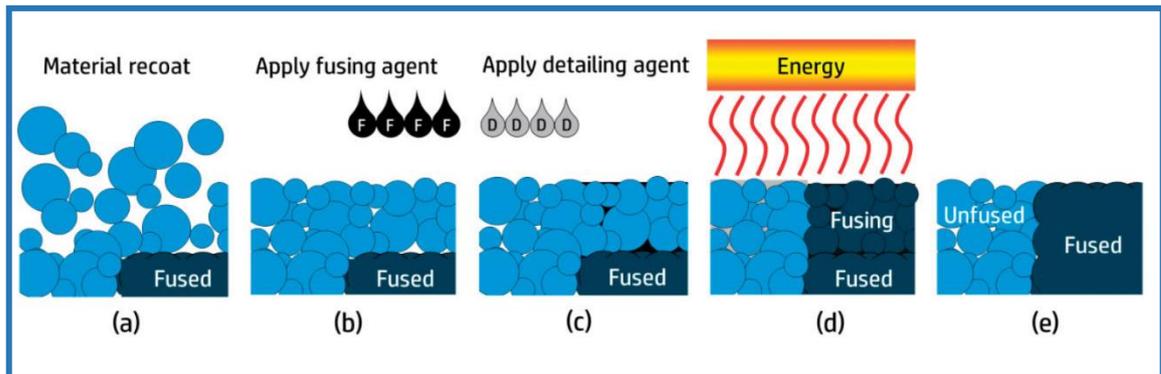


Figura 1.4 [3]

La polvere, inizialmente riscaldata dalle lampade integrate nella cover superiore, viene spruzzata dagli agenti (di fusione e di dettaglio) e successivamente viene innalzata la temperatura, tramite le lampade integrate nel blocco delle testine di stampa, fino al punto di fusione. Infine avviene la deposizione dello strato successivo di polvere, ed il ciclo continua fino a stampa completata [3].

Un interessante particolarità di tale tecnologia è la possibilità di andare a controllare, durante il processo di stampa, ogni singolo Voxel (l'equivalente del Pixel nel 2D) di ciascun strato processato. Questo è possibile grazie ad un utilizzo estremamente selettivo della potenza termica a disposizione e del rilascio degli agenti chimici. Terminato il processo di stampa si ottiene un blocco di polvere con all'interno i componenti prodotti; esso subisce un raffreddamento forzato tramite la Processing Station, che viene venduta insieme al core vero e proprio della macchina [3].

1.2. La tecnologia Selective Laser Melting

Come già esposto in precedenza, si procederà ora nell'illustrare in maniera più dettagliata la tecnologia additiva che è stata oggetto di ottimizzazione multi-parametrica, ovvero: la Selective Laser Melting.

Guardando alla storia di tale metodologia di fabbricazione, si può constatare come essa sia figlia della più antica SLS; infatti agli inizi degli anni 90 si utilizzavano particelle metalliche pre-rivestite da un legante polimerico. Il laser era, quindi, in grado di portare a fusione solamente il legante, che una volta ri-solidificato permetteva la coesione tra le particelle metalliche. In coda a tale processo, era tuttavia necessario porre il componente nel forno e eseguire un processo di infiltrazione, ovvero: il polimero a causa delle alte temperature si portava allo stato di vapore ed evacuava dal componente, lasciando quindi un'elevata porosità che veniva immediatamente riempita dall'infiltrate (solitamente si utilizzavano lingotti di Ottone). Ottenendo in fine un pezzo in materiale composito (metallo di partenza più infiltrante). Nel 1995 si è assistiti ad un'evoluzione di tale processo, infatti la polvere utilizzata non veniva più pre-rivestita, ma era costituita da un metallo alto fondente, come ad esempio il nichel e da uno basso fondente come il bronzo. Il laser, a causa della sua limitata potenza, consentiva di portare a fusione solo il bronzo, che agiva come legante per le particelle di nichel. Questa tecnica, pur non necessitando di un secondo step nel forno, non consentiva di ottenere un pezzo finale costituito da un unico materiale, bensì da uno composito. È stato necessario attendere ancora qualche anno prima di poter assistere alla comparsa, sul mercato mondiale, della tecnologia Selective Laser Melting, che offre appunto la possibilità di utilizzare una polvere costituita interamente da un unico materiale definitivo[1].

L'immagine presente alla pagina successiva, aiuta a capirne la componentistica e il funzionamento.

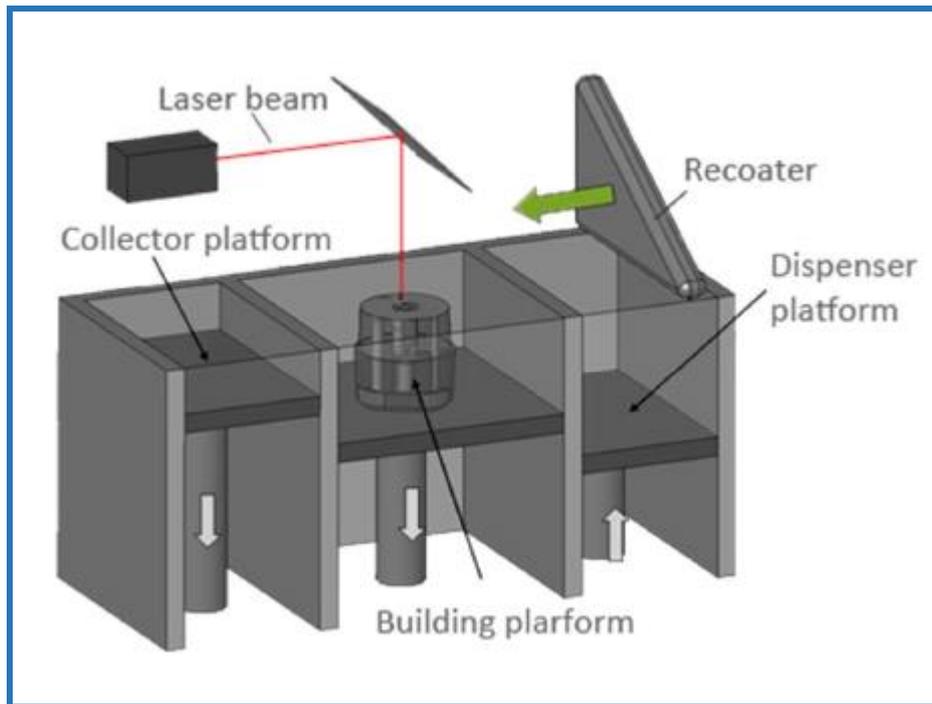


Figura 1.2. 5

L'energia termica necessaria alla fusione è fornita da una sorgente laser che sfrutta come mezzo laser attivo la CO_2 oppure un cristallo di ittrio e alluminio drogato (Nd-Yag), consentendo la fusione del letto di polvere e la rifusione di una porzione del componente in precedenza già solidificata, in modo da garantire aderenza tra gli strati. La potenza erogata varia dai 400 ai 1000 [W] e dipende sostanzialmente dal modello della macchina in esame. Il laser rimane fisso, mentre gli specchi si muovono, permettendo così di indirizzare il focus del laser nel punto desiderato. Idealmente il laser dovrebbe incidere a 90° sulla superficie di lavoro, ma nella realtà tale condizione di funzionamento non è sempre rispettata, in particolar modo agli estremi del pezzo[1].

Come si può notare dall'immagine sovrastante, vi sono tre pistoni, ognuno dei quali è in grado di muoversi lungo l'asse Z. I due pistoni laterali sono adibiti allo stoccaggio della polvere vergine e di quella in eccesso. Il processo ha inizio con lo spostamento verso l'alto del pistone a destra (rispetto alla rappresentazione in figura 1.5); tale movimento crea un accumulo di polvere vergine sulla superficie, che viene successivamente stesa sulla piattaforma di lavoro dalla racla o da un rullo a seconda dell'azienda produttrice. Tutta la polvere in eccesso viene, invece, recuperata nel contenitore posto a sinistra. Una volta che lo strato di materiale nuovo è stato steso, il laser provvede a fondere la sezione prevista per quello strato e una volta ultimata la fusione, l'elevatore centrale si abbassa di una quantità pari a ΔS e il processo si ripete.

Per quanto è stato illustrato è possibile asserire che tale tipologia di macchina è ad un solo asse z; pertanto dal punto di vista meccanico l'unico componente soggetto ad usura è l'elevatore (e in parte il rullo o la lama della racla). Solitamente si lavora in atmosfera inerte e in condizione di vuoto (non molto spinto). L'assenza di ossigeno fa sì che non vi sia ossidazione del pezzo, infatti il pick-up di ossigeno di un materiale aumenta con la temperatura dello stesso. È frequente l'utilizzo di Argon o Elio, soprattutto nel caso in cui il materiale processato sia particolarmente reattivo. Il tempo necessario per la fusione e la successiva solidificazione è dell'ordine dei millisecondi, ciò garantisce la formazione di grani cristallini particolarmente fini che si traducono in elevate caratteristiche meccaniche e metallurgiche, solitamente migliori di quelle ottenute con metodi tradizionali [1]. Si pone all'attenzione del lettore che i forti gradienti termici e i conseguenti ritiri a cui il pezzo è soggetto durante il raffreddamento, inducono nella parte già solidificato del componente delle dilatazioni e contrazioni termiche cicliche che spesso superano la massima deformazione elastica del materiale. L'accumulo di tali deformazioni genera tensioni interne. Per tali ragioni si vede spesso necessario dover effettuare un trattamento termico al fine di ridurre la presenza delle tensioni e aumentare le dimensioni dei grani, spostando il comportamento del componente da fragile a duttile (l'intensità di tale cambiamento dipende dal tipo di trattamento termico che si decide di effettuare).

Nel descrivere la tecnologia SLM si ritiene doveroso far riferimento anche all'importanza che i supporti hanno all'interno di tale processo. Ebbene: essi permettono di sorreggere le parti sporgenti del pezzo ed inoltre facilitano lo scambio termico verso la piastra. Tale elemento grazie alla sua natura massiva e quindi ad un coefficiente di scambio termico maggiore rispetto a quello caratterizzante un blocco di polvere metallica è in grado di smaltire più velocemente il calore rispetto ad esso, scongiurando pertanto il rischio di tensioni residue. Bisogna tuttavia, tener conto che maggiore sarà il numero di supporti che si sceglie di utilizzare all'interno di un job, più elevato risulterà essere il costo del componente. Si ricorda infatti, che i supporti rappresentano uno scarto di lavorazione e non vi è modo di poterli riutilizzare.

Ulteriore conseguenza, di un numero di supporti eccessivo, è una fase di post-processing più lunga, durante la quale si procede con la rimozione degli stessi e con

un perfezionamento della superficie su cui essi erano ancorati. La generazione di più o meno strutture di questo tipo, dipende principalmente dalla geometria del componente e da come esso viene posizionato in macchina, solitamente in sede di progettazione si tende a creare componenti auto supportanti.

1.3. Parametri di processo e problematiche

Come sottolineato più volte nel corso di questa trattazione, l'obiettivo principale di tale lavoro di tesi è stato quello di andare a individuare quale fosse la combinazione dei parametri di processo, che permettesse di processare al meglio la lega di alluminio AlSi7Mg. In quest'ottica, si ritiene quindi doveroso presentare nel corso di questo paragrafo i parametri macchina ritenuti più influenti all'interno di un processo di produzione Selective Laser Melting.

Visto e considerato l'elevato numero dei parametri di processo che è possibile stabilire durante ciascuna stampa, si preferisce in prima battuta raggrupparli in due macro categorie: quelli direttamente inerenti con il laser (la potenza e il diametro dello spot) e quelli che permettono di stabilire la strategia di scansione che si vuole utilizzare, come ad esempio: la velocità, la distanza tra due tracce e il percorso che viene seguito dal laser durante la fusione. Ovviamente vi sono molte altre variabili fisiche che contribuiscono alla buona riuscita della stampa, a titolo di esempio si riportano: la tipologia e il numero di supporti, l'orientamento del pezzo sulla piastra, la composizione del gas presente nel volume di stampa e la scelta di preriscaldare o meno la superficie. Per quanto esposto, è facile intuire quanto possa essere complesso riuscire a quantificare con precisione il contributo che ha ciascun parametro sul risultato finale; tuttavia in tal senso viene in aiuto un fattore denominato Fluenza (E_v), la cui espressione viene proposta qui di seguito:

$$E_v = \frac{P}{v_s \cdot h \cdot t}$$

Formula 1.3. 1

Dove:

- P è la Potenza erogata dal laser ed è espressa in W;

- v_s è la velocità di scansione e viene espressa in mm/s ;
- h è il così denominato Hatch Distance, ovvero la distanza che vi è tra due passate consecutive del laser e la sua unità di misura sono i mm ;
- t è lo spessore di ciascuno layer processato in mm .

Attraverso la valutazione di tale fattore è possibile quindi avere un riferimento sull'energia per unità di volume che si sta effettivamente trasmettendo al materiale, permettendo quindi un rapido confronto tra settaggi differenti. Si precisa, infine, che il valore risultante può essere utilizzato come strumento per una prima analisi, se poi si vuole andare a valutare dettagliatamente l'effetto di ciascun parametro sono necessarie analisi più approfondite.

Per quanto concerne il progetto di tesi si è concordato con il referente aziendale di FCA di perseguire l'ottimizzazione dei seguenti 3 parametri: Potenza Laser, Hatch Distance e Velocità di Scansione. Il motivo di tale scelta è da ricercare nell'esperienza maturata nel settore, che ha evidenziato come essi risultino essere quelli maggiormente influenti nel processo. Si procede quindi con la loro descrizione:

- Potenza Laser

Essa condiziona fortemente la densità posseduta dal componente finale. Infatti, a parità di altri parametri, all'aumentare della Potenza Laser (PL) la densità cresce fino ad un valore limite, oltre il quale non è più possibile andare. Tale valore massimo è determinato sia dall'instaurarsi del fenomeno di Balling (di cui si tratterà più nello specifico più avanti) sia dalla formazione di porosità residue, causate dall'assorbimento di gas all'interno della pozza fusa. In generale è bene notare che l'utilizzo di potenze eccessivamente basse non consente al calore di penetrare in profondità e di rifondere lo strato sottostante, ciò si traduce in una scarsa adesione tra due layer sovrapposti. Inoltre basse potenze, determinano inevitabilmente basse temperature e a risentirne in questo caso è la viscosità del liquido. Inoltre, se il metallo fuso non possiede una determinata fluidità la bagnabilità dello strato precedente sarà fortemente compromessa e il liquido non riuscendo a penetrare all'interno dei vuoti determinerà una porosità elevata [12].

- Velocità di Scansione

La variazione della Velocità di Scansione (VS) genera degli effetti diametralmente opposti a quelli visti con la PL. Infatti a parità degli altri parametri se si aumenta la VS, si diminuisce il tempo di contatto tra il fascio laser e il materiale. Di conseguenza le temperature raggiunte saranno ovviamente più basse causando tutta quella serie di problematiche sopraesposte. [12]

- Hatch Distance

Le conseguenze dovute alla variazione della distanza tra due tracce del laser risulta essere abbastanza intuitiva. Infatti se essa aumenta eccessivamente si può incorrere nella mancata sovrapposizione di due percorsi adiacenti, con conseguente presenza di materiale non fuso. In base alla geometria del componente la porzione di polvere presente tra due cordoni fusi subirà solo un'alterazione termica e non una vera e propria fusione, compromettendo la densità finale del pezzo. Andando ad escludere tale situazione particolarmente critica, in generale si utilizza preferisce utilizzare un overlapping compreso tra il 10 e il 50%, non ha molto senso superare tale estremo superiore in quanto non si apprezza una variazione di densità. [12]

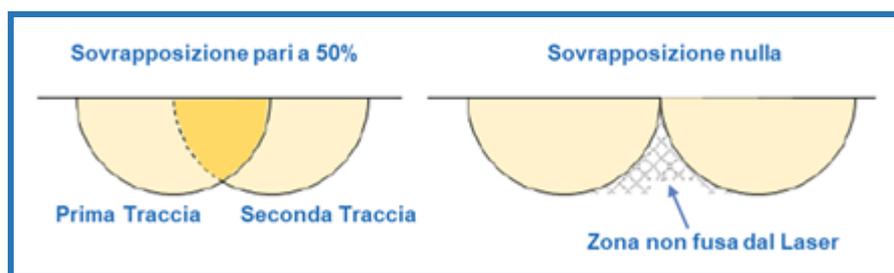


Figura 1.3 6 [16]

Un'errata scelta dei parametri di processo oltre a compromettere la densità del componente finale, può causare tutta una serie di problematiche che in alcuni casi possono richiedere l'interruzione del lancio. Ciò causerà certamente uno spreco di risorse e di tempo ma perlomeno salvaguarderà l'integrità dei vari componenti del

macchinario. Si ricorda, infine, che una volta avviato il processo non è più consentita alcuna modifica dei parametri.

Di seguito, vengono quindi descritte alcune delle problematiche che possono verificarsi durante il processo, alcune di esse sono figlie di una non corretta scelta di parametri.

- Vibrazione della racla

Nel momento in cui le tensioni interne al materiale si accumulano a tal punto da superare le forze di coesione tra due strati sovrapposti, si può assistere all'innalzamento del materiale solidificato con conseguente interferenza con la racla. Tale problematica si ripercuote in maniera netta sulla qualità del componente, infatti: l'urto tra la racla e materiale solidificato genera un'usura anomala della lama che quindi necessiterà manutenzione straordinaria e inoltre pone la stessa in vibrazione. La vibrazione così innescata non consente una stesura omogenea dello strato di polvere, bensì sarà possibile apprezzare sul letto delle bande con materiale in eccesso alternate a bande con materiale mancante. Pertanto, quando il laser andrà a fondere una superficie di questo tipo si andranno a generare pozze di fusione con più o meno materiale, compromettendo allo stesso tempo sia l'aderenza con lo strato precedente sia il corretto spessore di quel determinato layer. Tale fenomeno è principalmente causato da una non appropriata scelta dei parametri di processo.

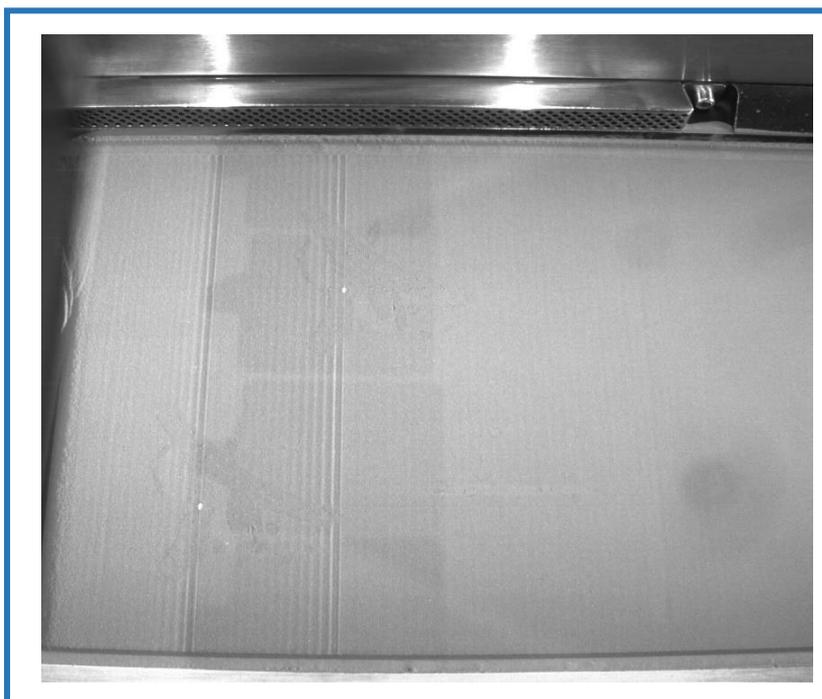


Figura 1.7

- Crepe

Se il livello delle deformazioni plastiche è maggiore della resistenza del materiale, si avrà la comparsa di crepe durante il processo di costruzione e di conseguenza la durata a fatica del pezzo sarà fortemente compromessa. Possono essere molteplici le cause che generano questa tipologia di difetti come ad esempio: attivare o meno il preriscaldamento della piastra di lavoro, il settaggio dei parametri di processo, la presenza di vuoti già all'interno della polvere vergine (particelle cave).

- Porosità

Partendo dal presupposto che maggiore è la percentuale di vuoti all'interno del componente finale, peggiori saranno le sue proprietà termo-meccaniche. Si sottolinea come i trattamenti termici possano, in quest'ottica, aiutare a spostarsi da questa situazione indesiderata, ma non sono comunque in grado di risolvere completamente il problema. Cause principali di tale fenomeno sono da ricercare in una combinazione di parametri non accurata per quel determinato materiale. Si evidenzia, tuttavia, come il problema della porosità possa anche essere generato da una errata evacuazione dei fumi di fusione del metallo. Essi se non adeguatamente allontanati dalla pozza fusa potrebbero disciogliersi nel bagno. A tal proposito si presenta, a titolo d'esempio, il brevetto sviluppato dalla casa produttrice tedesca EOS per ovviare a una problematica di questo genere, ovvero: la direzione di avanzamento del laser è opposta a quella del flusso di gas inerte che viene insufflato in camera, con il preciso scopo di allontanare i fumi di fusione dal metallo liquido[1].

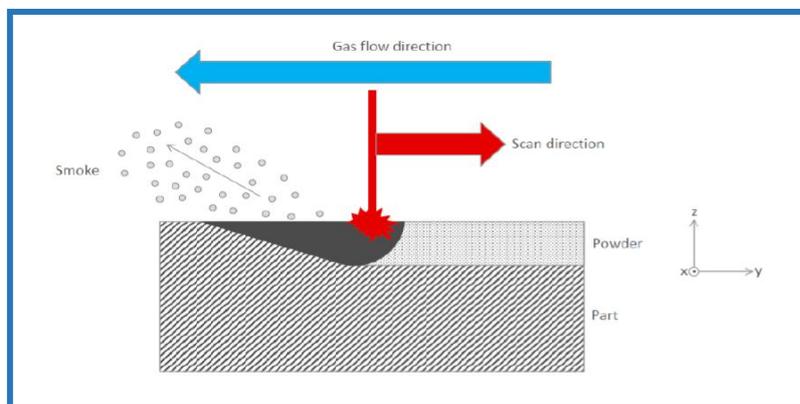


Figura 1.8

- Balling

Durante il laser melting, il percorso del laser consiste in una successione di tracce rettilinee. Il balling è un fenomeno che si verifica a seguito della diminuzione dell'energia superficiale della traccia fusa, quando la fase liquida si suddivide in gocce sferiche dal diametro approssimativamente pari alla dimensione del fascio stesso. Pertanto, durante il processo, il balling impedisce la deposizione uniforme della polvere sullo strato successivo e tende a causare porosità e delaminazione, quest'ultima causata dal debole legame interstrato e dagli stress termici. Questo fenomeno è un processo metallurgico complesso che dipende sia dalle proprietà della polvere che dalle condizioni del processo laser [4].

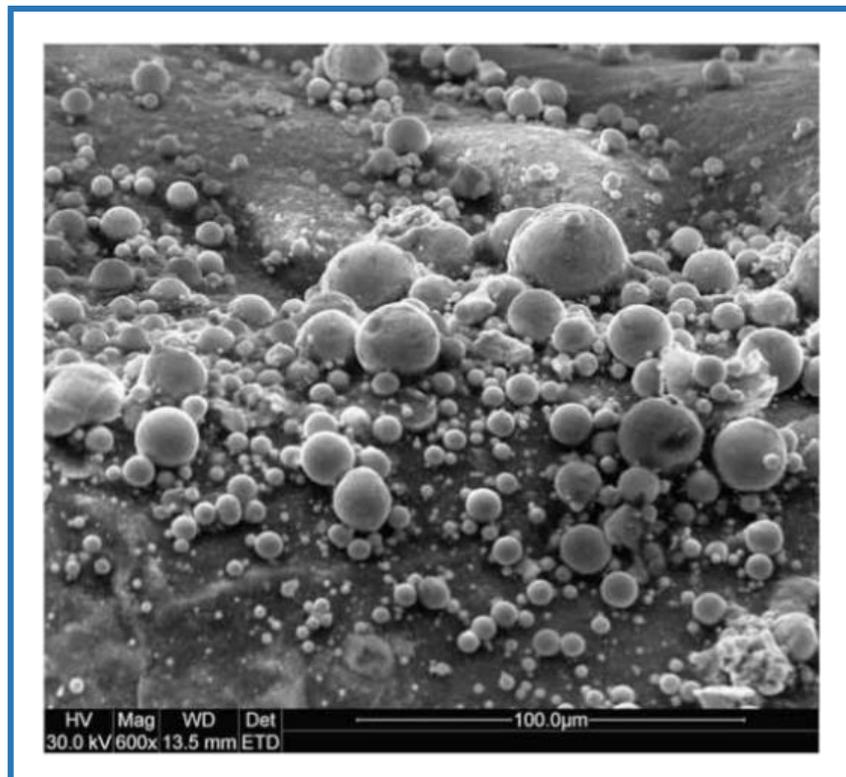


Figura 1.9 [4]

CAPITOLO 2 – MATERIALI PER L'ADDITIVE

Visto e considerato che la protagonista, del lavoro di ricerca e sviluppo svolto, è stata una lega di Alluminio, si ritiene necessario presentare una panoramica che descriva qual è lo stato dell'arte dei materiali utilizzati in ambito additive manufacturing e come la loro natura vada ad influire sulle prestazioni del componente prodotto. Riservando, infine, un focus particolare alle leghe di alluminio e quindi all'AlSi7Mg.

Ebbene è importante chiarire come i materiali hanno visto storicamente un impatto molto diverso nelle varie tecnologie di fabbricazione additiva: le prime macchine (intorno al 2005), infatti, erano in grado di gestire solo pochi materiali. Da qui però l'evoluzione è stata sempre più veloce e rapida. I primi metalli processati sono stati quelli che presentavano un'inerzia chimica nei confronti dei processi di ossidazione, maggiore rispetto alla media, come ad esempio alcuni tipi di acciaio inossidabili e alcune leghe particolari di bronzo. Inizialmente si avevano grosse difficoltà ad utilizzare sia le leghe di metallo che quelle di alluminio, mentre per quanto riguarda quelle di Nichel il vero limite era costituito dalla richiesta di potenze laser elevate. Tale situazione è rimasta pressoché invariata sino al 2008, anno in cui sono stati ideati dei sistemi in grado di far avvenire l'intero processo in un'atmosfera controllata e povera di ossigeno. Per quanto riguarda la storia dei materiali polimerici, invece, essa ha visto una forte evoluzione nella gestione sempre più accurata dei processi di fotopolimerizzazione. Di fondamentale importanza è risultata la comprensione degli effetti ottenibili andando ad aggiungere alcune tipologie di additivi alla resina liquida costituita da monomeri; ciò consentiva di facilitare le reazioni di polimerizzazione e di aggregazione dei monomeri in presenza di radiazioni ultraviolette [2].

Si riporta nella pagina seguente uno schema che riassume le tipologie di materiali oggi disponibili:

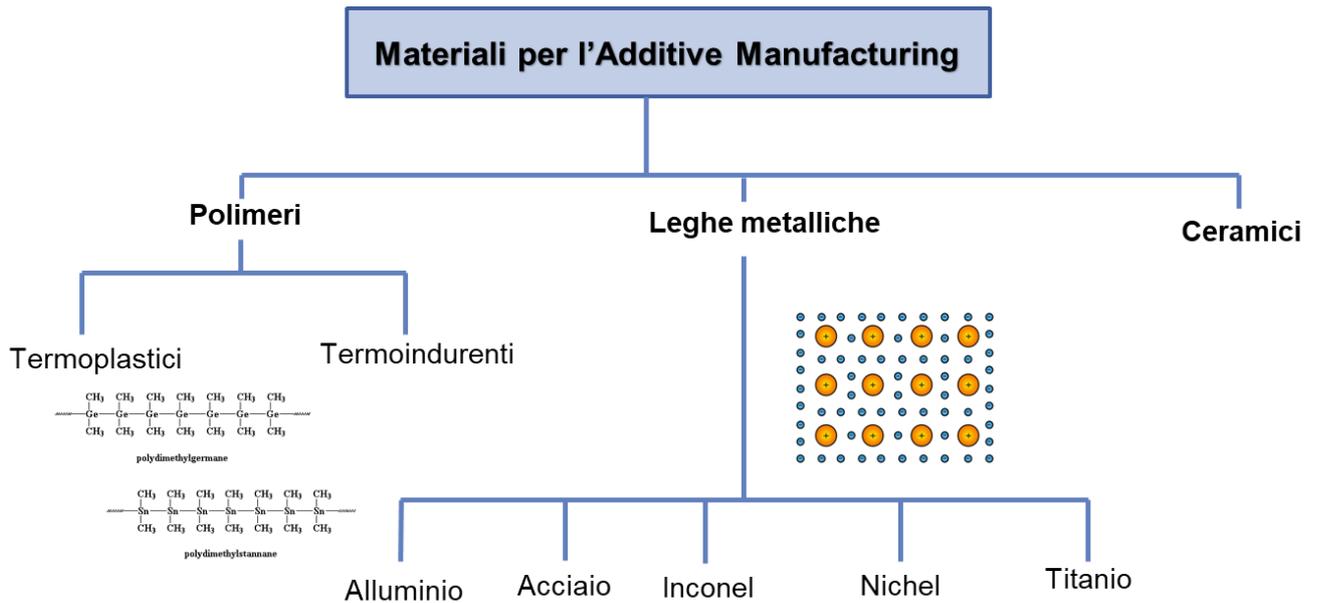


Grafico 2.1

Si vuole ora di illustrare come le caratteristiche intrinseche di ciascun materiale possano portare alla generazione di difetti e quali accorgimenti richiedono per essere processati.

Come già accennato nel corso della trattazione, durante il processo di Selective Laser Melting il materiale subisce un riscaldamento a temperature maggiori di quelle di fusione e successivamente un rapido raffreddamento (il tutto avviene in un lasso di tempo dell'ordine del millisecondo). È facile intuire, che un evento di questo genere vada a creare delle tensioni residue che sono proporzionali alla dimensione del pezzo e al coefficiente di conducibilità termica α , in particolare: maggiori sono le dimensioni del pezzo e maggiore sarà la contrazione che esso subisce, con il risultato che le tensioni residue raggiungeranno valori elevati. La gestione di questo problema è estremamente complicata ed è proporzionale ad alcuni parametri del materiale. A tal proposito, si riporta qui di seguito la Legge di Hook, a beneficio della comprensione del lettore:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Dove:

- σ è la tensione
- E è il modulo di elasticità longitudinale di Young

- ε è la deformazione ed è definita come il rapporto tra l'allungamento subito dal materiale rispetto alla lunghezza iniziale dello stesso, ovvero: $\Delta l = \frac{l-l_0}{l_0}$

Ebbene facendo riferimento alla relazione appena scritta si può dedurre che: tanto più il materiale è rigido, ovvero modulo di Young elevato, tanto più la deformazione causata dalla variazione di temperatura sarà importante e di conseguenza si avrà anche una σ elevata. Il problema di avere un ingente valore di tensione è che se essa supera quella di rottura del materiale si assisterà alla formazione di cricche. Si fa notare che a parità di ε , la σ è direttamente proporzionale ad E; risulta quindi importante riuscire a gestire in maniera accurata materiali particolarmente rigidi. Al fine di limitare questo fenomeno in alcuni sistemi di produzione additivi è stata implementata la camera di lavoro riscaldata, che consente di ridurre i gradienti termici. Purtroppo però, questo accorgimento è utilizzato solamente nella tecnologie che sfruttano come sorgente di energia un fascio elettronico (EBM) e non laser (SLM). Per quest'ultima tipologia, l'unica soluzione al problema delle tensioni residue dannose risulta essere l'utilizzo di una piastra di costruzione riscaldabile e di un'accurata scelta progettuale sia della geometria che dell'orientamento del pezzo in macchina. In linea generale si tende a inclinare il componente, in modo da minimizzare le tensioni residue nelle zone più sollecitate [2].

Risulta, pertanto, chiaro che il materiale costituente un componente, e il modo in cui esso viene processato ne determinano il mondo netto le caratteristiche; si elencano di seguito, in maniera più dettagliata, in quali fasi del processo di fabbricazione additiva i materiali incidono maggiormente.

- Progettazione: la scelta del materiale viene effettuata sulla base delle caratteristiche termo-meccaniche che deve possedere il componente finale [2].
- Produzione di materie prime: la tendenza è quella di avere materiali specifici per ogni campo applicativo ciò si traduce nello sviluppo, nella caratterizzazione e certificazione di nuovi materiali [2].
- Gestione del processo: il settaggio dei parametri del processo è estremamente correlato al materiale presente in macchina [2].

- Post Processing: i trattamenti e le modalità con cui essi vengono effettuati servono per customizzare il grano cristallino, per valutare la stabilità della composizione chimica e per verificare le proprietà del componente [2].
- Riciclo e riuso delle materie prime: temi come la riciclabilità delle materie prime e della sostenibilità ambientale sia del processo che del prodotto sono determinate dalla tipologia di materiale utilizzato [2].

2.1. Le leghe di Alluminio

Solitamente all'interno del mondo additive, l'alluminio è largamente utilizzato all'interno di leghe leggere e l'unica reale alternativa a tale materiale è rappresentata dal Magnesio. Tuttavia, il Magnesio non gode della stessa diffusione d'utilizzo, in quanto le sue polveri risultano essere particolarmente pericolose, poiché, tendono ad innescare facilmente principi di combustione. L'alluminio, d'altra parte, risulta essere sicuramente più stabile come materiale, ma ciò non esula dall'assumere precauzioni. I processi alluminio-termici sono particolarmente esotermici e di facile innesco a causa di un elevato rapporto superficie volume. Generalmente il materiale viene stoccato all'interno di contenitori antistatici al fine di evitare che scocchino scintille indesiderate. Un altro rischio d'utilizzo è rappresentato dalla possibilità di reazione con H_2O , che darebbe origine a ingenti quantitativi di idrogeno: esso se in presenza di una fonte di innesco può causare reazioni esplosive, soprattutto in ambienti chiusi. Inoltre tale gas, se mescolato con aria ambiente, richiede un'energia di innesco molto bassa (circa 1/10 rispetto a quella necessaria per attivare il GPL, che corrisponde a quella di un scintilla generata dall'urto tra una particella di polvere e un oggetto metallico). Pertanto, uno dei problemi tipici nella gestione degli impianti additive manufacturing che lavorano con l'alluminio è la gestione dei filtri delle macchine, che vanno ripuliti periodicamente; nel ripulirli è bene evitare di mettere in acqua il filtro perché l'atmosfera sovrastante il liquido potrebbe saturarsi con idrogeno, trasformandosi appunto in una miscela esplosiva [2].

Si riportano quindi le proprietà dell'alluminio:

| Caratteristiche Alluminio | |
|---|---------|
| Numero atomico | 317 |
| Peso atomico [kg/kmol] | 26,9815 |
| Densità @ 20°C [kg/dm³] | 2,6989 |
| Temperatura di fusione [°C] | 660,32 |
| Temperatura di ebollizione [°C] | 2450 |
| Calore specifico [kJ/kg*k] | 93,9 |
| Calore latente di fusione [kJ/kg] | 394,5 |
| Resistenza elettrica @ 20°C [nOm] | 28,2 |

Tabella 2.1

L'alluminio possiede una buona resistenza alla corrosione a fronte di una bassa densità che determina anche un alto rapporto resistenza/peso. Grazie a tali proprietà, l'alluminio è un materiale economico e strutturalmente efficace. La sua conduttività sia termica che elettrica particolarmente elevata (circa tre volte superiore all'acciaio) lo rendono adatto ad essere utilizzato per la produzione sia di scambiatori di calore che di contatti elettrici. È interessante, inoltre, osservare che il punto di ebollizione è di 2450°C; esso rappresenta la temperatura a cui la tensione di vapore del materiale è equivalente alla pressione esterna. Pertanto, molto prima di raggiungere questa temperatura si avranno importanti quantitativi di materiale che nel passaggio allo stato di vapore, vincono la tensione e abbandonano il liquido. Durante il processo di Selective Laser Melting si raggiungono facilmente i 2000°C, quindi temperature coerenti con l'innesco di tale processo. Tuttavia questo fenomeno di sproporzionamento della lega è maggiormente accentuato nei processi EBM in quanto si lavora in condizione di vuoto piuttosto spinto e quindi è richiesta ancora meno energia alle particelle vapore per allontanarsi dalla pozza di fusione [2].

Aggiungendo elementi di lega è possibile andare a personalizzare e a migliorare le proprietà dell'alluminio. Sono molteplici gli elementi di lega che possono essere aggiunti per innalzare le caratteristiche meccaniche oppure per rendere il materiale più malleabile in fase di formatura. È tuttavia possibile classificare le leghe di alluminio in due categorie: quella da colata e quelle da deformazione plastica. Tali leghe originano delle microstrutture differenti. Per quanto concerne la fabbricazione additiva si utilizzano solitamente quella da colata, mentre le seconde possono essere processate con tecniche additive solo se opportunamente alligate con il Silicio [2]. Le leghe di Al possono anche essere distinte tra quelle che consentono i trattamenti termici e quelle che invece no. In generale è più frequente che le leghe da colata permettano anche di effettuare trattamento termici. Si precisa che nelle leghe da deformazione plastica i trattamenti termici sono comunque utilizzati per omogeneizzare i grani cristallini, a meno che il pezzo non sia stato deformato con il preciso scopo di aumentare la σ_y diminuendo la mobilità delle dislocazioni all'interno del grano cristallino.

Nella seguente enumerazione si è scelto di riassumere i vantaggi che portano i vari elementi di lega, si precisa che tali considerazioni sono di carattere generale, quindi non legate esclusivamente al mondo della fabbricazione additiva. Le percentuali riportate rappresentano il quantitativo massimo dell'elemento di lega utilizzato; esse dipendono o dalla posizione del punto eutettico all'interno del diagramma di stato alluminio-elemento di lega o dal limite di solubilità dell'elemento di lega. Questo perché il rafforzamento per precipitazione viene effettuato nell'area di interregno tra l'esistenza della soluzione solida α e l'altro elemento. Ad alta temperatura, infatti, i due elementi fanno parte di una sola unica fase, mentre a basse temperatura si ha una zona bifasica.

- Rame (fino al 6.5%)

Aumenta la resistenza a trazione e a fatica, la durezza della lega a causa della parziale solubilità allo stato solido che può dar luogo a precipitazioni di seconde fasi coerenti o incoerenti. Consente di aumentare la tenacità della lega tramite trattamento termico e di invecchiamento. Diminuisce la duttilità e la resistenza alla corrosione [5].

- Magnesio (fino al 10%)
 Rinforza e indurisce la lega tramite indurimento per soluzione solida senza però una sostanziale diminuzione di duttilità. Incrementa sostanzialmente la saldabilità della lega e la resistenza alla corrosione. Se combinato con il Silicio o lo Zinco permette un indurimento per precipitazione del soluto a seguito di un trattamento termico con elevate velocità di raffreddamento [2].

- Silicio (fino al 17%)
 Migliora la colabilità della lega grazie ad una migliore fluidità della stessa e ad un minor ritiro termico. Migliora sia la resistenza meccanica che quella all'abrasione. Diminuisce il coefficiente di dilatazione termica riducendo i problemi legati allo shrinkage. Il silicio combinato con il magnesio consente un indurimento per precipitazione del soluto a valle del trattamento termico [2].

- Manganese (fino al 1,5%)
 Permette aumentare la resistenza meccanica delle leghe mediante indurimento per soluzione solida e per dispersione dei precipitati di manganese. Accresce la resistenza a fatica. Se la lega di alluminio contiene anche del ferro e silicio viene migliorata la duttilità, grazie alla struttura cubica dell'intermetallico Al_5FeSi . Il manganese ha tuttavia una solubilità molto ridotta nell'alluminio[2].

- Zinco (fino al 8%)
 È l'elemento tra questi con la maggior solubilità nell'alluminio. Se combinato con magnesio oppure con una lega di magnesio e rame consente di aumentare la resistenza meccanica per precipitazione del soluto a seguito del trattamento termico. Tuttavia, aumenta la vulnerabilità della lega alla frattura causata dalla corrosione del materiale [2].

- Ferro (fino al 1,1%)

Grazie alla formazione degli intermetalli Al-Fe migliora la resistenza meccanica, ma peggiora la duttilità, si precisa inoltre che nella maggior parte delle leghe di alluminio il ferro è visto come un'impurità indesiderata [2].

2.2. La lega AlSi7Mg

La lega AlSi7Mg utilizzata nei processi di fabbricazione additiva risulta avere la stessa composizione chimica di quella già ampiamente utilizzata nei processi di colata. Questa motivazione unita all'esplicita richiesta di alcuni clienti di FCA di avere componenti realizzati con la suddetta lega, hanno spinto il Centro Additive dello stabilimento Prototypes ad investire nello sviluppo dei parametri di processo della EOS M290 per l'AlSi7Mg. Tale sviluppo consente, pertanto, in fase prototipale di poter realizzare prototipi dello stesso materiale che poi verrà sfruttato nella produzione di larga scala e quindi di avere una previsione più realistica di quello che sarà il componente finale. Si sottolinea tuttavia che si è consci che la tecnologia produttiva sarà differente e quindi le proprietà meccaniche potranno subire variazioni.

Si presenta qui di seguito la composizione chimica dell'AlSi7Mg

| Elemento | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | Al |
|----------|-------------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|----------|
| Peso % | 6,50 - 7,50 | < 0,20 | < 0,05 | < 0,10 | 0,45 - 0,70 | < 0,10 | < 0,25 | restante |

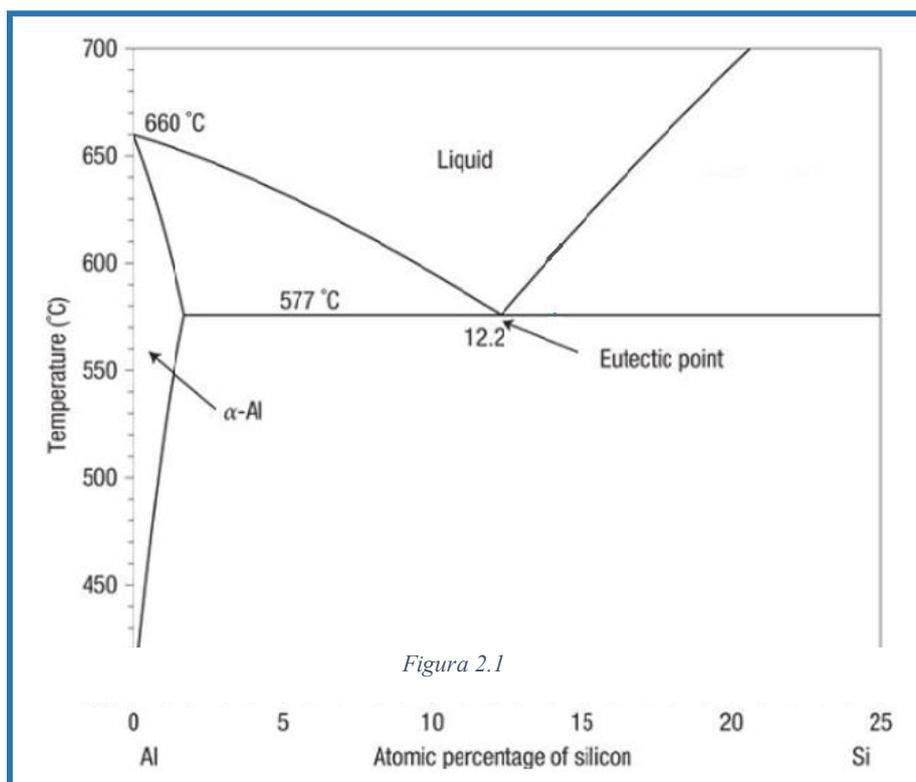
Tabella 2.1

È possibile notare come sia accettata una variazione di magnesio abbastanza importante. Zinco e titanio sono elementi presenti solo in tracce perché probabilmente già presenti nel sistema in cui si produce, sono quindi accettate dai clienti che acquistano tale lega ma non hanno alcuna finalità prestazionale.

Dal diagramma di stato Alluminio-Silicio, proposto alla pagina seguente, è possibile osservare che il 7% di silicio si colloca abbondantemente oltre il limite di solubilità del silicio nell'alluminio. L'alluminio forma una lega eutettica con il 12.2% di Silicio

alla temperatura di solidificazione di 577°C, per cui AlSi7Mg risulta essere ipoeutettica. In generale comunque, è la velocità di raffreddamento a giocare un ruolo di primaria importanza nella definizione della struttura delle leghe prossime all'eutettico. Se esso è rapido viene favorita la formazione di Si primario mentre si otterrà Si eutettico tramite un raffreddamento più lento. Un ulteriore aspetto da prendere in considerazione è la considerevole differenza in termini di coefficiente di dilatazione termica tra Si e Al, che può causare l'insorgere di cricche interne se sottoposta a stress termici. Si ricorda, inoltre, come il Silicio assicuri una eccellente colabilità o fluidità, un'alta resistenza alla corrosione, una buona saldabilità, una diminuzione del peso specifico e una riduzione del coefficiente di dilatazione termico. L'effetto particolarmente benefico del Silicio sulla fluidità delle leghe di Alluminio è tanto più evidente quanto più le composizioni sono prossime all'eutettico [6]. Inoltre poiché il sistema Al-Si non forma composti intermetallici, il silicio precipita direttamente dalla matrice della soluzione solida primaria. Al contrario l'1% di magnesio è utilizzato per consentire un successivo trattamento termico.

È bene sottolineare, comunque, come le proprietà meccaniche dipendano fortemente anche dalla distribuzione e dalla morfologia del reticolo cristallino. Corpuscoli di piccole dimensioni, rotondeggianti e ben distribuiti garantiscono un miglioramento in termini di duttilità e resistenza, se al contrario i cristalli si presentano faccettati e aciculari si potrebbero avere ripercussioni negative sia sulla duttilità che sulla resistenza a fatica e agli urti [2].



Si prosegue ora con la presentazione delle proprietà meccaniche della lega trovate in letteratura così da avere un riscontro con i risultati che si otterranno dalle varie prove di laboratorio a cui si sottoporranno i provini. Si è scelto inoltre di riportare le caratteristiche meccaniche della lega processata sia con tecnologie additive che con quella da colata, così da avere un diretto paragone tra le differenti tecnologie di processo. Si precisa tuttavia, che i dati sulle prestazioni meccaniche dei materiali a base Al usati nel mondo additive non sono spesso comparabili direttamente a causa della non omogeneità degli standard di caratterizzazione utilizzati e dall'effetto che i diversi parametri di processo hanno.

| TABELLA DI CONFRONTO | | | | | | |
|---|------------|------------|--------------|------------|--------|------------------------------|
| | E [GPa] | Rm [MPa] | Rp02 [Mpa] | A% | HBW | Densità [g/cm ³] |
| A357.0-T61* Sand Cast | 72.4 | 310 | 241 | 3.0 | 85-115 | 2,67 |
| A357.0 – T61* Permanet mold cast | 72.4 | 310 | 248 | 3.0 | - | - |
| AlSi7Mg – Z** | 70.05 (±1) | 361.5 (±1) | 243.3 (±1) | 3.3 (±0.5) | - | - |
| AlSi7Mg – XY** | 72 (±1.2) | 367 (±5) | 215.8 (±3,2) | 3.8 (±0.1) | - | - |
| AlSi7Mg*** | - | 397(±9) | 288 (±7) | 3.8(±0.3) | - | - |

Figura 2.2 [7] [8][9]

*Il T61 è un trattamento termico che consta nel mantenere il materiale ad una temperatura di 540°C per 8 ore con rapido raffreddamento in acqua, seguito da un processo di invecchiamento durante il quale il materiale è tenuto ad una temperatura di 171°C per un lasso di tempo variabile dalle 3 alle 5 ore [8].

** Risultati ottenuti da campioni prodotti mediante la X Line 2000 R (Concept Laser) con i seguenti parametri di processo: Potenza Laser 950 W – Velocità di scansione: 2000 mm/s – Laser spot: 400 μm - Hatch Distance: 0.2 mm – Temperatura piattaforma: 200°C [7]

*** Risultati ottenuti da campioni prodotti mediante la EOS M270 Dual Mode con i seguenti parametri di processo: Potenza Laser 195W – Velocità di scansione 1200 mm/s – Hatch Distance: 0.1 mm – Temperatura piattaforma: 170°C [8]

Alla luce di quanto mostrato, risulta ora più evidente la dispersione di dati dovuti alle molteplici variabili di processo a cui si faceva riferimento sopra. Tuttavia è possibile notare come le proprietà meccaniche del materiale processato in modo additivo, possano raggiungere valori particolarmente interessanti soprattutto se paragonati con quelli derivanti dal casting. Il motivo di tale risultato è da ricercare nel processo di rapida solidificazione caratteristico della fabbricazione additiva, che permette pertanto di disperdere in modo casuale il silicio e il magnesio all'interno di grani cristallini particolarmente fini di alluminio. Per quanto concerne invece le particelle di polvere, esse non presentano particolari difetti, hanno una geometria pressoché sferica anche se è possibile constatare la presenza di qualche satellite; tuttavia anche le particelle più piccole hanno una discreta tendenza a staccarsi (gli agglomerati sono deleteri per il processo). La floability del materiale risulta buona, in generale invece le dimensioni medie delle particelle è di 20 - 62 μm . L'elevata presenza di Silicio consente di ottenere polveri con una geometria estremamente efficace per il processo di additive manufacturing, inoltre avere un bagno fuso molto fluido aiuta sia la ridensificazione del materiale sia il processo di formatura delle polveri. È, inoltre, possibile riscontrare come vi sia una certa variabilità tra lo stesso materiale processato con gli stessi parametri, ma con direzioni diverse di accrescimento in macchina.

In generale si può concludere dicendo che la lega ipo-eutettica AlSi7Mg (A357) è di grande interesse, perché presenta un buon compromesso tra resistenza e duttilità in combinazione con elevata resistenza alla corrosione e all'usura, che la rendono adatta per la fusione di parti in settori automobilistici e aerospaziali [6, 7]. Le proprietà della lega A357 che lo rendono appropriato per essere prodotto per fusione da SLM sono la resistenza al cracking a caldo, la buona fluidità e lo stretto intervallo di solidificazione

CAPITOLO 3 - DESIGN OF EXPERIMENTS

Lo svolgimento di un'analisi multi parametrica senza la creazione di un appropriato piano sperimentale, risulterebbe estremamente dispersiva in termini di risorse economiche e temporali. D'altronde risulta facile intuirne il motivo, ovvero: sarebbe necessario andare ad indagare un ingente quantitativo di risultati sperimentali, ottenuti impostando, di fatto, tutte le possibili combinazioni tra i parametri modificabili.

Ebbene alla luce di quanto detto, appare evidente come lo sviluppo dei parametri macchina per una tecnologia complessa come può essere quella di Selective Laser Melting, richieda un approccio specifico. A tal proposito durante tale lavoro di tesi ci si è avvalsi delle potenzialità computazionali del software Minitab per la creazione di un Design Of Experiments (DOE). Nel prosieguo del capitolo, quindi, si andrà ad illustrare quali sono i vari piani realizzabili tramite questo programma, sottolineando i punti di forza e di debolezza e infine si riserverà un focus esclusivo sulla tipologia di DOE scelto e come esso è stato realizzato.

Minitab è un programma di analisi statistica sviluppato presso la Pennsylvania State University che permette l'automatizzazione dei calcoli e la creazione di grafici, consentendo quindi all'utente di focalizzare la propria attenzione principalmente sull'analisi dei dati e sull'interpretazione dei risultati. Minitab si presta bene per essere utilizzato come strumento didattico (in particolare per l'insegnamento di materie statistiche), ma al contempo è sufficientemente potente da essere utilizzato anche come strumento primario per l'analisi dei dati in campo di ricerca e sviluppo. Quest'ultimo è proprio l'utilizzo che viene fatto nello stabilimento Prototypes di FCA.

Minitab permette di scegliere tra una vasta gamma di topologie di DOE e l'approccio che solitamente si segue è ben riassunto step by step dall'immagine seguente, in cui si possono distinguere: la fase di scelta dell'esperimento su cui si vuole operare un'ottimizzazione di prodotto/processo, la raccolta dei dati sperimentali con il fine di riuscire a identificare quali sono dei fattori principali che hanno un'influenza maggiore all'interno di quel determinato processo, la creazione del modello DOE più appropriato con conseguente calibrazione dello stesso per poi giungere in fine all'ottimizzazione vera e propria del processo.

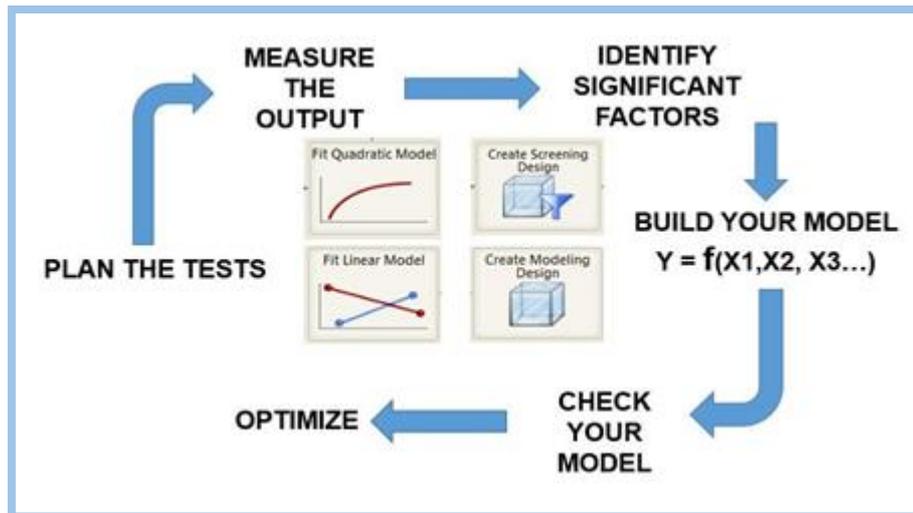


Figura 3.1

3.1. Tipologie di Piani Sperimentali

Di seguito verrà quindi presentata una breve descrizione dei vari piani creabili tramite tale programma.

- **PIANO FATTORIALE**

In un piano di esperimenti “Full factorial” le risposte sono ottenute mediante tutte le combinazioni possibili tra i fattori e i loro livelli, ciò può però comportare un numero di run proibitivo. Al fine di minimizzare tempi e costi si può utilizzare un design che seppur sia fattoriale permette di escludere alcune combinazioni parametriche. Così facendo, però, alcuni degli effetti verranno inevitabilmente occultati, con la conseguenza che non sarà possibile stimare tali effetti in maniera indipendente. Per quanto detto, se si sceglie di utilizzare un piano di questo tipo i fattori su cui si va ad indagare devono essere selezionati con attenzione, è pertanto richiesta una conoscenza approfondita del prodotto/processo in esame [10].

Di seguito si elencano i vari piani fattoriali disponibili all'interno del software:

- ✓ *Due livelli completi*: Ogni fattore sperimentale può avere solo due livelli e le prove sperimentali includono tutte le combinazioni possibili tra i livelli e i fattori. Sebbene questa tipologia di analisi non sia in grado di esplorare una vasta gamma di fattori, essa fornisce informazioni utili a fronte di un basso numero di run. Questo tipo di analisi permette di individuare la direzione principale e può essere utilizzata come base per successive analisi più

approfondite. Ad esempio, se si vuole di esplorare in maniera più approfondita una regione di dati, in cui si presuppone che vi sia l'ottimo, si può aumentare il design fattoriale per formare un design composito centrale [10].

- ✓ *Due livelli Split Plot:* (2 livelli Max per ogni fattore) In questa tipologia di analisi è possibile specificare fattori, così definiti, "hard to change" (ovvero fattori che è difficile rendere variabili a causa di costi elevati o particolari vincoli, un esempio di fattore hard to change può essere la temperatura in quanto è uno di quei parametri che richiede molto tempo per stabilizzarsi). Ebbene i livelli dei fattori hard to change vengono mantenuti costati per alcune run, mentre i fattori classici vengono variati durante le run [10].

- ✓ *General full factorial design:* i fattori possono assumere qualsiasi livello (l'unico limite è rappresentato dalla potenza computazionale del calcolatore) e non necessariamente devono assumere tutti lo stesso numero di livelli (ad esempio il fattore A può avere 2 livelli, il fattore B 3 e il fattore C 5 livelli). Le run includono tutte le combinazioni tra i livelli e i fattori. Solitamente il Full Factorial Design viene utilizzato per gli esperimenti di ottimizzazione [10].

- ✓ *Plackett – Burman designs:* questo tipo di analisi ha una classe di risoluzione pari a 3. Tale design è spesso utilizzato per lo studio preliminare, così da poter individuare immediatamente i fattori più importanti in una vasta gamma; è consigliabile, infatti, usare tale approccio quando si dispone di un numero di fattori pari almeno a 8. Nel Plackett-Burman design gli effetti principali sono relazionati in maniera complessa con le interazioni a due fattori, perciò è consigliabile utilizzare tale design quando è possibile assumere a priori che non vi siano interazioni tra i fattori. Si ricorda che l'interazione è definita come la dipendenza di un fattore da un altro. Si precisa infine che il numero di run di questa tipologia di design deve essere sempre un multiplo di 4, nello specifico da 12 a 48 run. Inoltre, è necessario che il numero di fattori utilizzati risulti minore del numero di run scelte [10].

- RESPONSE SURFACE DESIGN

È una tipologia di design utilizzata per esaminare le relazioni che vi sono tra le risposte e un insieme di fattori sperimentali. Tale metodologia di progettazione della superficie di risposta viene solitamente utilizzata per perfezionare i modelli, solo dopo che si sono già determinati i fattori primari tramite l'uso di progetti di screening o design fattoriali. È fortemente consigliato un approccio di questo tipo soprattutto se si sospetta una curvatura della superficie di risposta [10].

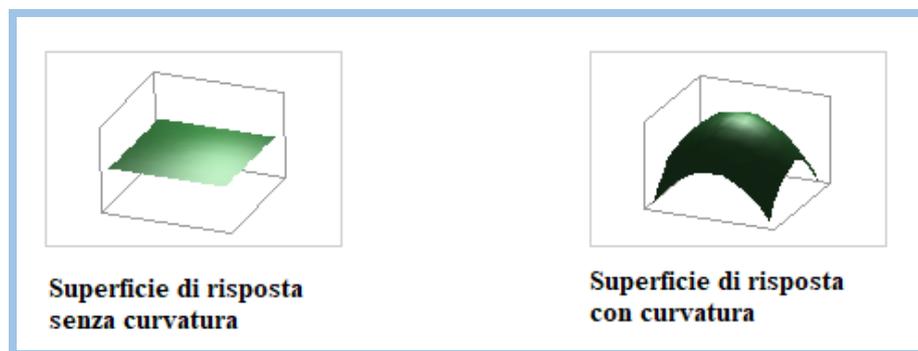


Figura 3.2

Tipici casi applicativi sono i seguenti:

- ✓ Trovare la combinazione di fattori che produce la risposta migliore;
- ✓ Trovare la combinazione di fattori che soddisfi al meglio i requisiti operativi o di processo;
- ✓ Identificare nuove condizioni operative che permettono di ottenere miglioramenti in termini di qualità del prodotto;
- ✓ Modellare le relazioni tra le risposte e i fattori continui o discreti.

Esistono principalmente due tipologie di design delle superfici di risposta: Central Composite Design e Box Behnken Design. Vediamoli nel dettaglio:

- ✓ *Central composite*

I disegni Central Composite permettono di adattarsi ad un modello quadratico completo e sono la tipologia più largamente utilizzata. I progetti central composite sono particolarmente utili negli esperimenti sequenziali perché spesso si possono costruire basandosi su esperimenti fattoriali precedenti,

semplicemente aggiungendo punti assiali e centrali. Tale design identifica 2^k punti fattoriali, dove k rappresenta il numero dei fattori, ad essi vengono aggiunti altri 6 punti assiali e un punto centrale. La tipologia a Facce Centrate permette di impostare i valori massimi e minimi entro cui far variare ciascun fattore. Tali valori vanno a definire le proporzioni del “cubo” sul quale viene costruito il design [10].

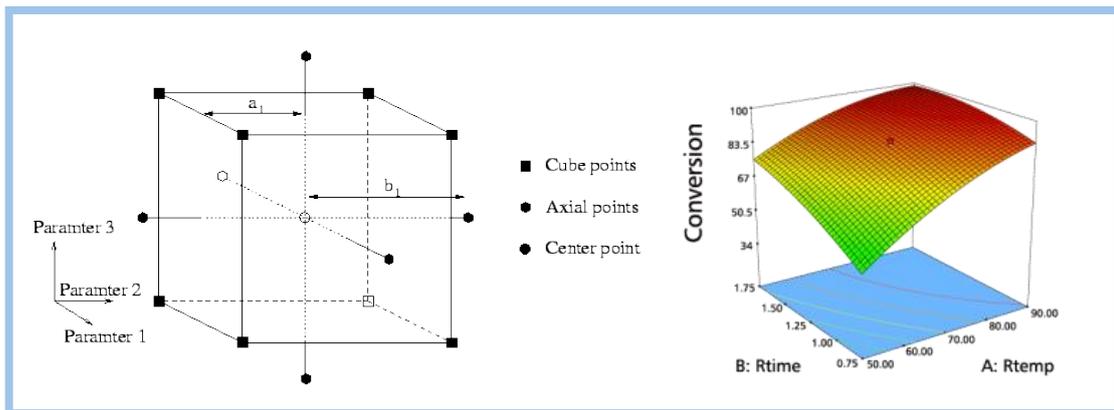


Figura 3.3

Box behnken design

Un design Box-Behnken fa parte della famiglia dei response surface design, ma si distingue dagli altri poiché non permette di proseguire un’analisi già avviata con un precedente progetto fattoriale. Le combinazioni di fattori e livelli che vengono utilizzati in un design di questo genere si trovano ai punti medi dei bordi dello spazio sperimentale e richiedono almeno tre fattori continui. Questi progetti consentono una stima efficiente dei coefficienti del primo e del secondo ordine e poiché questa tipologia di progetti ha spesso meno punti di progettazione, possono risultare meno costosi rispetto a progetti di Central Composite con ugual numero di fattori. Al contrario, poiché non hanno un design fattoriale incorporato, non sono adatti per esperimenti sequenziali. I Box Behnken impongono sempre 3 livelli per ciascun fattore a differenza dei “central composite” che possono arrivare fino a 5 [10].

Uno dei vantaggi principali di questo design è che a differenza della tipologia Central composite assicura che tutte le run richieste cadano nell'intervallo di livelli scelto; questo in merito al fatto che non vi sono punti "assiali" (per avere un effetto analogo in presenza di punti assiali è necessario scegliere un valore di alfa che sia minore o uguale a 1). Un'ulteriore importante caratteristica del bhenken design è che assicura che i fattori non vengano mai settati ai loro livelli massimi contemporaneamente, ciò può rappresentare un vantaggio quando il settaggio dei fattori ai loro massimi livelli risulti essere particolarmente oneroso o fisicamente impossibile [10].

- MIXTURE DESIGN:

I Mixture experiments sono una classe speciale di superfici di risposta. Si è soliti usare questi design quando i fattori altro non sono che le percentuali di una miscela, come ad esempio possono essere quelle che rappresentano la composizione chimica di un determinato materiale di lega, ovvero quando i componenti della miscela sono soggetti al vincolo che la loro somma deve essere unitaria (100%) esistono, a tal proposito, delle tipologie di Mixture Design predefinite come ad esempio Simplex Lattice e Simplex-Centroid. Quando invece i fattori della miscela sono soggetti a vincoli aggiuntivi, come ad esempio un valore max/min per ciascun componente, esistono altre tipologie di Mixture Design; la più diffusa è sicuramente la Extreme-Vertices designs che permette appunto di tener conto di questi vincoli aggiuntivi [10].

Si precisa infine che negli esperimenti di miscela, si presume che la risposta misurata dipenda solo dalle proporzioni relative degli ingredienti o componenti della miscela e non dalla quantità della miscela. La quantità della miscela potrebbe anche essere studiata come un fattore aggiuntivo nell'esperimento [10].

- TAGUCHI

Questo metodo può utilizzare un numero di livelli per ciascun fattore variabile da 2 a 5 oppure un design a livelli misti. Lo scopo principale di questo design è quello di rendere il processo/prodotto meno variabile rispetto proprio a quei fattori su cui non si ha il pieno controllo. Questa metodologia, infatti, riconosce che non tutti i fattori che causano una variabilità della risposta sono controllabili dall'utente, tali fattori

incontrollabili sono chiamati “fattori di rumore”. I design Taguchi si pongono come obiettivo quello di identificare i fattori controllabili che permettono di minimizzare l’effetto dei fattori di rumore rendendo il prodotto/processo, che si sta analizzando, robusto. Un prodotto/processo progettato con questa metodologia assicura prestazioni più coerenti a prescindere dall’ambiente in cui viene utilizzato (ovvero a prescindere dai fattori di rumore) [10].

Un tipico esempio applicativo è il seguente: si vuole rendere il processo di cottura della piastrelle (in forno) meno variabile rispetto alle oscillazioni di temperatura, poiché tali variazioni causano un errore dimensionale. Non potendo eliminare la variazione di temperatura (in quanto sarebbe necessario costruire un nuovo forno), la si può ritenere un fattore di rumore. Ebbene utilizzando un Taguchi design è stato possibile ottenere piastrelle più resistenti alla variazione di temperatura nel forno, consentendo la produzione di piastrelle più uniformi, semplicemente variando un fattore di controllo che nel caso in esame è rappresentato dal contenuto di calcare argilloso.

Infine si ricorda che i progetti Taguchi utilizzano matrici ortogonali, ciò vuol dire per ogni coppia di colonne le combinazioni di fattori si verificano lo stesso numero di volte. Ogni fattore, pertanto, può essere valutato indipendentemente da tutti gli altri, perciò l’effetto di un fattore non va a influenzare la stima di un altro [10].

3.2. Response Surface Design: Central Composite

Visto e considerato che l’azienda committente tale sviluppo parametrico possedeva già un elevato know how riguardo il processo di Selective Laser Melting, è stato possibile focalizzare lo studio direttamente sui fattori ritenuti controllanti evitando, per cui, di dover creare un primo piano sperimentale più generico. Ebbene della la vasta gamma di Design esposta, la scelta è ricaduta su un Respose Surface Design e più dettagliatamente sul Central Composite. I motivi di questa scelta, in parte già esposti, vengono riportati qui di seguito:

Questo tipo di piano sperimentale fa parte di una tipologia che viene solitamente utilizzata per esaminare le relazioni che vi sono tra le risposte ed un gruppo di fattori (parametri sperimentali). In particolare si sceglie questo tipo di analisi quando si sono già identificati i fattori caratteristici del processo e si vuole trovare la loro

combinazione ottimale. Più dettagliatamente, tale design identifica 2^k punti fattoriali, dove k rappresenta il numero stesso dei fattori. Ad essi vengono aggiunti altri 6 punti assiali e un punto centrale, permettendo quindi, la stima dei termini quadratici oltre che di quelli lineari. Infine è possibile imporre i valori massimi e minimi entro cui far variare ciascun fattore, tali valori vanno a definire le proporzioni del “cubo” su cui il design fa riferimento.

Per quanto concerne i motivi che hanno portato ad escludere le altre tipologie di piani sperimentali sono le seguenti:

- ✓ Le run di un piano fattoriale includono tutte le combinazioni tra i livelli e i fattori, nel caso in esame risulterebbe eccessivamente oneroso in termini di tempo e costi usare un design di questo tipo.
- ✓ I Mixture Design sono solitamente utilizzati quando i fattori sono soggetti al vincolo che la loro somma deve essere unitaria (Es. i fattori sono la percentuale di una miscela). L’ottimizzazione multi parametrica di un processo di fabbricazione additiva certamente non rispettare tale condizione.
- ✓ Il Response surface Box Behnken si differenzia dal Central Composite perché non setta mai i fattori ai loro massimi livelli e poiché questa è una condizione che si è voluta esplorare, si è scelto di escludere tale tipologia di progetto.
- ✓ Lo scopo principale del Taguchi è quello di rendere il processo/prodotto meno variabile rispetto a quei fattori su cui non si ha il pieno controllo, non essendo questo l’obiettivo perseguito dell’analisi svolta non si è ritenuto tale design idoneo.

In definitiva i fattori sui si è scelto di svolgere l’ottimizzazione e il range in cui si è scelto di farli variare sono riportati nella seguente tabella:

| Potenza [W] | | Hatch Distance [mm] | | Velocità di scansione [mm/s] | |
|-------------|-----|---------------------|-------|------------------------------|------|
| Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| 300 | 370 | 0,150 | 0,200 | 800 | 2000 |

Tabella 3.1

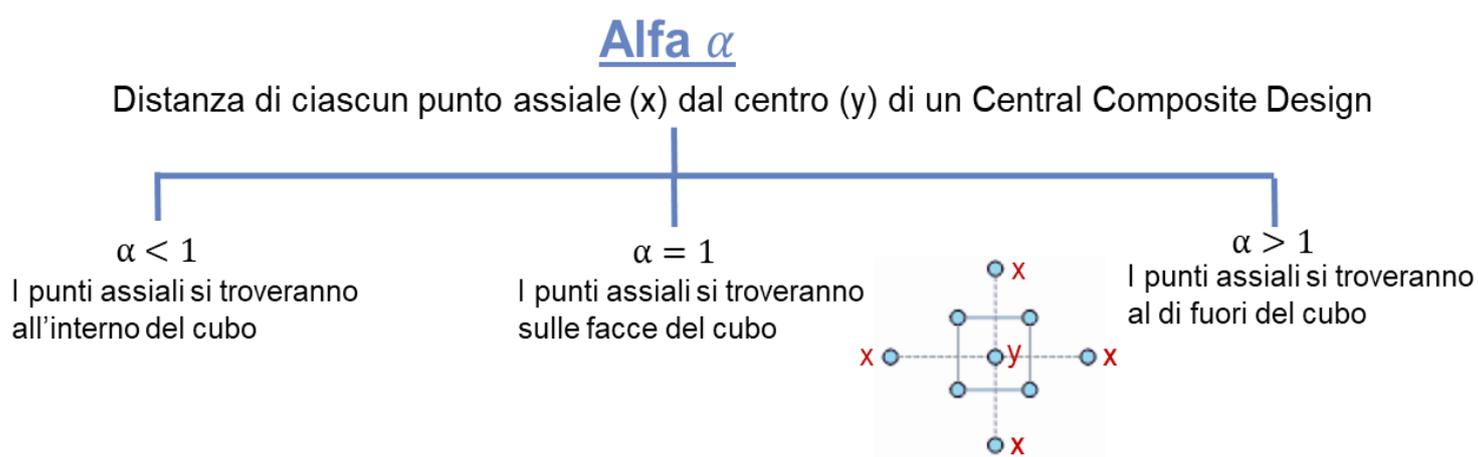
Così facendo le combinazioni (run) previste dal Central Composite Design con 3 fattori annunerano a 15 a cui si è scelto di aggiungere altre due combinazioni di parametri candidate ad essere ottimali dall'esperienza maturata nel settore. Tale blocco di combinazioni è stato ripetuto due volte al fine di valutare anche eventuali errori di ripetibilità del processo, per cui nel dettaglio:

| Tipologia di Design | N° Di Fattori (k) | Punti centrali | Punti assiali | Valore di Alfa | Run aggiuntive | N° di Repliche | Totale |
|---------------------|-------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| 2^k | 3 | 1 | 6 | 0,7143 | 2 | 2 | 34 |

Tabella 3.2

Se si immagina la creazione del piano sperimentale come il cubo riportato in figura 3.3 il cui baricentro, i cui punti centrali (di ciascuna faccia) e i cui vertici rappresentano le run, allora il valore di alfa può essere inteso come la distanza da ciascun punto assiale al centro del cubo. Ebbene, per quanto detto variando alfa si va a modificare la geometria del progetto; nel caso in esame si è scelto di porre alfa pari a 0.7143 poiché così facendo si è riusciti ad ottenere una potenza laser pari a 360 W all'interno del piano sperimentale. Tale valore è candidato ad essere ideale dall'esperienza maturata nel settore.

Al fine di meglio chiarire quanto esposto, si riporta una schematizzazione del concetto:



Si riporta infine il piano sperimentale così impostato:

| ↓ | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 |
|----|----------|----------|--------|--------|-------------|------------------------------|---------------------|----------|------------|---------|-----|----------------|-----|
| | StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | Potenza [W] | Velocità di Scansione [mm/s] | Hatch Distance [mm] | Rm [MPa] | Rp02 [MPa] | E [GPa] | A% | Densità [g/cc] | |
| 1 | 10 | 1 | -1 | 1 | 360,000 | 1400,00 | 0,175000 | | | | | | |
| 2 | 27 | 2 | -1 | 1 | 335,000 | 1828,58 | 0,175000 | | | | | | |
| 3 | 12 | 3 | -1 | 1 | 335,000 | 1828,58 | 0,175000 | | | | | | |
| 4 | 18 | 4 | 1 | 1 | 300,000 | 2000,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 5 | 22 | 5 | 1 | 1 | 300,000 | 2000,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 6 | 8 | 6 | 1 | 1 | 370,000 | 2000,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 7 | 23 | 7 | 1 | 1 | 370,000 | 2000,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 8 | 26 | 8 | -1 | 1 | 335,000 | 971,42 | 0,175000 | | | | | | |
| 9 | 9 | 9 | -1 | 1 | 310,000 | 1400,00 | 0,175000 | | | | | | |
| 10 | 28 | 10 | -1 | 1 | 335,000 | 1400,00 | 0,157142 | | | | | | |
| 11 | 13 | 11 | -1 | 1 | 335,000 | 1400,00 | 0,157142 | | | | | | |
| 12 | 1 | 12 | 1 | 1 | 300,000 | 800,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 13 | 19 | 13 | 1 | 1 | 370,000 | 2000,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 14 | 21 | 14 | 1 | 1 | 370,000 | 800,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 15 | 4 | 15 | 1 | 1 | 370,000 | 2000,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 16 | 14 | 16 | -1 | 1 | 335,000 | 1400,00 | 0,192857 | | | | | | |
| 17 | 6 | 17 | 1 | 1 | 370,000 | 800,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 18 | 17 | 18 | 1 | 1 | 370,000 | 800,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 19 | 30 | 19 | 0 | 1 | 335,000 | 1400,00 | 0,175000 | | | | | | |
| 20 | 29 | 20 | -1 | 1 | 335,000 | 1400,00 | 0,192857 | | | | | | |
| 21 | 16 | 21 | 1 | 1 | 300,000 | 800,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 22 | 2 | 22 | 1 | 1 | 370,000 | 800,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 23 | 11 | 23 | -1 | 1 | 335,000 | 971,42 | 0,175000 | | | | | | |
| 24 | 15 | 24 | 0 | 1 | 335,000 | 1400,00 | 0,175000 | | | | | | |
| 25 | 24 | 25 | -1 | 1 | 310,000 | 1400,00 | 0,175000 | | | | | | |
| 26 | 5 | 26 | 1 | 1 | 300,000 | 800,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 27 | 25 | 27 | -1 | 1 | 360,000 | 1400,00 | 0,175000 | | | | | | |
| 28 | 20 | 28 | 1 | 1 | 300,000 | 800,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 29 | 7 | 29 | 1 | 1 | 300,000 | 2000,00 | 0,200000 | | | | | | |
| 30 | 3 | 30 | 1 | 1 | 300,000 | 2000,00 | 0,150000 | | | | | | |
| 31 | 33 | 31 | 1 | 1 | 360,000 | 1300,00 | 0,190000 | | | | | | |
| 32 | 34 | 32 | -1 | 1 | 360,000 | 1300,00 | 0,190000 | | | | | | |
| 33 | 32 | 33 | 1 | 1 | 360,000 | 1300,00 | 0,190000 | | | | | | |
| 34 | 31 | 34 | 1 | 1 | 360,000 | 1300,00 | 0,190000 | | | | | | |

Figura 3.4

Ebbene si può notare come il programma abbia restituito le runs necessarie per completare il DOE. L'utente a questo punto deve eseguire i 34 esperimenti, ciascuno dei quali con i relativi valori macchina suggeriti dal programma. Una volta svolte le prove necessarie, si potranno caricare i risultati ottenuti e si procederà con l'ottimizzazione.

In questo caso si è scelto di andare ad indagare:

- Carico a Rottura (R_m),
- Carico a Snervamento ($R_{p0.2}$),
- Allungamento percentuale a rottura ($A\%$),
- Modulo Elastico (E) e
- Densità.

Il motivo di tale scelta verrà sviscerato in maniera più dettagliata nel corso del capitolo dedicato alle prove di laboratorio e in quello relativo al caricamento dei risultati sperimentali all'interno del DOE.

CAPITOLO 4 - PRODUZIONE DEI PROVINI

Il capitolo seguente è finalizzato alla descrizione di tutte quelle operazioni che sono state eseguite e che hanno permesso di trasformare un file matematico (CAD) nei provini tridimensionali su cui sono state svolte tutte le analisi di laboratorio. Pertanto, in primis si farà un discorso di carattere più generico, ovvero verranno ripercorsi tutti quegli step tipici di un processo di fabbricazione additiva e successivamente si provvederà a descrivere come tali concetti siano stati applicati al caso in esame.

4.1. Il ciclo produttivo additive

▪ CREAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

Tutto il processo additivo ha inizio con la realizzazione di un modello CAD 3D; per adempiere a tale obiettivo, si ha a disposizione una vasta gamma di software più o meno specifici. Proprio durante questa operazione l'additive manufacturing fa sfoggio di uno dei suoi più grandi vantaggi rispetto alle tecnologie sottrattive più consolidate. Ebbene, lo sviluppatore, che deve creare il modello matematico, ha molti meno vincoli geometrici a cui sottostare, infatti sono ammessi sottosquadri, è possibile andare a creare strutture alleggerite (forme cave complesse e strutture reticolari) e inoltre si può ridurre il numero di componenti: è possibile produrre direttamente un assemblato unico, andando ad integrare giunti e cerniere. Gli unici limiti reali sono costituiti dai volumi di lavoro delle stampanti (che al giorno d'oggi risultano ancora piuttosto limitati) dalla necessità di strutture di supporto che in alcuni casi potrebbero andare a influire sulla finitura superficiale e dal numero perlopiù limitato di materiali.

▪ GENERAZIONE DEL FILE STL

Una volta realizzato il modello CAD tridimensionale è necessario convertirlo in un file STL (Standard Triangle Language), che è lo standard universale nella FA. In tale passaggio avviene la discretizzazione dell'intero componente in una serie di triangoli, ottenendo quindi un modello di tipo Shell. Intuitivamente si comprende come i

triangoli generati non siano tutti delle stesse dimensioni, ma in base alla superficie che deve essere approssimata può essere richiesta una rete più o meno fitta di triangoli. L'operazione così descritta non è però sempre esente da errori, infatti andando ad approssimare una superficie continua in una discretizzata si possono introdurre errori cordali (ϵ) o di faceting [1].

Del primo (ϵ) è proposta una rappresentazione, così da risultare più facilmente comprensibile.

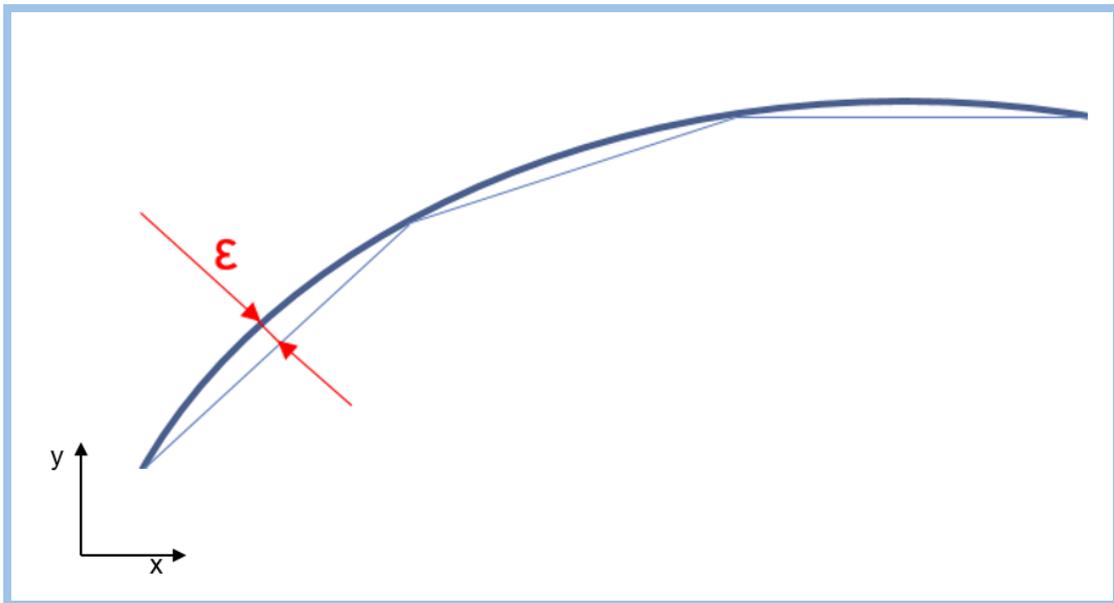


Figura 4.1

L'errore massimo consentito può essere specificato dall'operatore durante la fase di progettazione, compatibilmente con la sensibilità della macchina. Si è soliti imporre un errore cordale costante pari a 0.01 mm . Si evince, come tale errore possa solamente essere limitato ma certamente non eliminato del tutto.

L'errore di faceting in buona sostanza è la presenza di gap all'interno della superficie; se l'area scoperta risulta essere relativamente piccola, vi sono dei programmi di ottimizzazione che permettono di correggere il file in modo automatico aggiungendo triangoli lì dove vi sono i vuoti. Se, al contrario, l'area è estesa bisognerà tornare indietro allo step precedente, andando a correggere il file CAD. si sottolinea che è prassi consolidata quella di far transitare il file stl nei software di correzione prima di inviarlo alla macchina, onde evitare il rigetto da parte della stessa.

▪ ORIENTAMENTO DEL MODELLO E GENERAZIONE DEI SUPPORTI

In questa specifica fase il progettista va ad operare, tramite un software, all'interno di un ambiente di lavoro che simula il volume di stampa. In base al materiale che verrà effettivamente processato, questa fase può risultare più o meno delicata. A titolo di esempio, se si andranno ad utilizzare tecnologie SLS polimeriche (che non richiedono la realizzazione di supporti) l'unico aspetto di cui tener conto è l'altezza in Z che avrà il componente una volta posizionato in macchina, poiché essa influirà pesantemente sul tempo di realizzazione e di conseguenza sul costo del componente. Per quanto riguarda, invece, tecniche come l'FDM e la SLA l'orientazione del pezzo in macchina determinerà una maggior o minor presenza di strutture supportanti, con tutte le conseguenze che nel corso di questa trattazione sono già state esposte (consumo di materiale, finitura superficiale e tempi di post processing). Infine se la fabbricazione del pezzo verrà affidata alla SLM, in questo passaggio (in realtà già in sede di progettazione) bisognerà seguire scrupolosamente le regole dettate dal Design for Additive Manufacturing al fine di avere un componente esente da errori strutturali, di finitura e per prevenire la macchina da eventuali danneggiamenti.

I supporti, come già ampiamente evidenziato, sono un elemento cruciale del componente, essi hanno, infatti, il compito di ancorare il modello in costruzione all'area di lavoro, di proteggere le pareti laterali da azioni che ne possono compromettere la fabbricazione, di supportare le parti sporgenti del pezzo e di agevolare lo scambio termico con la piastra. In base all'orientazione conferita alla parte da realizzare, durante la fase di data preparation, è possibile affidarsi ai supporti che vengono generati e aggiunti automaticamente dal software. Tuttavia risulta pratica consolidata quella di progettarli ad hoc, in base al macchinario e al materiale che si sta utilizzando. Solitamente se la parte sporgente supera i 2 mm è necessario supportarla. Si ricorda che essi sono considerati come l'equivalente del truciolo in un processo di fabbricazione sottrattiva, sono pertanto da intendere come uno scarto di lavoro. [1]

▪ ESECUZIONE DELLO SLICING

Scelta la posizione in cui il pezzo accrescerà e determinato il numero (e la dispersione) ideale dei supporti è necessario intersecare il modello in formato STL, così ottenuto, con piani paralleli tra loro e aventi normale parallela all'asse Z della macchina. La distanza tra un piano e l'altro ΔS sarà quindi pari all'altezza della sezione che il laser (o la fonte energetica in questione) andrà a fondere, con evidenti ripercussioni sul numero di layer totali e ovviamente sul tempo di produzione. Maggiore è il numero di ΔS in cui il pezzo è suddiviso, maggiore sarà il tempo necessario per la realizzazione dello stesso, a fronte però di una maggiore precisione. Tipici range di ΔS sono i seguenti:

- ΔS Polimeri = [0.05 - 0.3];
- ΔS Metalli = [0.02 - 0.05].

Così come la conversione in formato STL anche questa operazione non è esente da errori, in particolare lo slicing determina un "effetto scala" o più formalmente detto errore di "staircase". Ovvero l'approssimazione di una geometria continua in un certo numero di sezioni di spessore finito, il tutto si traduce in una più o meno marcata rugosità superficiale [1]. Nella figura sottostante si può apprezzare tale errore e come esso dipenda appunto dal posizionamento in macchina del componente:

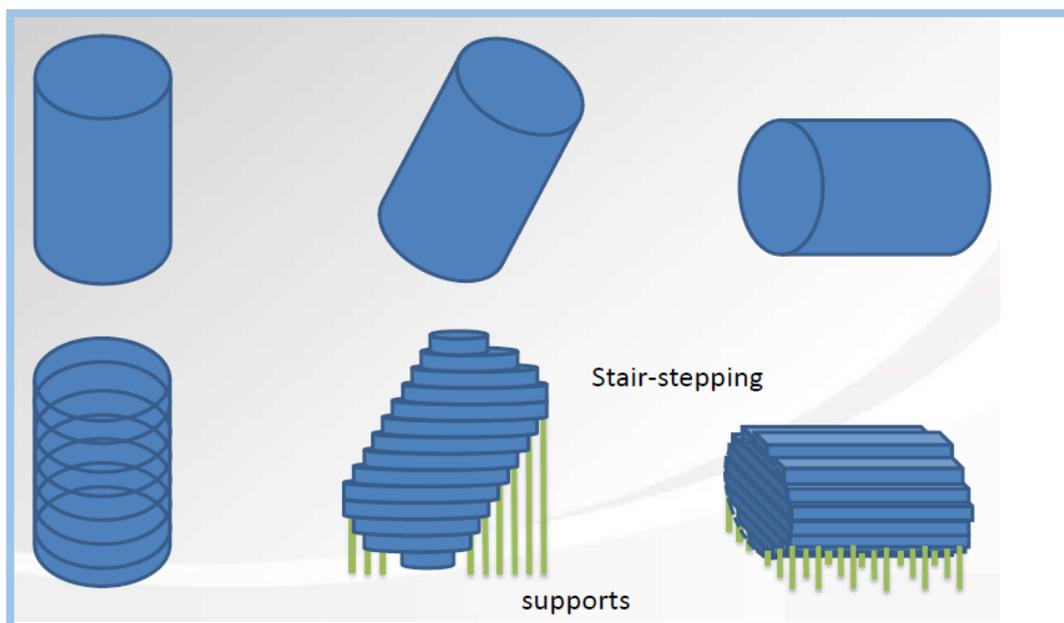


Figura 4.2

Fondamentalmente vi sono due tipologie di slicing: Costante o Adattativo. Se costante lo slicing genererà errori di curvatura diversi in base alla superficie che si sta andando ad approssimare, se al contrario è adattativo è possibile imporre un errore massimo e la macchina varierà lo spessore ΔS delle sezioni di conseguenza. Tuttavia si precisa che quasi nessuna macchina al giorno d'oggi è in grado di far variare lo spessore della passata, costituendo quindi un limite hardware e non software. La figura sottostante è rappresentativa di quanto appena esposto. [1]

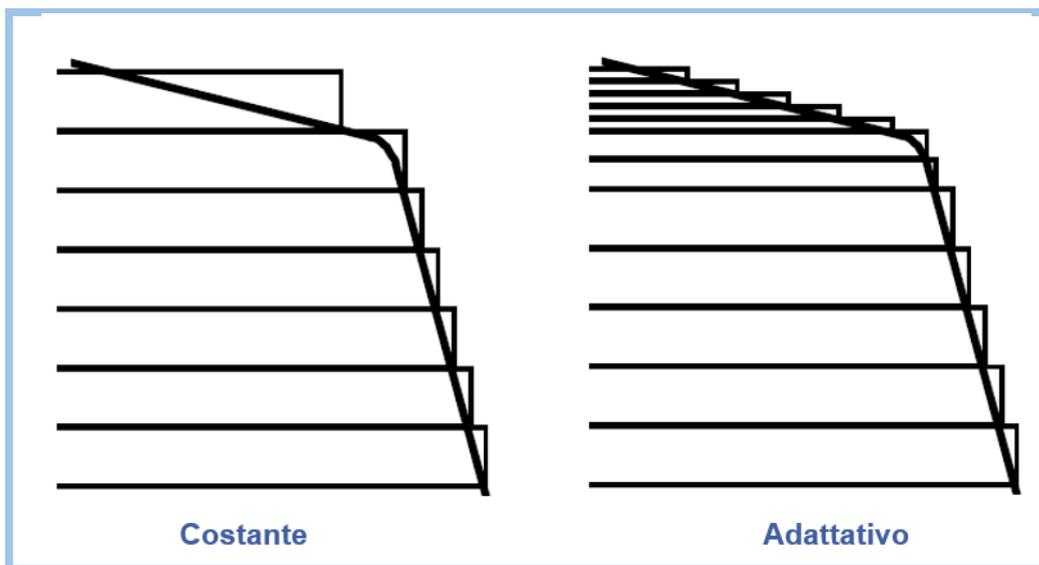


Figura 4.3 [1]

- **SETTAGGIO DEI PARAMETRI E COSTRUZIONE DEL COMPONENTE**

Completate anche le operazioni di carico del materiale in macchina e di serraggio sia della piastra di lavoro che della lama del recoter, non resta che settare i parametri macchina. Di essi si è già trattato abbondantemente nel corso degli scorsi capitoli, si ricordano quelli di maggior interesse come: la potenza laser, la velocità di scansione, l'hatch distance, lo spessore di ciascun strato e la temperatura della piastra. Avviato il processo, se presente, è possibile monitorare la fabbricazione tramite una fotocamera. Tuttavia le possibilità di intervento on line al processo sono praticamente nulle, infatti una volta lanciato il job non sarà più possibile operare modifiche di settings; all'operatore è lasciata la sola libertà di poter annullare l'intero processo o solo quello di alcuni componenti, nel caso in cui si riscontrassero errori potenzialmente dannosi.

▪ POST PROCESSING

Ultimato il processo additivo è giunto il momento di eseguire tutte quelle operazioni che rientrano sotto il nome di post processing, ovvero: estrarre il pezzo dalla macchina, eseguire trattamenti termici se previsti, rimuoverne i supporti (se presenti) e infine rifinire la superficie esterna. Per coerenza con le principali attività svolte in azienda durante il periodo di tesi, si presenta l'esempio di post processing di un componente prodotto con tecnologia SLM.

Ebbene, una volta completato anche l'ultimo layer, il pezzo si trova quindi immerso in un blocco di polvere metallica a temperature ancora maggiori di quelle ambiente. Come prima operazione è necessario aspirare tutta la polvere che non è stata fusa, consentendone quindi il suo riutilizzo. Si specifica tuttavia che prima di poter nuovamente mettere in macchina tale materiale è necessario setacciarlo e mescolarlo nelle giuste proporzioni con polvere vergine. Successivamente, si estrare la piastra e con il pezzo ancora ancorato essa subisce il trattamento termico previsto. Al fine di prevenire eventuali deformazioni geometriche (a causate dalle tensioni residue), nel momento in cui il componente viene staccato dai supporti, è consigliata l'esecuzione del così detto "stress relieving", che per le leghe di alluminio consta in 2 ore nel forno a 300°C. Altri trattamenti tipici sono quelli finalizzati all'ingrossamento dei grani cristallini con conseguente aumento della duttilità e deformabilità del componente, essi al contrario prevedono il raggiungimento di temperature nell'intorno dei 500°C per un periodo di tempo compreso tra le 4 e 5 ore.

La separazione del pezzo dalla piattaforma di lavoro, in base al materiale, allo spessore e al quantitativo dei supporti può essere eseguita in diversi modi: a mano con l'ausilio di utensili specifici, meccanicamente con una sega a nastro oppure tramite elettroerosione a filo.

In coda al ciclo produttivo additivo di componenti metallici vi si trovano le operazioni di finitura superficiale. Con tale termine si riassumono tutti quei trattamenti che vanno ad agire sulle superfici esterne con il preciso scopo di migliorarne la qualità estetica e la resistenza a fatica oppure di consentire un corretto accoppiamento con altri componenti. Per adempiere al primo di questi scopi, si è soliti eseguire operazioni di pallinatura e/o sabbiatura; la differenza sostanziale tra esse è la geometria del materiale

che viene proiettato sul componente, nel caso di pallinatura la geometria è pressoché sferica mentre per quanto riguarda la sabbiatura i grani presentano una forma libera, generando così delle impronte più o meno regolari e quindi una superficie del componente più o meno rugosa. La rifinitura di superfici o fori di accoppiamento invece è affidata ai centri di controllo numerici, che avendo una tolleranza di un ordine di grandezza superiore rispetto ai macchinari additivi (centesimo di millimetro per i CNC rispetto al decimo di millimetro delle tecniche AM) permettono di innalzare la qualità del componente, prevenendo errori geometrici. Per quanto detto, in sede di progettazione è pratica comune prevedere un sovrametallo dell'ordine di qualche millimetro per poi consentire ai CNC di poter lavorare il pezzo, senza alterarne le dimensioni.

4.2. Utilizzo della EOS M290

La macchina oggetto dello sviluppo dei parametri di processo è stata la EOS M290 presente al Centro Additive, all'interno dello stabilimento Prototypes di FCA. Di seguito ne vengono quindi proposte le caratteristiche.

| Eos M290 | |
|---|----------------|
| Volume di stampa [mm] | 250x250x325 |
| Sorgente energetica | Yb-Fibra laser |
| Potenza Laser [W] | 400 |
| Ottica | F-Theta-lens |
| Velocità di scansione max [m/s] | 7,0 |
| Diametro del focus [μm] | 100 |
| Potenza consumata | Max 8,5 kW |
| Gas inerte | Azoto |

Tabella 4.1

▪ CREAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

Per il caso in esame, come software di modellazione CAD, si è scelto di utilizzare Rhinoceros 6. Tuttavia sarebbe stato anche possibile generare tale geometria anche con software non specifici, in quanto essa era estremamente banale. Nel dettaglio si sono creati cilindri di altezza 100 mm, di diametro 13mm e cubi di lato 10mm. La scelta di assegnare tale forme è dovuta al fatto che si volevano eseguire le analisi di laboratorio su provini stampati nel piano XY della macchina. Così facendo tutta la superficie sottostante ha necessitato di essere supportata e di conseguenza anche di essere rifinita prima delle prove di trazione. Visto e considerato che comunque sarebbe dovuta essere processata dal tornio per la rimozione dei supporti e la rifinitura della superficie si è scelto di stampare una forma cilindrica e di delegare al centro di lavoro l'esecuzione della geometria ad osso di cane tipica dei provini di trazione. Mentre i cubetti sono stati utilizzati sia per l'analisi di densità che di durezza che ancora per uno studio micrografico.

▪ GENERAZIONE DELL'STL E ORIENTAZIONE DI MACCHINA

Rhinoceros è stato utilizzato anche per la discretizzazione del modello matematico CAD nel formato STL. Il file così ottenuto è stato successivamente processato con un software specifico per l'additive manufacturing: Materialise Magics. Materialise è un'azienda belga che è nata agli inizi degli anni 90 e si è subito interessata al mondo della stampa 3D fino ad arrivare ad essere leader mondiale nel mercato software. Numerose sono le operazioni consentite da tale programma, nel dettaglio esso permette la preparazione dei dati, l'editing, la conversione dei file nel formato STL, la correzione di eventuali errori e la preparazione della piattaforma di produzione.

Nel caso in esame, le potenzialità computazionali di Magics sono state utilizzate sia per il posizionamento in macchina dei 17 provini cilindrici (e dei relativi cubetti) che per la generazione dei supporti. Supporti la cui presenza era necessaria visto e considerato che si è scelto di far accrescere i componenti non lungo la direzione assiale del cilindro, bensì lungo quella radiale. I motivi di tale scelta sono sostanzialmente due: innanzitutto si voleva assicurare ai prodotti le migliori caratteristiche meccaniche,

ed è infatti risaputo che la direzione XY fosse quella massimizzante e in secondo luogo operando una scelta di questo tipo è stato possibile ridurre drasticamente i tempi di produzione, in quanto il job raggiungeva solo i 19.02 mm di altezza. Inoltre si è preferito non utilizzare i supporti generati automaticamente dal software, ma quelli sviluppati e progettati da FCA e che vengono quotidianamente utilizzati nei processi produttivi dell'AlSi10Mg. I parametri che permettono di definire la tipologia di supporti vengo di seguito esposti:

- ✓ L'Hatching permette di definire le dimensioni che avranno le singole celle che compongono la struttura supportante, in questo caso: X Hatching = 0,70 mm e Y Hatching = 0,70mm. Si consiglia inoltre di rotare l'intero motivo di alcuni gradi al fine di rendere l'impatto con il recoter più graduale possibile [11].
- ✓ La Fragmentation è un parametro particolarmente importante perché se settato nel modo corretto può facilitare o meno la rimozione dei supporti. Esso raggruppa le celle elementari create con l'hatching in blocchi. La dimensione di questi blocchi dovrebbe essere 8 o 9 volte la grandezza in una singola cella elementare e la distanza tra due blocchi pari proprio all'hatching. Si riporta un'immagine chiaritrice [11].

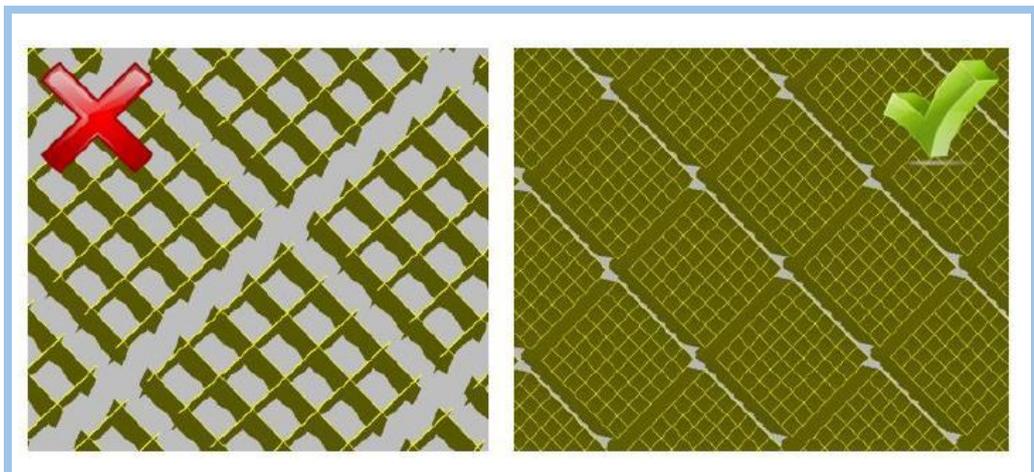


Figura 4.4

- ✓ Perforations, determinano gli spessori dei supporti, gli angoli caratteristici e l'altezza degli stessi. L'immagine sottostante, se pur non appartenente all'ambiente Magics, è proposta per fini illustrativi e per facilitare la comprensione. Si precisa, inoltre, che i valori leggibili sono uguali a quelli effettivamente utilizzati [11].

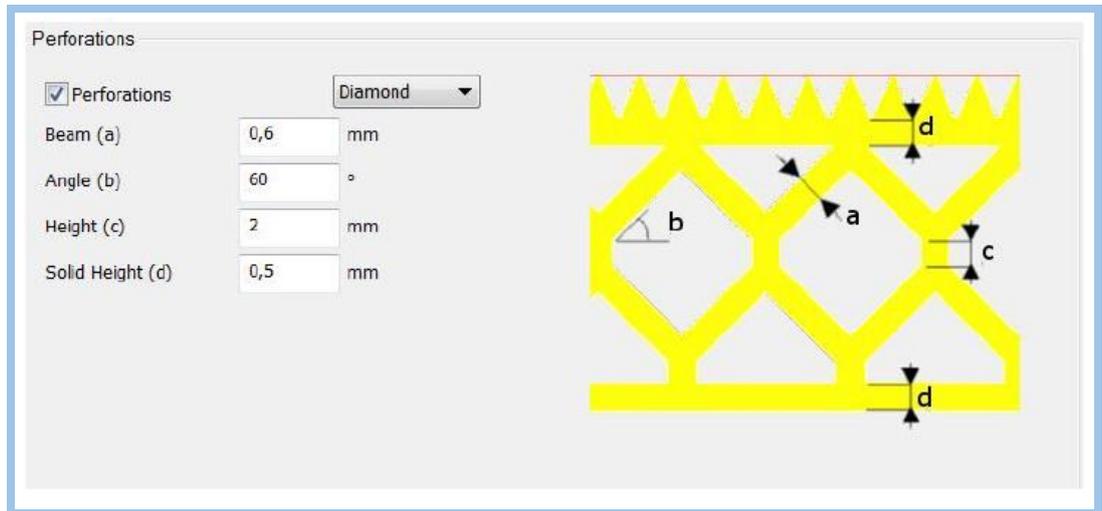


Figura 4.5

- ✓ Hatching theet, hanno un ruolo duale: facilitare la rimozione dei supporti dalla superficie del componente a cui aderiscono e allo stesso tempo devono assicurarne l'ancoraggio. È possibile scegliere l'altezza di ciascun dente, e se il singolo dente viene inteso come un trapezio si possono determinare le dimensioni dei lati maggiori e minori, oltre che della distanza tra un dente e l'altro [11].

| Altezza dente [mm] | Lato corto [mm] | Lato lungo [mm] | Distanza tra due denti [mm] |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| 1.5 | 0.1 | 0.9 | 0.1 |

Tabella 4.2

- SLICING E SETTAGGIO DEI PARAMETRI DI PROCESSO

È pratica comune quella di eseguire lo slicing dei supporti e del componente in due momenti diversi. In particolare si esegue lo slicing dei supporti sfruttando lo stesso software che si è usato per crearli, ovvero Magics; mentre la divisione in piani paralleli della parte viene eseguita con un software specifico dell'azienda produttrice. Nel caso in esame essendo il macchiano marchiato EOS, si ha a disposizione l'intera suite di programmi: EOSTATE – EOSPRINT – RPTOOL. RpTool viene in aiuto in situazioni di questo genere, ovvero serve per eseguire lo slicing del componente e solo successivamente la matematica così modificata potrà essere processata dal programma EOSPRINT che consentirà la definizione dei parametri di processo.

Per l'obiettivo di ottimizzazione multi parametrica che ci si è fissato con questo lavoro di tesi, la fase di definizione dei parametri di processo risulta essere di primaria importanza. Infatti, nel corso di questa operazione vengono impostati tutte quelle combinazioni parametriche che sono state suggerite dal DOE. Si precisa, inoltre che durante tutte le prove si è scelto di mantenere costanti sia lo spessore di ciascuno strato, $\Delta S = 0.60 \mu m$ sia la temperatura della piattaforma di lavoro pari a 165 °C.

L'immagine riportata alla seguente pagina riassume tutte le operazioni svolte fino a questo punto, consentendo di apprezzare sia il posizionamento dei provini, sia i parametri con cui essi sono stati prodotti. A ciascun provino è stato inoltre assegnata una matricola permettendo quindi, di ricondurlo al setting che lo caratterizza.

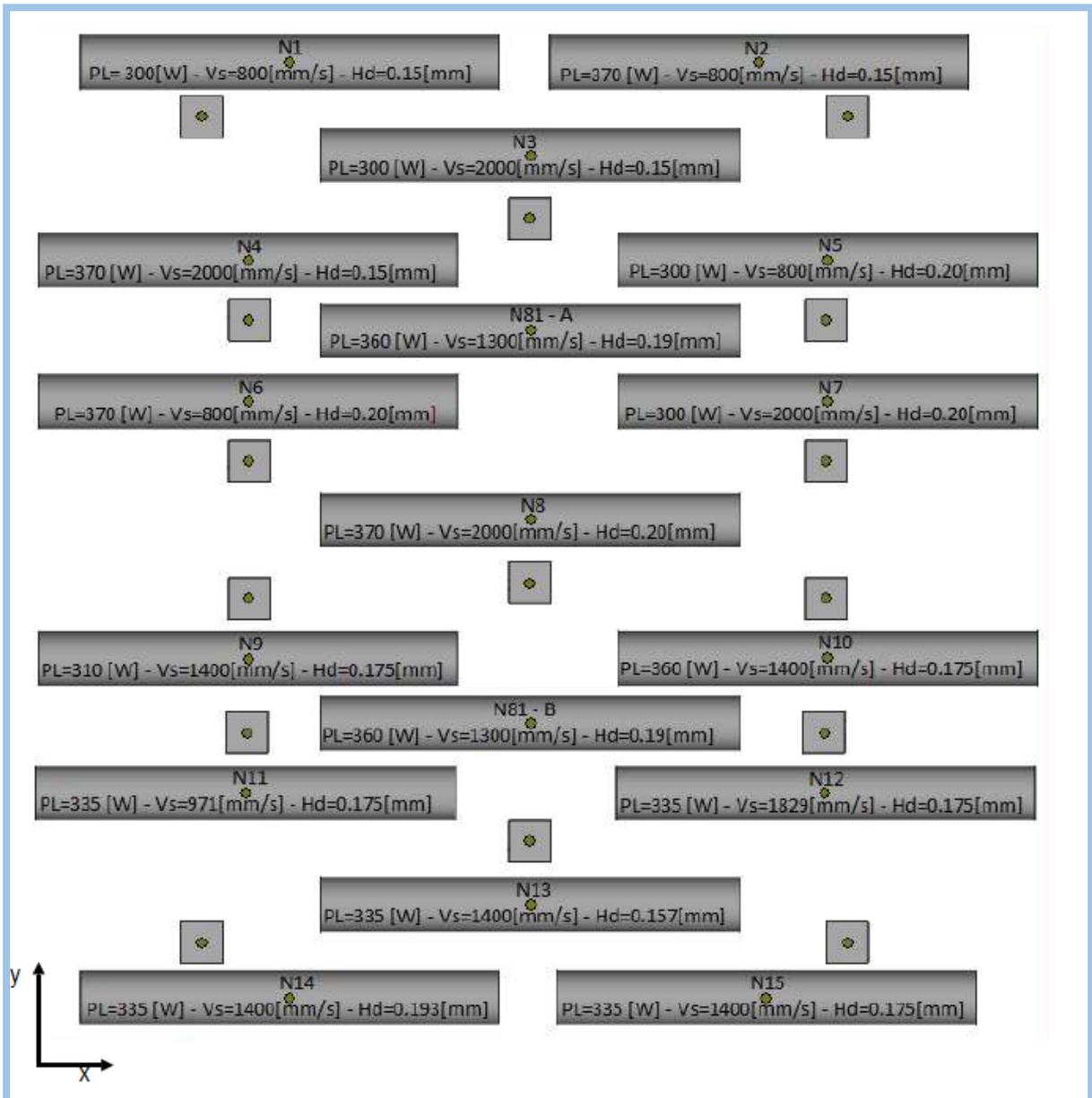


Figura 4.6

- PRODUZIONE DEL COMPONENTE E POST PROCESSING

Del job così impostato è stato avviato il processo di stampa. Dopo circa 30 layer processati, corrispondenti ad un'altezza pari a 1.8 mm e quindi mentre era ancora in corso la formazione dei supporti (pari ad un'altezza di 5 mm) il provino numero 14 e il suo relativo cubetto andavano ad impattare contro la racla a causa di un innalzamento dello strato che si era appena solidificato. La racla a seguito dell'urto iniziava a vibrare

causando una non omogenea stesura del letto di polvere. Era, infatti, possibile apprezzare delle increspature sullo strato di polvere appena stesa, parallele alla racla stessa (di questa particolare problematica si è discusso ampiamente nel CAPITOLO 2). Al fine di non compromettere la corretta produzione degli altri provini si è scelto di annullare la fusione del componente N°14 e 14c.

Passato un certo lasso di tempo si è presentato un problema analogo a quello appena descritto per quanto concerne i provini N°5 e N°6 e il loro rispettivi cubetti N°5c e 6c. In questo caso, tuttavia, si era arrivati ad un'altezza del job pari a circa 6 mm, quindi la costruzione dei supporti era ormai ultimata e le sezioni che presentavano un sollevamento di materiale erano relative al componente vero e proprio.

| PARAMETRI DI PROCESSO KO | | | | |
|--------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|----------------------------------|
| Provino | Potenza Laser [W] | Hatch Distance [mm] | Velocità [mm/s] | Fluenza [W/(mm ³ /s)] |
| 5 | 300 | 0,20 | 800 | 31,25 |
| 6 | 370 | 0,20 | 800 | 38,54 |
| 14 | 335 | 0,193 | 1400 | 20,66 |

Tabella 4.3

La causa di tale difetto nel processo è sicuramente da attribuire a parametri di processo non appropriati per il materiale presente in macchina, d'altronde si sta conducendo uno studio che porta ad esplorare un ampio range di parametri, con le conseguenze che ne derivano. Un fallimento di produzione è altresì un importante risultato di cui tener conto e memoria, pertanto si riportano nella tabella qui di seguito i setting parametrici che hanno causato questo esito.

La restante parte dei provini non ha riscontrato particolari problematiche. Terminato il processo di produzione additivo, durato 6 ore e 52 minuti e rimosso tutto il materiale che non ha preso parte al processo si è potuto constatare come i componenti e i relativi supporti non presentassero alcuna anomalia riscontrabile ad occhio nudo. Inoltre, visto e considerato che nel Design Of Experiment si era impostato un piano di prove

sperimentali con due ripetizioni, questo al fine di esplorare anche eventuali errori di ripetibilità, il job è stato rilanciato una seconda volta.

Ebbene terminato anche il secondo lancio, dopo una aver soffiato la polvere in eccesso e dopo un'operazione di pallinatura i provini si presentavano come rappresentato nelle fotografie sottostanti:

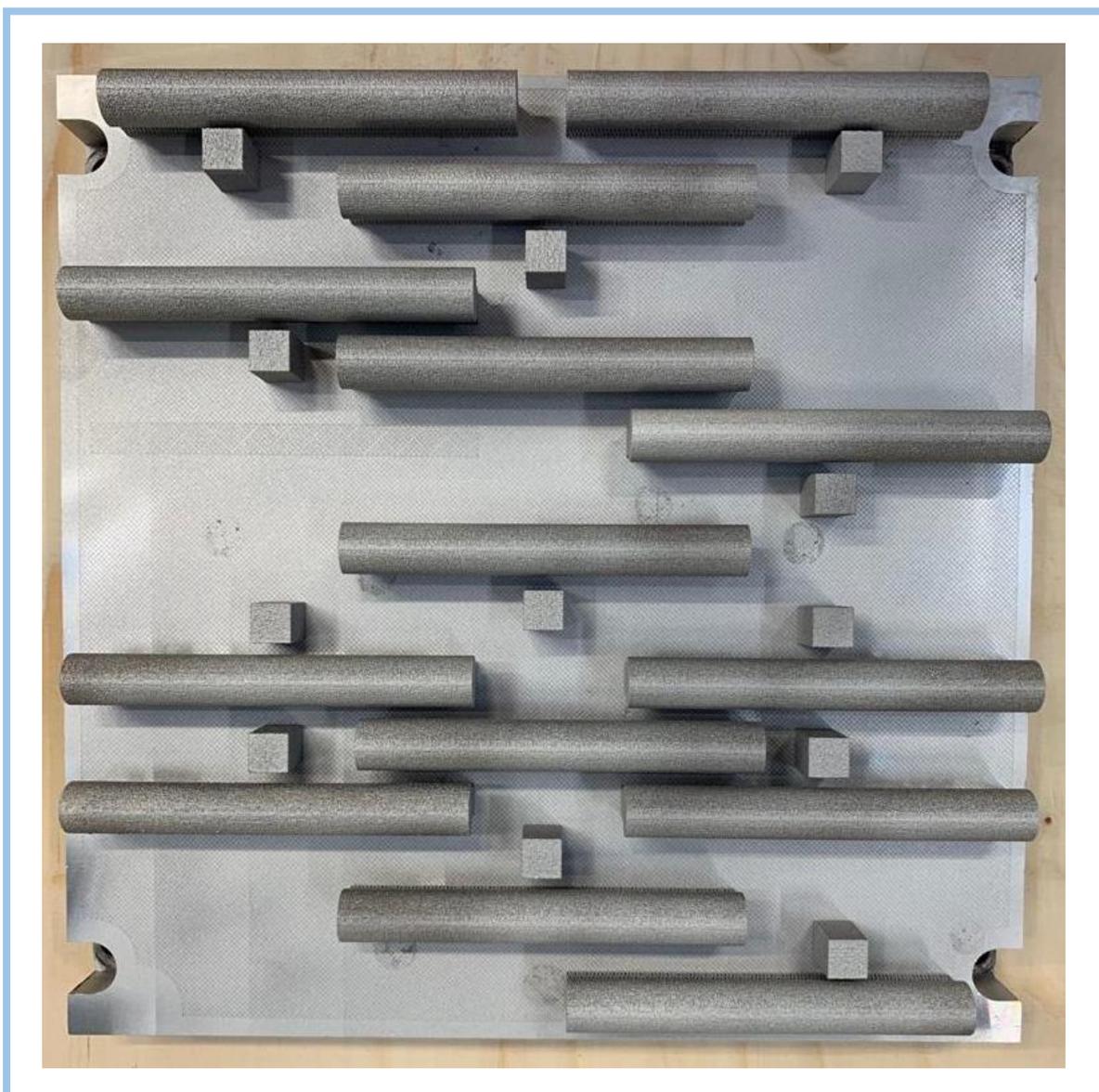


Figura 4.7

Questa particolare fotografia è relativa al secondo lancio, infatti memori delle problematiche avute con i provini N°5-6-14 si è scelto di non avviare proprio la loro produzione. Pertanto se si confronta la 4.6 con questa si possono apprezzare delle zone della piastra vuote, zone in cui dovevano appunto essere prodotti quei tre provini.



Figura 4.8

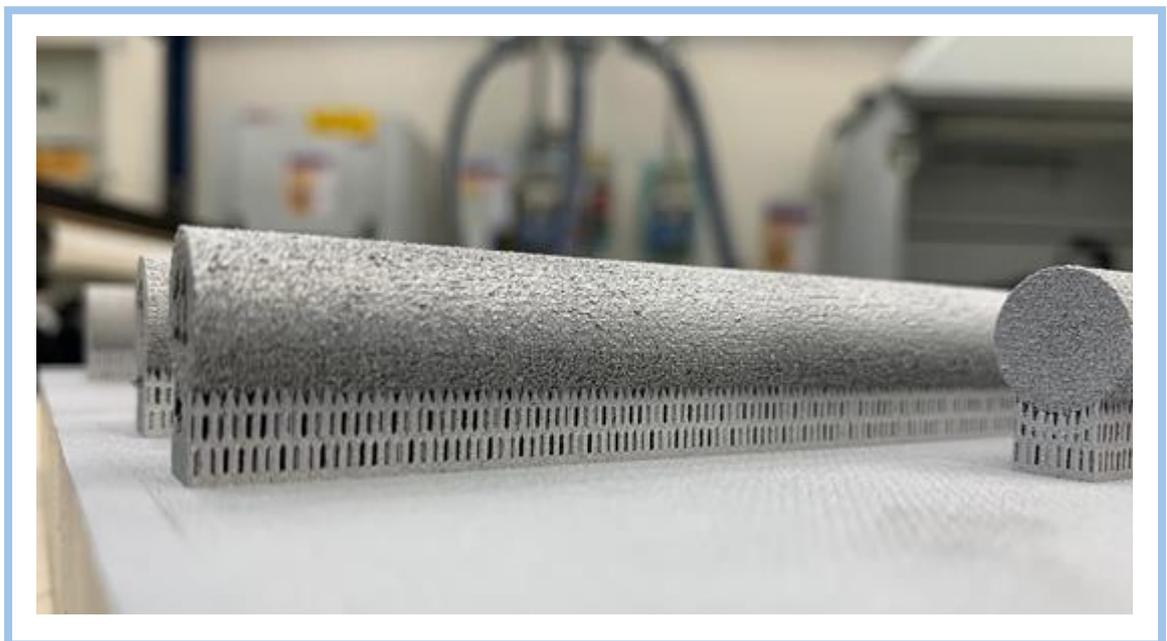


Figura 4.9

Nel dettaglio si può apprezzare la finitura superficiale e la geometria dei supporti.

L'altezza dei supporti pari a 5mm ha permesso di consentire di poter staccare tutti i provini dalla piattaforma di lavoro mediante una sega a nastro senza compromettere la loro integrità, mentre la rimozione delle strutture supportanti direttamente ancorati sui componenti è stata eseguita a mano con una tronchese. A questo punto il materiale così prodotto è stato affidato al reparto tornitura che ha conferito ad essi la geometria ad osso di cane, tipica dei provini che vengono sottoposti a prove di trazione e la filettatura necessaria per l'afferraggio. La messa in tavola della geometria e il risultato finale a cui si è pervenuto sono riportati qui di seguito.

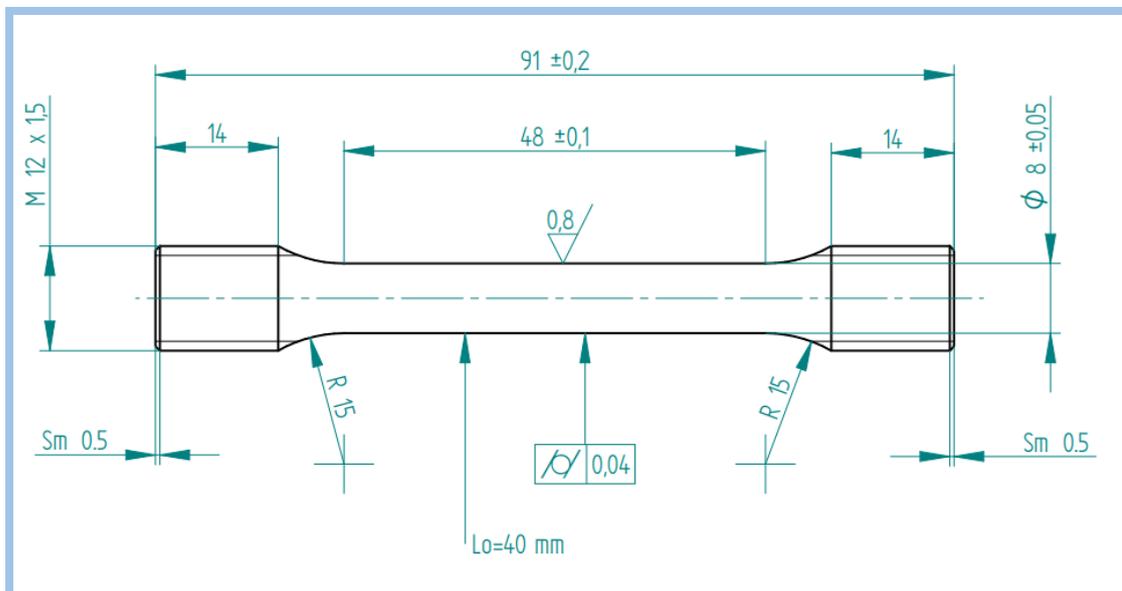


Figura 4.10



Figura 4.10

CAPITOLO 5 - ANALISI DI LABORATORIO

Al fine di andare a caratterizzare i provini che sono stati prodotti con gli accorgimenti esposti sino a questo punto, è stato necessario eseguire tutta una serie di analisi di laboratorio, ciascuna delle quali ha evidenziato una specifica proprietà del componente. Questo capitolo è quindi finalizzato a descrivere le procedure che sono state condotte, le attrezzature utilizzate e infine i risultati ottenuti. Nel dettaglio, si è scelto di eseguire:

- Misurazione della densità;
- Determinazione della durezza;
- Prove di trazione;
- Analisi micrografiche con microscopio ottico.

Un piano di prove sperimentali così fatto è figlio del compromesso tra il periodo di permanenza in azienda del tesista, determinando quindi un limite temporale, e del budget messo a disposizione per l'intero sviluppo di processo.

5.1. Misura della densità

Riuscire a determinare la densità del componente che si è prodotto risulta essere di fondamentale importanza, poiché essa sarà un indice indicativo non solo della porosità e quindi della percentuale di vuoti all'interno del pezzo, ma anche delle prestazioni meccaniche che esso avrà. È facilmente deducibile, infatti, che in base all'utilizzo finale che sarà fatto si preferirà avere una presenza più o meno importante di vuoti all'interno di un componente. A titolo di esempio, se è necessario avere un elemento con un coefficiente di scambio termico particolarmente basso (per fini coibentanti) un livello di porosità maggiore sarà sicuramente vantaggioso. Diverso invece sarebbe il discorso se il componente finale dovesse reggere stress meccanici importanti, che certamente non possono essere ben sopportati da una struttura altamente porosa.

Per la misura di densità ci si è recati presso i laboratori del Global Materials Labs (GML) in corso Settembrini, Mirafiori – Torino. L'analisi è stata svolta sui cubetti di dimensioni $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ che sono stati stampati in accoppiamento con i provini

cilindrici. La prova in questione non è distruttiva e permette la misurazione di particolari di cui è complicato o addirittura impossibile stimarne con elevata precisione il volume, essa si basa sul principio di Archimede: ogni corpo immerso parzialmente o completamente all'interno di un liquido riceve una spinta verticale, dal basso verso l'alto uguale per intensità al volume del fluido spostato [12].

Attrezzatura utilizzata:

- ✓ Bilancia analitica Kern ADB, con una sensibilità del decimo di milligrammo (0.1 mg), fondoscala parti a 210 g e gabbia termica antivento.
- ✓ Gabbia metallica per l'immersione del pezzo in acqua.
- ✓ Becher.
- ✓ Termometro.
- ✓ Acqua distillata.

Metodologia:

Il componente di cui si vuole calcolare la densità va prima di tutto pesato in aria, successivamente lo si immerge completamente all'interno del becher contenente acqua distillata facendo attenzione che il pezzo non tocchi il fondo, a tale scopo viene appunto in aiuto la gabbia metallica. Ottenuto il peso del pezzo immerso nel liquido, si opera come segue:

$$Densità = \frac{P_{aria}}{Spinta} \cdot \rho_{H_2O}$$

Dove:

- P_{aria} è il peso del componente in aria;
- $Spinta$ è pari a alla differenza tra il peso del componente in aria e quello in acqua;
- ρ_{H_2O} è la densità dell'acqua distillata alla temperatura rilevata.

Si riporta quindi un immagine raffigurante l'esecuzione della prova:

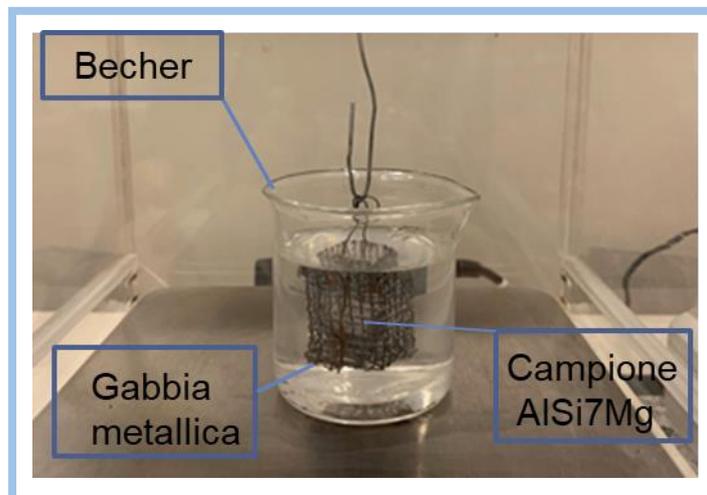


Figura 5.1

I risultati così ottenuti sono riportati nella tabella 5.1 e sono stati espressi anche in termini di percentuale, avendo preso come valore nominale della densità della lega AlSi7Mg 2.70 g/cm^3

| ANALISI DI DENSITA' | | | | |
|---------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | JOB N°1 | | JOB N°2 | |
| Provino | Peso Specifico [g/cm ³] | Densità % | Peso Specifico [g/cm ³] | Densità % |
| 1 | 2.67 | 98,7% | 2,67 | 98,7% |
| 2 | 2.70 | 100% | 2,69 | 99,7% |
| 3 | 2.52 | 93,2% | 2,52 | 93,2% |
| 4 | 2.62 | 97,1% | 2,63 | 97,5% |
| 7 | 2.35 | 87,2% | 2,35 | 87,7% |
| 8 | 2.55 | 94,5% | 2,54 | 94,2% |
| 9 | 2.63 | 97,5% | 2,64 | 97,8% |
| 10 | 2.67 | 98,3% | 2,66 | 98,6% |
| 11 | 2.65 | 98,2% | 2,66 | 98,5% |
| 12 | 2.56 | 94,9% | 2,55 | 94,4% |
| 13 | 2.69 | 99,6% | 2,70 | 100% |
| 15 | 2.66 | 98,4% | 2,65 | 98,1% |
| 81-A | 2.60 | 96,3% | 2,60 | 96,3% |
| 81-B | 2.62 | 97,0% | 2,61 | 96,7% |

Tabella 5.1

Di particolare interesse risultano, quindi, essere i provini che hanno fatto registrare i valori estremi, in particolare: il N°2 e il N°13 sono equivalenti o prossimi al valore di densità nominale, mentre il N°7 è quello che ha evidenziato la percentuale di vuoti più elevata di tutti.

5.2. Misura della durezza

La durezza H (hardness) è per definizione la resistenza che la superficie di un materiale oppone alla sua penetrazione. Essa è sì una condizione necessaria affinché il componente metallico possieda le caratteristiche definite in sede di progettazione, bensì non sufficiente. Più esplicitamente: se il componente possiede un valore di durezza minore di quello stabilito, certamente non risulterà idoneo; ma allo stesso tempo se esso lo equivale o lo supera non è certo che le altre sue caratteristiche meccaniche siano conformi a quanto richiesto dal progettista.

La durezza di un componente è anche indice della resistenza all'abrasione, all'incisione, al taglio e anche alla corrosione. Per tale motivo vi sono svariate metodologie che permettono di valutare la durezza di un pezzo, di seguito se ne propone una delle tante classificazioni:

- **PROVE STATICHE**

Esse si basano sulla misura delle dimensioni dell'impronta lasciata sulla superficie del campione da un penetratore adeguatamente caricato. Brinell, Vickers, Rockwell e Knoop sono analisi di durezza che appartengono a questa classe. Esse si differenziano in base alla tipologia di penetratore utilizzato, per i valori di carico applicato e infine anche per la tecnica che viene utilizzata per rilevare la dimensione dell'impronta lasciata [13].

- **PROVE DI RIMBALZO**

Esse sono caratterizzate dalla presenza di un oggetto di massa e dimensioni ben definite che viene lasciato cadere in modo controllato sulla superficie, la durezza sarà funzione dell'altezza del rimbalzo. È evidente come superfici più dure consentiranno

all'oggetto urtante, di rimbalzare maggiormente, in quando l'assorbimento di energia per deformazione plastica sarà minima. Le prove di durezza sclerometriche Shore appartengono a questa determinata classe [13].

▪ ALTRE PROVE

Degne di citazione sono anche quelle prove per le quali la durezza viene valutata ponendo due corpi di materiali differenti (uno duro e l'altro tenero) a contatto e si va a constatare l'incisione lasciata sulla superficie. A tale classe appartiene la così detta "prova alla lima" [13].

Per quanto concerne invece le prove sclerometriche, esse si eseguono tramite un utensile (generalmente di diamante ed adeguatamente caricato), che viene trascinato sulla superficie di cui si vuole valutare la durezza, con velocità costante. Per avere un'indicazione della durezza si misura, quindi, l'ampiezza del solco lasciato [13].

Le prove di smorzamento sono caratterizzate dalla misura dell'ampiezza di oscillazione di un pendolo, appositamente attrezzato con un perno duro. Tale perno sfregato sulla superficie del provino, diminuirà la sua energia cinetica e di conseguenza l'angolo della sua oscillazione. Es. pendolo di Herbert [13].

Degne di nota risultano essere anche le prove d'abrasione, durante le quali la superficie del pezzo da valutare striscia, sotto un carico adeguatamente definito, contro un disco rotante. La durezza sarà funzione dell'usura che si riscontra [13].

Di questo ampio ventaglio di prove sperimentali disponibili, si è scelto per questo lavoro di tesi di eseguire la prova di durezza Brinell a causa della sua rapidità e semplicità di esecuzione e non da meno dalla natura economica della prova stessa. Anche questa analisi è stata eseguita presso i laboratori del Global Materials Labs (GML) in corso Settembrini, Mirafiori – Torino.

Attrezzatura:

- ✓ Durometro certificato da Accredia;
- ✓ Spessimetro 0,1 mm

Metodologia:

Innanzitutto si precisa che nel corso della prova si è utilizzato un penetratore di testa sferica del diametro di 1 mm. Tale dimensione è stata appositamente scelta in funzione della grandezza del provino da testare, esso infatti avendo geometria cubica di lato 10mm, necessitava di un penetratore dalle dimensioni ridotte. Così facendo è stato possibile ripetere la misurazione 5 volte sulla faccia corrispondente al piano XY e 5 volte su quella del piano XZ (si fa riferimento alle coordinate macchina in cui il pezzo è stato prodotto). Si è cercato, inoltre, di distribuire le ripetizioni sull'intera superficie: ispirandosi alla distribuzione dei pallini della faccia numero cinque di un dado.

Il materiale del penetratore è tungsteno, esso è stato posto a contatto con la superficie del provino per un tempo pari a 10s sotto un carico costante pari a 10kg; si specifica inoltre che al fine di una corretta esecuzione della prova il carico non deve essere impulsivo ma graduale nell'applicazione e costante durante tutto il periodo di tempo previsto. Rimosso il penetratore si è andati a misurare, tramite microscopio, la dimensione dell'impronta lasciata, che risultava avere una forma pressoché circolare. Si è proceduto, quindi, con la determinazione dei due diametri maggiori e perpendicolari tra loro. Per quanto descritto si intuisce che tale prova deve essere eseguita su provini con superfici lucide e piate; inoltre è necessario assicurarsi che il penetratore, o l'impronta lasciata da esso, non raggiunga la superficie opposta; lo spessore minimo consentito è pari ad almeno otto volte la profondità dell'impronta stessa. Per una corretta esecuzione di questo tipo di analisi è necessario non praticare due misurazioni troppo ravvicinate tra loro né tantomeno troppo vicine al bordo, in quanto la deformazione plastica indotta nel materiale da una precedente impronta o dalla natura stessa di un bordo potrebbe andare a falsare la misurazione [13].

Determinati, così, i due diametri principali si è calcolata la durezza Brinell per mezzo della seguente equazione, che è appunto funzione del carico applicato e della grandezza dell'impronta:

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Formula 5.1

Dove:

- F è il carico applicato in *Kg*;
- D è il diametro della sfera del penetratore utilizzato in *mm*;
- d è la media dei due diametri valutati sperimentalmente, espresso in *mm*.

I risultati medi così ottenuti sono riportati nell'istogramma 5.2 e 5.3. Il motivo dell'aver eseguito le misurazioni sia sul piano XY che su quello XZ è da ricercare nella natura della tecnologia additiva, ovvero: andando ad aggiungere materiale strato per strato essa potrebbe generare nel componente delle direzioni preferenziali di deformazione.

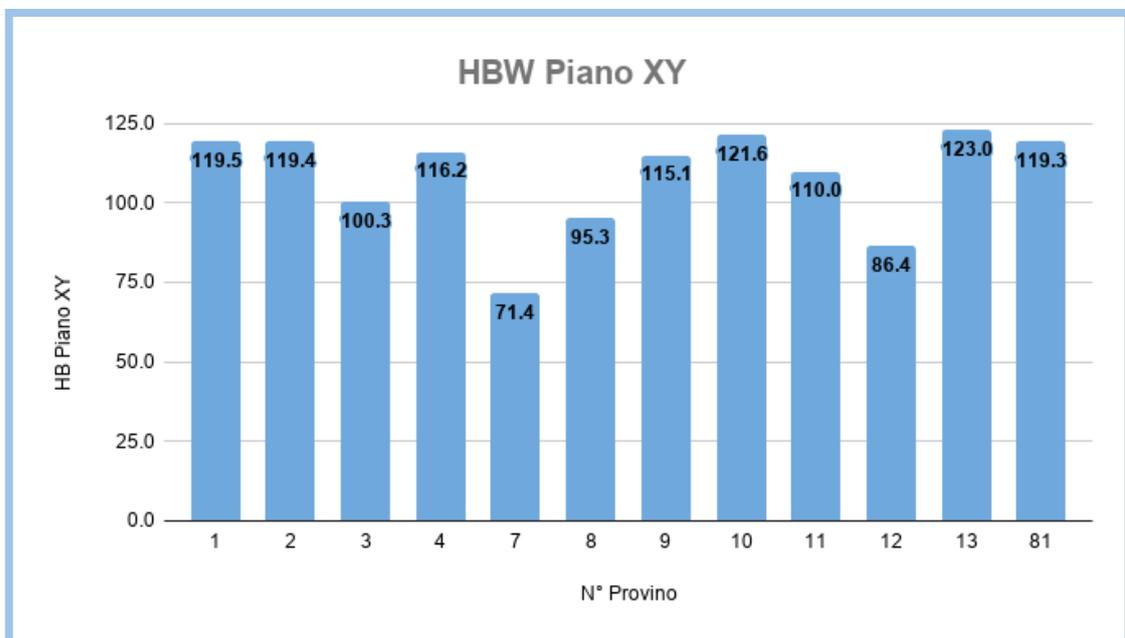


Figura 5.2

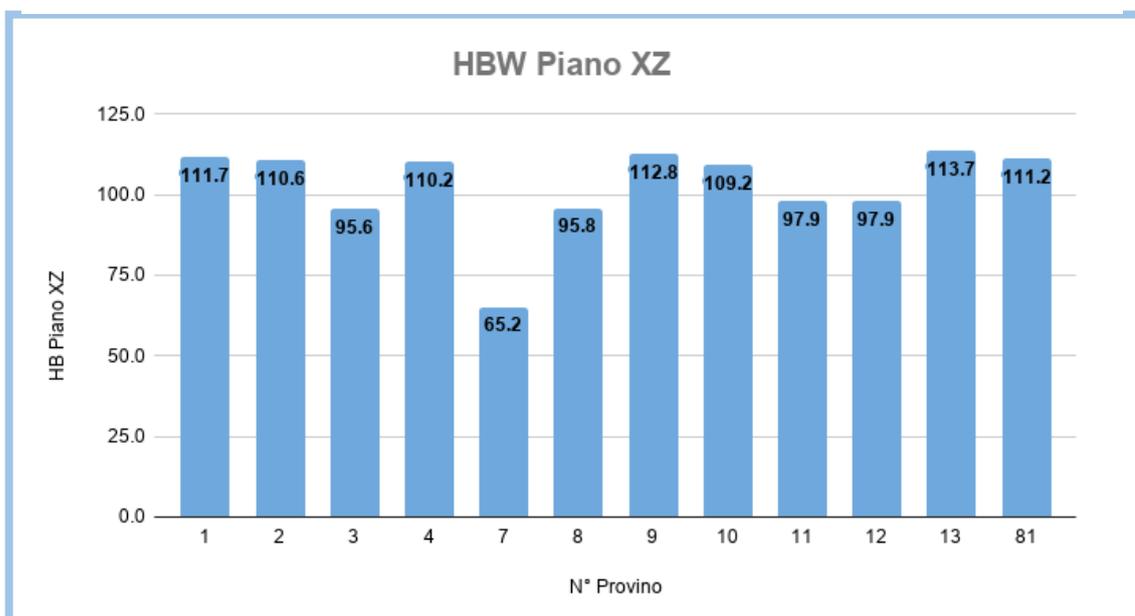


Figura 5.3

È interessante notare, come così accennato sopra, che le prestazioni meccaniche in termini di durezza del materiale risultino leggermente migliori lungo il piano XY, ovvero quello perpendicolare alla direzione di accrescimento del pezzo, rispetto alla durezza del piano parallelo alla direzione di crescita XZ. Il risultato ottenuto è assolutamente in linea con la teoria, in quanto andando a “schiacciare” i vari layer essi avranno una resistenza maggiore rispetto a quella che sono in grado di opporre all’applicazione di una forza che tende a farli scorrere l’uno sull’altro.

I provini che hanno fatto registrare risultati di spicco sono anche in questo caso il N°7 peggiore e il N°13 migliore.

Si conclude il paragrafo mostrando alcune immagini del durometro utilizzato e dell’impronta vista al microscopio.

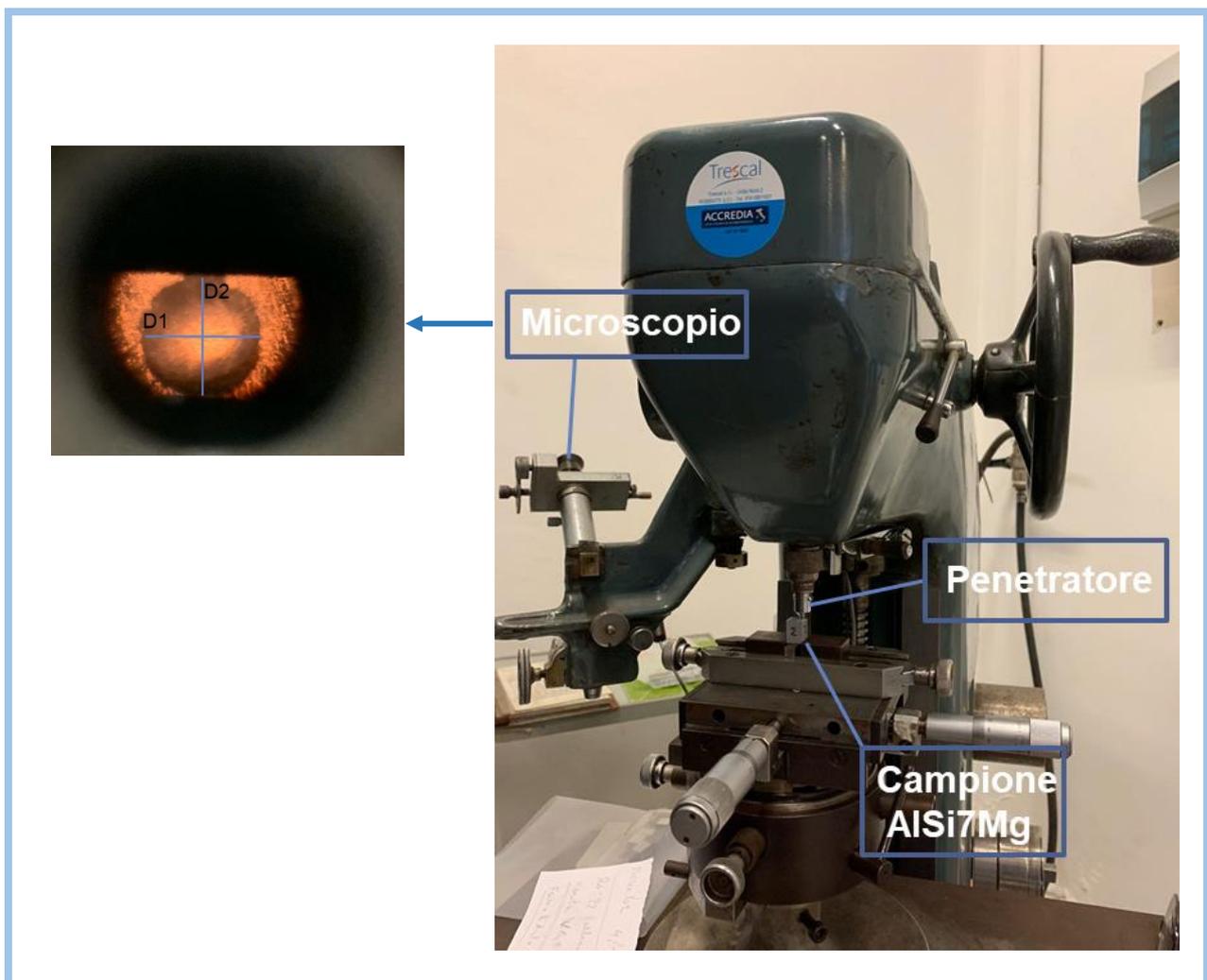


Figura 5.4

5.3. Prova di trazione

Visto e considerato che si è scelto di basare l'ottimizzazione multiparametrica sul carico di snervamento, sul carico a rottura, sull'allungamento percentuale, sul modulo elastico e sulla densità caratteristici di ciascun provino, una delle analisi di maggiore interesse risulta certamente essere la prova di trazione.

La geometria dei provini è stata ottenuta, come illustrato, nella fase di post processing del ciclo di produzione additive, ma è bene individuarne delle caratteristiche così da meglio comprendere l'esecuzione della prova stessa. Ebbene è possibile distinguere all'interno della stessa alcune dimensioni:

- ✓ La lunghezza del tratto utile, corrispondente alla lunghezza iniziale di riferimento L_0
- ✓ La lunghezza della così detta parte centrale calibrata, ovvero da raggio di raccordo a raggio di raccordo L_c .
- ✓ Il diametro del tratto calibrato corrisponde la sezione iniziale della provetta, designata con la dicitura S_0 .
- ✓ Le teste di serraggio, la cui forma e dimensioni sono dipendenti dal tipo di macchinario di trazione che si intende utilizzare, esse devono infatti assicurare un solido afferraggio tra le ganasce.

L'immagine sottostante permette di meglio individuare tali dimensioni:

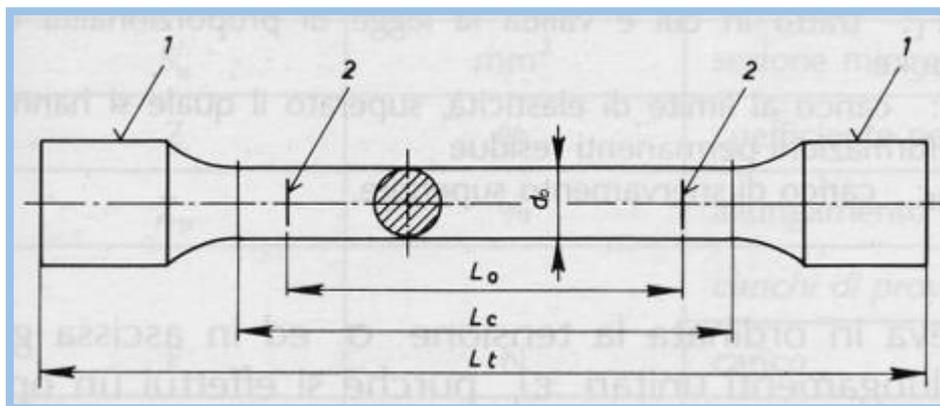


Figura 5.5 [14]

La prova di trazione è stata eseguita dal tesista sotto la supervisione del tecnico di laboratorio, presso i laboratori del Centro Ricerche Fiat.

Attrezzatura:

- ✓ Macchina per prova di trazione idraulica dell'azienda tedesca Zwick – Roell
- ✓ Truschino graduato della Mitutoyo con un fondoscala pari a 300 mm

Metodologia:

Come prima operazione è stato necessario andare a individuare sulla parte calibrata della provetta il così detto “tratto utile”. Gli estremi di tale tratto hanno permesso di determinare la posizione degli estensimetri e di calcolare l'allungamento/deformazione subita dal provino. Si è svolta tale operazione tramite il Truschino graduato, che assicura una precisione del centesimo di millimetro e la possibilità di “segnare” la provetta. Si specifica, tuttavia, che i segni devono essere solo delle piccole incisioni e non dei veri e propri intagli dato che essi potrebbero andare a provocare delle rotture premature; inoltre l'operazione di tracciatura deve essere eseguita all'interno di una camera con temperatura e umidità controllate. Nel caso in esame si è scelto di applicare un metodo proporzionale, ovvero la lunghezza del tratto utile è appunto proporzionale al diametro della sezione calibrata, essendo il diametro pari a 8 mm, allora L_0 sarà pari a 40mm.

La fotografia sottostante è rappresentativa dell'operazione appena descritta



Figura 5.6

A questo punto si è fissata la provetta alle ganasce, rispettivamente a quella del basamento e quella della traversa di lavoro. Il macchinario utilizzato disponeva di una movimentazione oleodinamica dei componenti mobili e quindi il processo di trazione ha seguito la seguente logica: prima di tutto si avvia la pompa che a permette la movimentazione dell'olio presente che quindi consente al pistone di muoversi verso l'alto, tale movimento determina il sollevamento della traversa di lavoro. Essa tramite i tiranti è in grado di sollevare l'afferraggio superiore e quindi di tirare il provino [14].

L'intero processo viene monitorato dagli estensimetri e dal computer che registra le deformazioni subite dalla provetta, fornendo quindi in tempo reale il grafico della prova appena eseguita.

Prima di iniziare la prova vera e propria si è provveduto ad applicare un precarico pari a 2 MPa con una velocità di 5 mm/min .

Successivamente si è potuto procedere con la trazione. È necessario sottolineare, tuttavia, come le velocità utilizzate durante l'esecuzione della prova sono state due: una più lenta, corrispondente al campo elastico e una maggiore per il tratto plastico della deformazione. Nel campo strettamente elastico, la velocità con cui le traverse si allontanano è determinata dalla seguente relazione:

$$v = 0.00025 \cdot L_C \cdot 60$$

Nel caso in esame essendo $L_C = 48 \text{ mm}$ si ottiene una $v = 0.72 \text{ mm/min}$

Terminato il tratto elastico e passati in campo plastico è possibile imporre una v_2 maggiore che è stata calcolata come segue:

$$v_2 = 0.0015 \cdot L_C \cdot 60$$

Pari quindi a 4.2 mm/min

Conclusa la prova si è ottenuto come output il grafico sforzo-deformazione, del quale si possono distinguere alcune particolari caratteristiche:

- Un tratto elastico: l'applicazione di un carico determina un allungamento proporzionale della provetta, tale tratto sul diagramma è facilmente distinguibile poiché rettilineo. Se si dovesse eliminare il carico la provetta

riacquisterebbe le dimensioni iniziali. L'elasticità è quindi per definizione la proprietà che ha un corpo di deformarsi per effetto di un carico esterno e di riacquistare forma e dimensioni originarie nel caso in cui esso venga meno [14]. In tale tratto è pertanto valida la legge di Hooke, di cui se ne riporta l'espressione alla pagina seguente:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F}{E \cdot S_0}$$

Con:

- ΔL = allungamento elastico calcolato come la lunghezza raggiunta alla fine del campo elastico meno quella iniziale [14].
 - L_0 = lunghezza iniziale del tratto utile [14].
 - S_0 è la sezione trasversale della parte calibrata della provetta, prima di iniziare la prova di trazione [14].
 - F è il carico che è stato applicato dalla macchina durante il campo elastico della prova [14].
 - E è il modulo elastico del materiale costituente la provetta sottoposta all'analisi [14].
-
- Un tratto elasto-plastico: aumentando il carico oltre la soglia elastica le deformazioni che si causeranno nel materiale non saranno più direttamente proporzionali di carichi applicati; pertanto, il diagramma tenderà ad incurvarsi, chiaro segno che gli allungamenti aumentano in modo più rapido rispetto al crescere del carico. In questo tratto gli effetti elastici vanno a sommarsi a quelli permanenti [14].
-
- Tratto plastico: oltre un certo carico l'elasticità posseduta dal materiale va scomparendo e lascia gradualmente spazio alla sola deformazione plastica. In questo tratto finale le distanze interatomiche del reticolo cristallino sono divenute così grandi che anche se si dovesse cessare l'applicazione del carico, gli atomi non sarebbero più in grado di ritornare nella posizione iniziale. In

particolare nel momento in cui il materiale subisce un sensibile allungamento non corrispondente ad alcuna variazione di carico, allora tale valore di carico è detto “carico di snervamento” $R_{P02} = \frac{F}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$. Ovvero il carico corrispondente allo snervamento rapportato alla sezione iniziale. A livello atomico accade che le molecole cominciano a scorrere le une rispetto alle altre, così facendo il materiale continua ad allungarsi fino al punto in cui non si concretizza una orientazione delle molecole in grado di contrastare il carico applicato. La prova continua fino a quando raggiunto un carico massimo esso inizia a diminuire a causa dell’insorgere del fenomeno della strizione. Ovvero la sezione si restringe visibilmente. Tale fenomeno prosegue fino ad arrivare alla rottura del provino. Il carico massimo che è stato supportato durante la prova è detto Carico Unitario di Rottura R_m . Pari a $R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ ovvero il rapporto tra il carico massimo e la sezione iniziale [14].

Viene quindi riportata un immagine rappresentativa della procedura appena descritta:

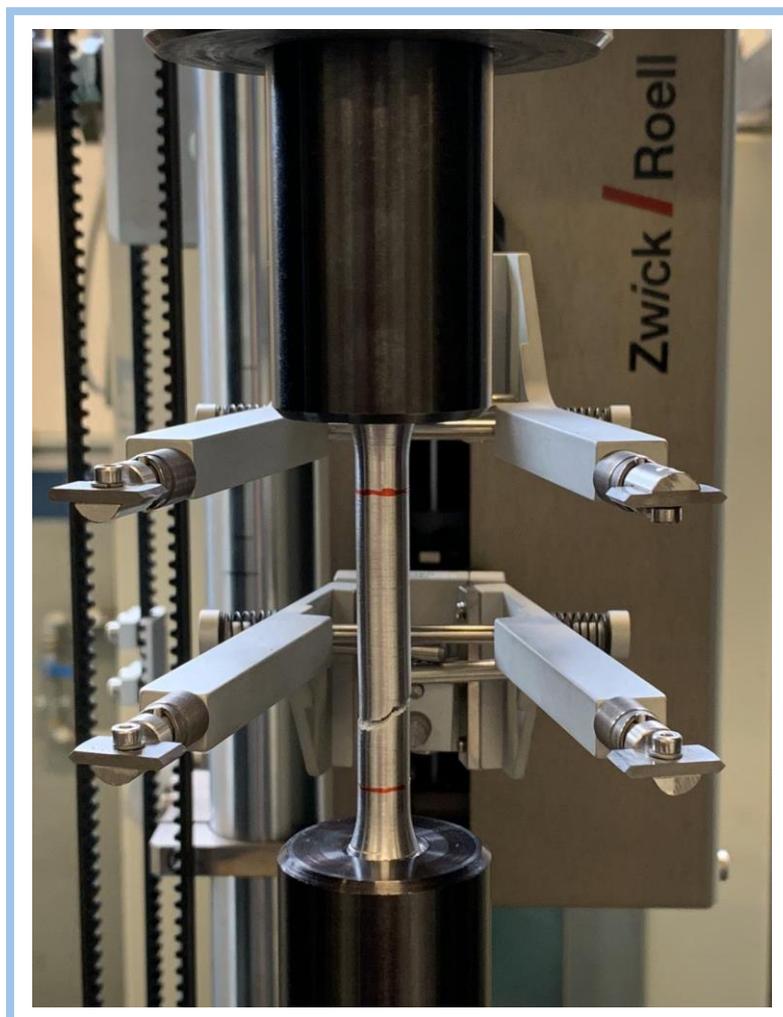


Figura 5.7

Si riportano quindi i grafici ottenuti dalle prove di trazione eseguite sui due lotti di provini:

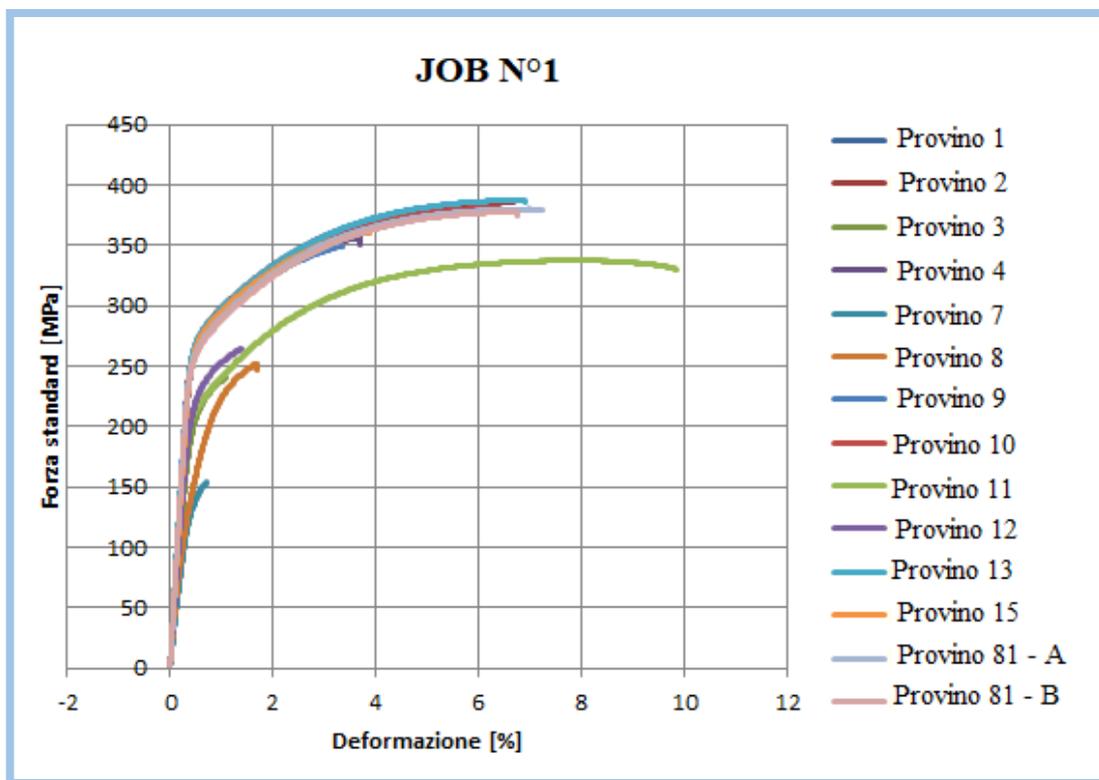


Figura 5.8

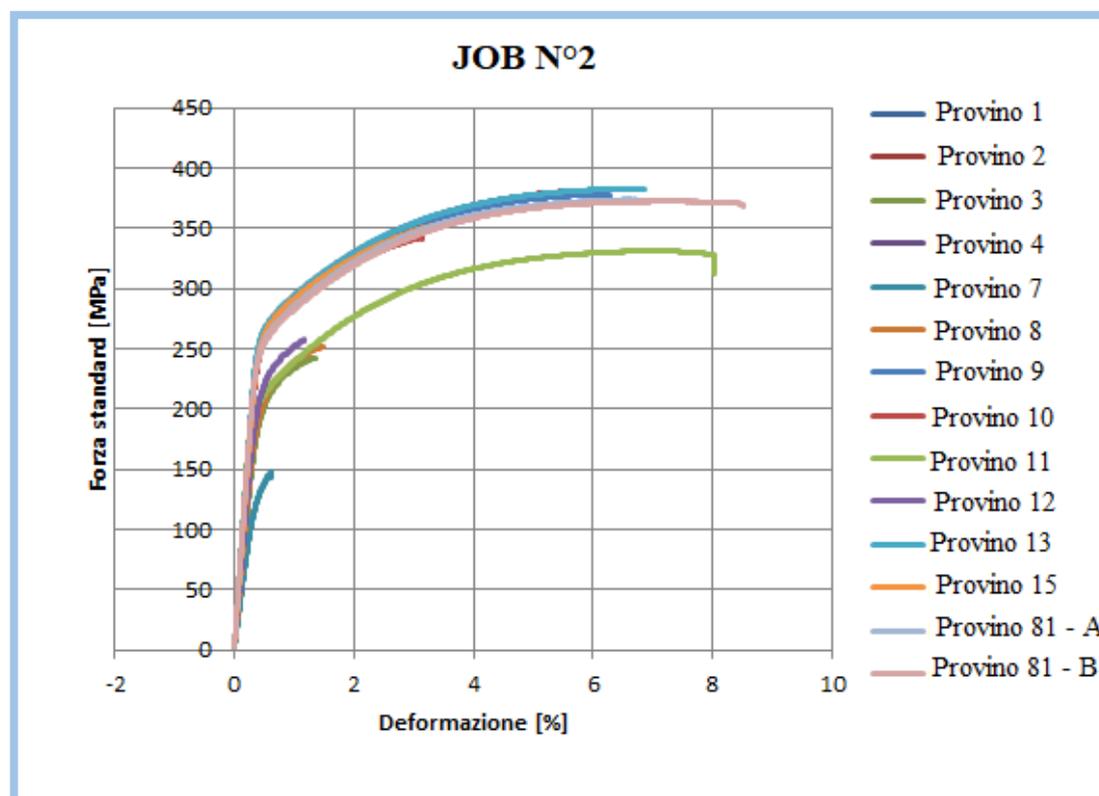


Figura 5.9

Infine si riportano i valori calcolati sperimentalmente, precisando che l'allungamento è stato ottenuto con la seguente formula (calcolata in automatico dal software che gestisce il macchinario):

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

| JOB N°1 | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|------------|----------|-----|
| Provino | d0 [mm] | S0 [mm] | E [GPa] | Rp02 [MPa] | Rm [MPa] | A % |
| 1 | 8 | 50.3 | 72.0 | 274.6 | 385.7 | 5.9 |
| 2 | 8 | 50.3 | 71.7 | 275.1 | 385.8 | 6.1 |
| 3 | 8 | 50.3 | 53.2 | 217.5 | 240.4 | 0.7 |
| 4 | 8 | 50.3 | 67.9 | 273.8 | 356.5 | 3.2 |
| 7 | 8 | 50.3 | 41.4 | 144.0 | 154.0 | 0.3 |
| 8 | 8 | 50.3 | 52.3 | 159.8 | 251.8 | 1.2 |
| 9 | 8 | 50.3 | 68.1 | 271.1 | 349.3 | 2.9 |
| 10 | 8 | 50.3 | 73.1 | 269.5 | 380.8 | 5.9 |
| 11 | 8 | 50.3 | 74.4 | 212.3 | 337.4 | 9.4 |
| 12 | 8 | 50.3 | 59.5 | 229.8 | 264.9 | 1.0 |
| 13 | 8 | 50.3 | 76.5 | 273.4 | 387.3 | 6.4 |
| 15 | 8 | 50.3 | 67.8 | 273.8 | 360.6 | 3.4 |
| 81-A | 8 | 50.3 | 73.2 | 267.1 | 380.0 | 6.7 |
| 81-B | 8 | 50.3 | 70.8 | 265.6 | 377.6 | 6.2 |

Tabella 5.2

| JOB N°2 | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|------------|----------|-----|
| Provino | d0 [mm] | S0 [mm] | E [GPa] | Rp02 [MPa] | Rm [MPa] | A % |
| 1 | 8 | 50.3 | 72.0 | 269.8 | 380.4 | 5.1 |
| 2 | 8 | 50.3 | 74.3 | 269.8 | 381.7 | 5.6 |
| 3 | 8 | 50.3 | 52.9 | 212.8 | 242.8 | 0.9 |
| 4 | 8 | 50.3 | 67.5 | 269.7 | 341.8 | 2.4 |
| 7 | 8 | 50.3 | 39.4 | 144.1 | 147.7 | 0.3 |
| 8 | 8 | 50.3 | 56.3 | 216.1 | 252.0 | 1.0 |
| 9 | 8 | 50.3 | 72.6 | 268.1 | 378.2 | 5.8 |
| 10 | 8 | 50.3 | 70.1 | 265.4 | 342.2 | 2.7 |
| 11 | 8 | 50.3 | 76.6 | 210.9 | 331.1 | 7.6 |
| 12 | 8 | 50.3 | 59.4 | 228.8 | 257.9 | 0.7 |
| 13 | 8 | 50.3 | 72.5 | 271.8 | 382.6 | 6.4 |
| 15 | 8 | 50.3 | 68.9 | 269.5 | 355.3 | 3.2 |
| 81-A | 8 | 50.3 | 72.9 | 261.3 | 373.7 | 6.4 |
| 81-B | 8 | 50.3 | 70.3 | 260.3 | 372.2 | 8.0 |

Figura 5.3

I risultati delle prove di trazione offrono diversi spunti di riflessione:

- ✓ Il provino N°13, così come aveva dato ottimi risultati in termini di densità e durezza, anche nella prova di trazione ha fatto registrare i valori più alti.
- ✓ Considerazioni opposte possono essere fatte per il provino N°7, che anche in questa analisi ha rivelato scarse proprietà.
- ✓ Già a questo punto dell'analisi multiparametrica è possibile comparare la media dei valori di trazione del miglior provino con i dati di letteratura esposti nel CAPITOLO 2:

| RISULTATI SPERIMENTALI VS LETTERATURA | | | | |
|--|----------------|-----------------|-------------------|------------|
| | E [GPa] | Rm [MPa] | Rp02 [MPa] | A % |
| A357.0-T62 Cast | 72,4 | 310 | 241 | 3,0 |
| AlSi7Mg – Letteratura | 75.0 (±4.1) | 397 (±19) | 288 (±7) | 3.8 (±0.3) |
| AlSi7Mg - FCA | 74.5 (±2) | 384(±5) | 272.6 (±0.8) | 6.4 |

Figura 5.4

Tale tabella permette di evidenziare come il miglior provino dell'analisi svolta fino a questo punto, l'ottimizzazione non è ancora terminata, abbia già fatto riscontrare delle proprietà meccaniche superiori a quelle dell'AlSi7Mg processato per casting e paragonabili con quelle di componenti additive.

5.4. Analisi micrografica

Uno dei grandi vantaggi della fabbricazione additiva risiede proprio nella microstruttura che tale tecnologia è in grado di generare all'interno del componente prodotto. Il rapido riscaldamento oltre la temperatura di fusione del materiale, seguito da un altrettanto veloce raffreddamento crea una struttura cristallina estremamente fine. L'elevato numero di bordi di grano che vengono così prodotti ostacola il movimento delle dislocazioni, il tutto si traduce in un materiale particolarmente rigido e duro.

Volendo assicurare che tale condizione vantaggiosa fosse rispettata anche dai componenti definitivi che saranno prodotti con la lega AlSi7Mg si è scelto di eseguire un'analisi micrografica con microscopio ottico sui provini oggetto di sviluppo parametrico. Tale analisi ha permesso di individuare anche eventuali porosità interne o difetti del reticolo.

Ci si è recati presso i laboratori del Global Materials Labs (GML) in corso Settembrini, Mirafiori – Torino, dove sotto la supervisione dei tecnici si è avuta la possibilità di osservare i provini al microscopio. Si specifica che a causa del budget e delle tempistiche a disposizione è stato possibile analizzare solamente due provini, e la scelta tra le 17 combinazioni parametriche stampate è ricaduta su quei campioni che avevano fatto registrare i valori estremi nelle precedenti prove: N°7 il peggiore e N°13 il migliore.

Attrezzatura:

- ✓ Inglobatrice Struers CitoPress 20;
- ✓ Lappatrice;
- ✓ Lucidatrice;
- ✓ Microscopio ottico Reichert – Jung;
- ✓ Acido Fluoridico;
- ✓ Acido Keller

Metodologia:

Si è scelto di osservare i provini N°7 e N°13 sia sulla faccia XY che su quella XZ, così da poter apprezzare eventuali differenze di struttura. Si precisa che durante l'intera procedura si sono seguite le "Norme Fiat 50210 – Prescrizioni per il prelievo dei campioni e per la preparazione dei provini per l'esame microscopico dei materiali metallici, edizione 4, 23/10/2009".

La prima operazione che si è svolta è stata l'inglobatura al fine di consentire un efficace bloccaggio durante le successive operazioni di lappatura e lucidatura. L'inglobatura può essere effettuata a freddo o a caldo a seconda della tipologia di materiale che si intende analizzare; la prima è preferibile per campioni con bassa temperatura di fusione come i polimeri.

Nel caso in esame si è utilizzata una resina acrilica trasparente, ad una temperatura di 180°C e ad una pressione di 175bar. Essendo l'AlSi7Mg un materiale tenero, il tempo richiesto per completare questa fase è stato di 16 minuti, se al contrario si fosse processato un materiale duro sarebbe stato possibile utilizzare velocità di riscaldamento e raffreddamento maggiori, consentendo di completare il processo in soli 7 minuti.

Completata l'inglobatura del provino si è proceduto con la lappatura dello stesso, operazione durante la quale vengono eliminati, tramite carte abrasive, tutti gli spigoli vivi e le bave derivanti dal precedente passaggio. Si è ottenuta, così, una geometria pressoché cilindrica, che ha facilitato l'afferraggio del macchinario in fase di lucidatura.

Il campione realizzato non risultava ancora idoneo all'analisi al microscopio, necessitava infatti di una operazione di lucidatura vera e propria, così da ridurre al minimo la rugosità superficiale del provino. Tale fase è stata eseguita avvalendosi di opportuni panni di granulometria decrescente ed è stato altresì necessario lubrificare abbondantemente al fine di allontanare le particelle che altrimenti avrebbero potuto rigare le superfici da analizzare.

Il ciclo di lucidatura consta in diversi passaggi, essi variano in base al materiale che si sta processando. Per quanto riguarda l'alluminio si è seguita la seguente logica:

- Come primo passaggio si è utilizzata una carta abrasiva in carburo di silicio, con una granulometria pari a 320 micrometri, lubrificazione tramite acqua.
- Il secondo step si differenzia dal primo per il fatto che l'azione abrasiva è delegata al liquido lubrificante e non più al disco utilizzato. In questo passaggio è stato impiegato un panno a nido d'ape con soluzione diamanta da 15 a 9 micrometri per un tempo di 3 minuti e 50 secondi;
- Il terzo passaggio è caratterizzato dall'utilizzo di un panno Mol, un materiale simil stoffa, e di una soluzione diamantata da 3 micrometri, con scopo lubrificante e abrasivo. Il tutto ha avuto una durata di 2 minuti e 50 secondi e sul provino è stata esercitata una pressione pari a 3 bar. Si precisa inoltre, che tra la seconda e terza fase di lucidatura, così come tra la terza e la quarta, è stato necessario pulire il macchinario al fine di non avere contaminazione tra le varie soluzioni utilizzate.
- Durante il quarto ed ultimo step, il panno che si è utilizzato è stato il Nap, ovvero un materiale simile al velluto con una soluzione diamantata avente una granulometria interna pari a 1 micrometro.

Si riporta quindi una fotografia raffigurante il risultato ottenuto

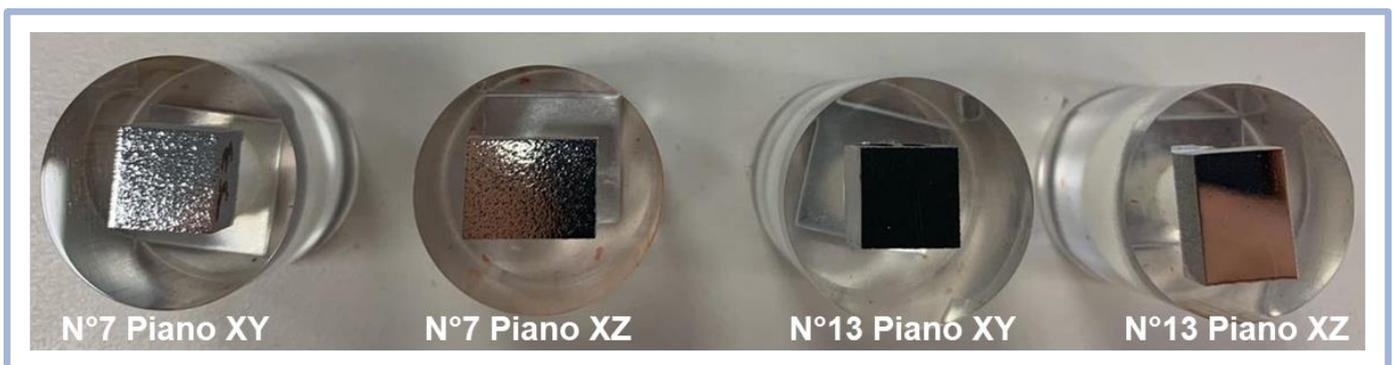


Figura 5.10

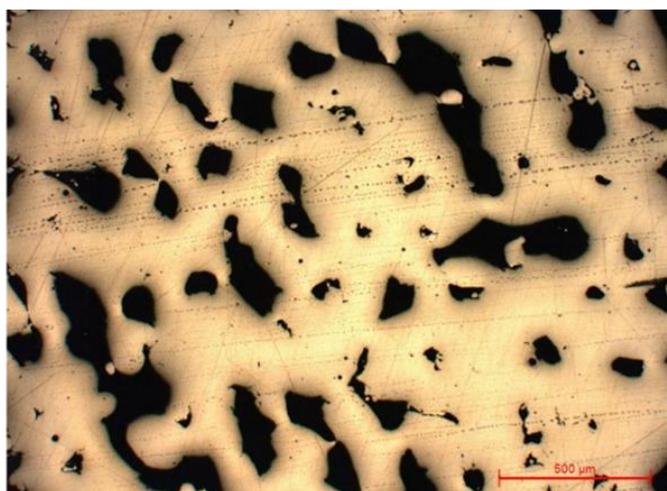
Già a questo punto dell'analisi è possibile apprezzare sostanziali differenze tra il provino best N°13 e il worst N°7 evidenziando quindi come i parametri di processo rivestano un'importanza estrema all'interno del processo di Selective Laser Melting.

Il N°7 presenta, appunto, su entrambe le facce una rugosità marcata ed osservabile anche ad occhio nudo, facendo presupporre un alta percentuale di vuoti all'interno del componente. Completamente diverse sono le deduzioni che si possono trarre dall'osservazione del provino N°13, che presenta delle superfici lucidate a specchio e lascia quindi presupporre il raggiungimento di un buon livello di densità.

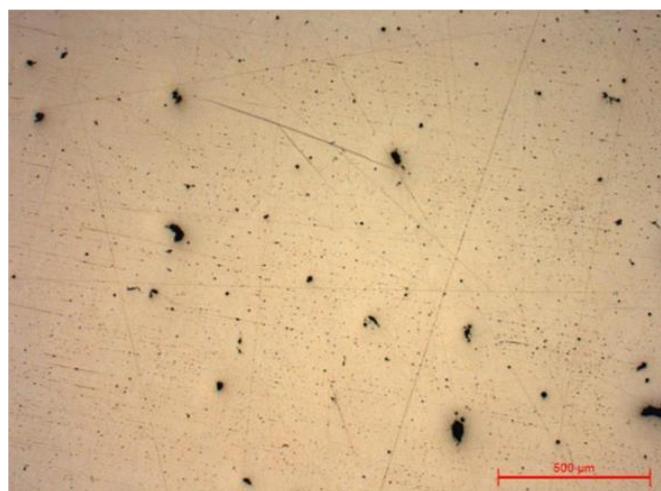
Terminata, quindi, anche l'operazione di lucidatura si è potuti passare all'osservazione al microscopio ottico Reichert – Jung, scegliendo come ingrandimenti: x20 – x50 – x100 – x500 e x1000 su ciascun piano di ogni provino. Essi sono stati ripetuti anche in seguito all'attacco chimico.

Vengono proposte le delle immagini che si ritengono più significative ricavate dall'osservazione al microscopio, che nel dettaglio sono:

- ✓ Ingrandimento x50 piano XY provino N°7 e N°13 senza attacco chimico;
- ✓ Ingrandimento x100 piano XY provino N°7 e N°13 con attacco chimico;
- ✓ Ingrandimento x100 piano XZ provino N°7 e N°13 con attacco chimico;
- ✓ Ingrandimento x1000 piano XY provino N°7 e N°13 con attacco chimico.



N°7 Piano XY – x 50



N°13 Piano XY x 50

Figura 5.11

Risalta subito la differenza di porosità caratterizzante i due provini, l'immagine di sinistra infatti evidenzia un numero molto elevato di aree nere, che rappresentano

appunto i vuoti del materiale. Mentre per quanto riguarda il provino N°13 esso ha sia numericamente che dimensionalmente meno vuoti. Si evidenzia che le righe discontinue nere orizzontali non sono porosità del materiale, ma è l'acqua o il fluido abrasivo occultato nei pori del materiale, che nel momento dell'osservazione al microscopio affiorava in superficie.

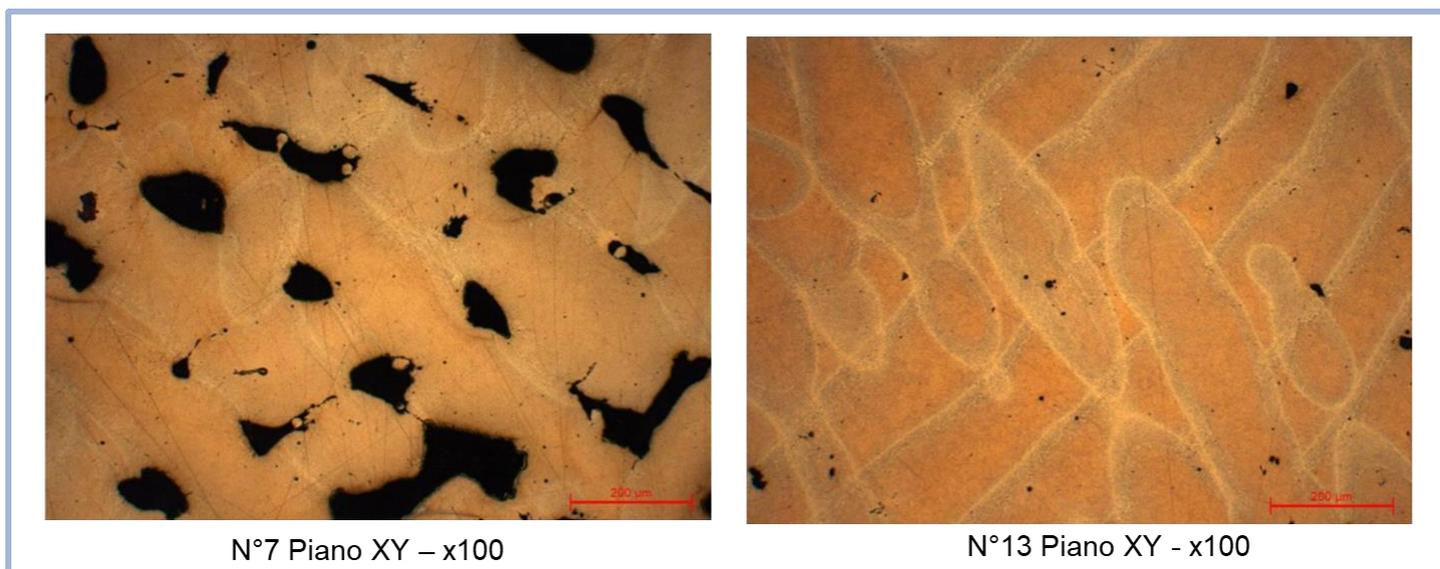


Figura 5.12

Tali immagini sono state ottenute dopo aver attaccato i campioni chimicamente. I provini stati immersi in una soluzione chimica, che ha corrosivo in modo selettivo le strutture cristalline, mettendole in risalto. Il tempo di attacco deve essere tale da permettere alla soluzione di agire in modo adeguato sulla superficie del campione, evidenziando così i dettagli desiderati, per questa specifica applicazione si è scelta una durata di attacco pari a 15 secondi.

Nell'erroneo caso in cui, invece, l'attacco fosse eseguito per un periodo di tempo troppo breve o troppo lungo allora sarebbe necessario ripetere la fase di lappatura e poi rieseguire la procedura. Le soluzioni utilizzate per eseguire questa operazione sono svariate, la scelta dell'una o dell'altra dipende principalmente dal materiale che si vuole esaminare e dalle strutture che si vuole evidenziare. Nel caso in esame si è utilizzato un acido denominato Keller in onore di Fred Keller socio della Aluminium Corporation of America promotore di questa particolare metodologia di analisi alla

fine del 1920. Si specifica, infine che il Keller è una miscela di miscela di acido nitrico, cloridrico e fluoridrico [15].

Completato l'attacco chimico è necessario ripulire il provino dall'acido utilizzato, al fine di evitare una corrosione eccessiva della superficie, che potrebbe portare a bruciare la microstruttura. A tal scopo si utilizza acqua distillata ed etanolo.

È infine possibile riconoscere, soprattutto nella figura di destra, la strategia di scanione parallela e la successiva rotazione degli assi di deposizione.

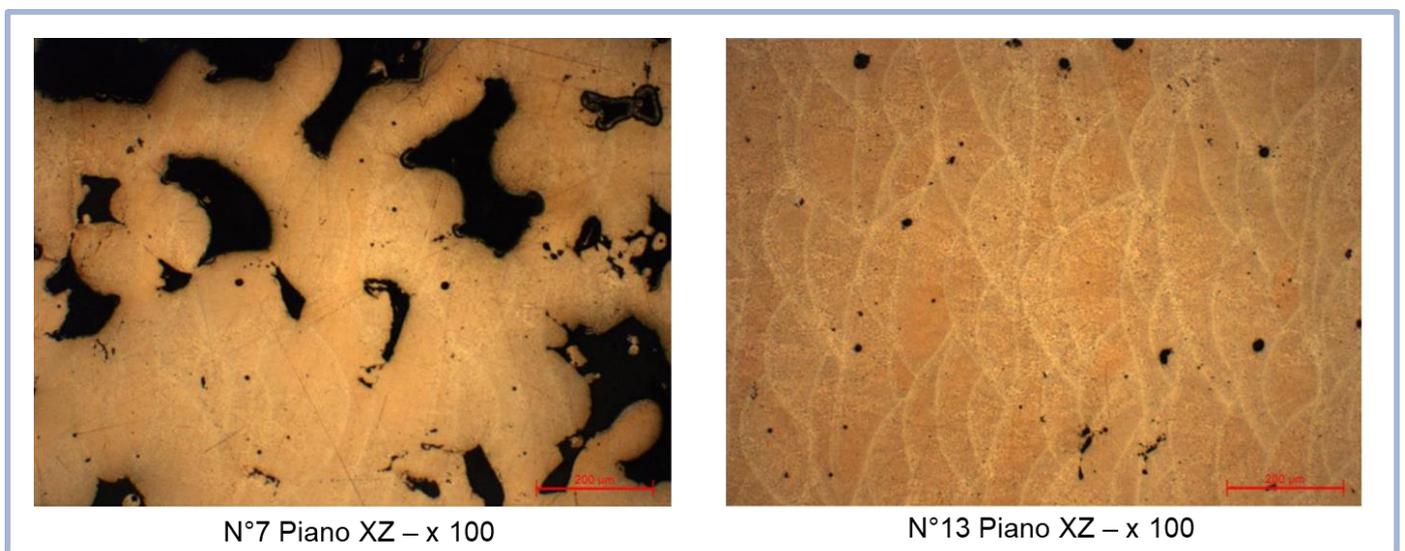


Figura 5.13

Queste immagini permettono oltre che di evidenziare nuovamente la differenza di porosità interna, anche di apprezzare i pozzetti fusi paralleli, evidenziando dove il laser è passato e la direzione in cui è passato. Le disomogeneità che si possono osservare sono dovute alla differente composizione delle dendriti tra un pozzo di fusione e il successivo. Il fatto che lungo l'asse Z le proprietà meccaniche siano diverse rispetto a XY è legato al fatto che localmente vi sono delle disomogeneità composizionali. Tuttavia man mano che si va ad agire con i trattamenti termici sul materiale per modificare la microstruttura si riesce anche a innalzare l'omogeneità lungo Z della composizione, ciò si traduce in proprietà meccaniche più simili alle direzioni XY.

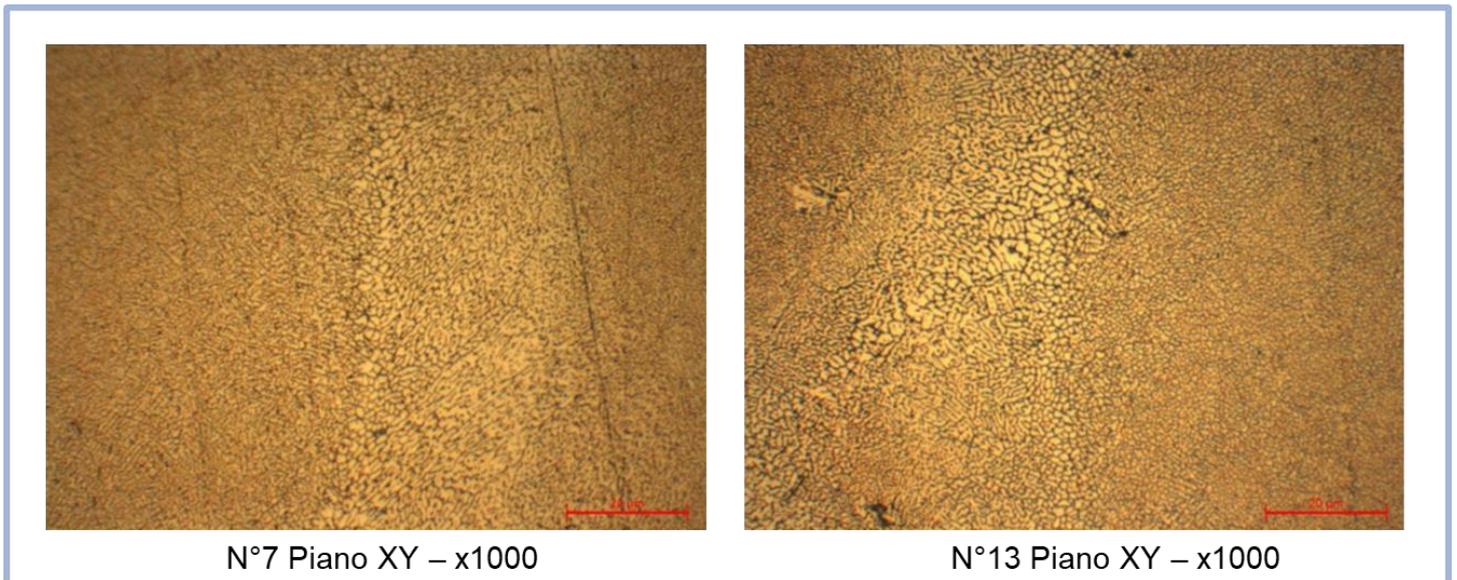


Figura 5.14

Tramite queste ultime immagini, corrispondenti ad un ingrandimento $\times 1000$, è possibile osservare come le dimensioni delle dendriti alla fine del processo produttivo siano particolarmente fini, conferendo al materiale delle proprietà meccaniche superiori alla tecniche tradizionali, che generalmente generano nei componenti grani cristallini ed eventuali dendriti di dimensioni maggiori. Più grandi sono, più possibilità di movimento hanno le dislocazioni.

Le differenze dimensionali dei grani, apprezzabili nelle immagini, sono dovute ai forti gradienti termici interni, che il materiale subisce. Nel processo additivo la fusione è appunto selettiva e non complessiva dell'intera superficie. È altresì evidente come si passi da zone in cui i grani cristallini sono dell'ordine di un paio di micron a zone in cui la dimensione scende al decimo di micron. Le diverse zone sono figlie della posizione esatta in cui si è creato il melt pool e quindi della adiacente zona termicamente alterata. È intuitivo dedurre che andando a modificare l'hatch distance, si andrà a modificare tali microstrutture e di conseguenza le proprietà meccaniche.

Si pone all'attenzione che la microstruttura analizzata risulta essere quella as built, ovvero il punto di partenza su cui poter effettuare tramite trattamenti termici la customizzazione che meglio si sposa con l'utilizzo finale del componente.

Un componente con grani così piccoli non è capace di assorbire deformazioni plastiche e quindi non risulta idoneo a subire urti; mentre se trattato termicamente si potrà

accrescere la sua granulometria. Il vantaggio dell'avere strutture molto più omogenee è tuttavia accompagnato dalla possibile segregazione o formazione di seconde fasi, con altissimo contenuto di silicio e poco alluminio.

CAPITOLO 6 - OTTIMIZZAZIONE

Le analisi di laboratorio condotte hanno fornito un importante quantitativo di risultati, il corretto utilizzo di tali dati risulta di fondamentale importanza per il prosieguo dell'ottimizzazione multi-parametrica. Nel corso di questo capitolo conclusivo verranno quindi illustrati i passaggi e le considerazioni che hanno permesso di giungere ai parametri di processo ritenuti ottimali. Successivamente verranno ripercorsi alcuni passaggi, analoghi a quelli descritti nei capitoli precedenti, inerenti la produzione dei provini ottimizzati e lo svolgimento della prova di trazione.

6.1. Risultati DOE

Prima di procedere con la fase finale del Design Of Experiments, nella quale viene scelta la risposta da ottimizzare, si ritiene necessario riassumere nelle seguenti tabelle i risultati raccolti sino a questo punto, così da fornire un quadro generale completo.

▪ PARAMETRI DI PROCESSO UTILIZZATI

| PARAMETRI DI PROCESSO | | | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------|------------------------------|-------------------|
| Provino | Potenza Laser [W] | Hatch Distance [mm] | Velocità [mm/s] | Fluenza [J/mm ³] | Commenti |
| 1 | 300 | 0,15 | 800 | 41,67 | |
| 2 | 370 | 0,15 | 800 | 51,39 | |
| 3 | 300 | 0,15 | 2000 | 16,67 | |
| 4 | 370 | 0,15 | 2000 | 20,56 | |
| 5 | 300 | 0,20 | 800 | 31,25 | Stampa interrotta |
| 6 | 370 | 0,20 | 800 | 38,54 | Stampa interrotta |
| 7 | 300 | 0,20 | 2000 | 12,50 | Worst |
| 8 | 370 | 0,20 | 2000 | 15,42 | |
| 9 | 310 | 0,175 | 1400 | 21,09 | |
| 10 | 360 | 0,175 | 1400 | 24,49 | |
| 11 | 335 | 0,175 | 971 | 32,86 | |
| 12 | 335 | 0,175 | 1829 | 17,44 | |
| 13 | 335 | 0,157 | 1400 | 25,40 | Best |
| 14 | 335 | 0,193 | 1400 | 20,66 | Stampa interrotta |
| 15 | 335 | 0,172 | 1400 | 23,19 | |
| 81-A | 360 | 0,19 | 1300 | 24,29 | |
| 81-B | 360 | 0,19 | 1300 | 24,29 | |

Tabella 6.1

La tabella 6.1 mostra sia i parametri di processo di ciascun provino che alcune considerazioni fatte a valle delle analisi svolte.

Osservandola è possibile trarre alcune deduzioni:

- ✓ I provini N° 5 – 6 hanno fatto riscontrare, in fase produttiva, difetti così importanti da richiederne l'interruzione. Essi pur assicurando un elevato conferimento di energia al materiale, entrambi oltre i $30 J/mm^3$ presentano valori estremi, del range esplorato, sia in termini di distanza tra le passate che di velocità di scansione. Rispettivamente $0.20 mm$ e $800 mm/s$
- ✓ I campioni con valori di Fluenza inferiore a $20 J/mm^3$ o prossimi, hanno tutti mostrato scarse proprietà meccaniche, al vaglio della prova di trazione, di densità e di durezza. In particolare i parametri del N°14 non hanno neanche permesso il completamento del processo produttivo.
- ✓ Fornendo alla lega di alluminio un quantitativo di energia all'incirca pari a $25 J/mm^3$ si sono registrati ottimi valori prestazionali. Appartengono a tale enumerazione i campioni N° 10 - 13 – 81.

Per ragioni di impaginazione, si prosegue alla pagina successiva.

- DENSITA'

| ANALISI DI DENSITA' | | | | |
|---------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | JOB N°1 | | JOB N°2 | |
| Provino | Peso Specifico [g/cm ³] | Densità % | Peso Specifico [g/cm ³] | Densità % |
| 1 | 2.67 | 98.7% | 2,67 | 98,7% |
| 2 | 2.70 | 100% | 2,69 | 99,7% |
| 3 | 2.52 | 93,2% | 2,52 | 93,2% |
| 4 | 2.62 | 97,1% | 2,63 | 97,5% |
| 7 | 2.35 | 87,2% | 2,35 | 87,7% |
| 8 | 2.55 | 94,5% | 2,54 | 94,2% |
| 9 | 2.63 | 97,5% | 2,64 | 97,8% |
| 10 | 2.67 | 98.3% | 2,66 | 98,6% |
| 11 | 2.65 | 98.2% | 2,66 | 98,5% |
| 12 | 2.56 | 94.9% | 2,55 | 94,4% |
| 13 | 2.69 | 99.6% | 2,70 | 100% |
| 15 | 2.66 | 98.4% | 2,65 | 98,1% |
| 81-A | 2.60 | 96.3% | 2,60 | 96,3% |
| 81-B | 2.62 | 97,0% | 2,61 | 96,7% |

Tabella 6.2

- PROVE DI TRAZIONE

| JOB N°1 | | | | |
|---------|---------|------------|----------|-----|
| Provino | E [GPa] | Rp02 [MPa] | Rm [MPa] | A % |
| 1 | 72.0 | 274.6 | 385.7 | 5.9 |
| 2 | 71.7 | 275.1 | 385.8 | 6.1 |
| 3 | 53.2 | 217.5 | 240.4 | 0.7 |
| 4 | 67.9 | 273.8 | 356.5 | 3.2 |
| 7 | 41.4 | 144.0 | 154.0 | 0.3 |
| 8 | 52.3 | 159.8 | 251.8 | 1.2 |
| 9 | 68.1 | 271.1 | 349.3 | 2.9 |
| 10 | 73.1 | 269.5 | 380.8 | 5.9 |
| 11 | 74.4 | 212.3 | 337.4 | 9.4 |
| 12 | 59.5 | 229.8 | 264.9 | 1.0 |
| 13 | 76.5 | 273.4 | 387.3 | 6.4 |
| 15 | 67.8 | 273.8 | 360.6 | 3.4 |
| 81-A | 73.2 | 267.1 | 380.0 | 6.7 |
| 81-B | 70.8 | 265.6 | 377.6 | 6.2 |

Tabella 6.3

| JOB N°2 | | | | |
|---------|---------|------------|----------|-----|
| Provino | E [GPa] | Rp02 [MPa] | Rm [MPa] | A % |
| 1 | 72.0 | 269.8 | 380.4 | 5.1 |
| 2 | 74.3 | 269.8 | 381.7 | 5.6 |
| 3 | 52.9 | 212.8 | 242.8 | 0.9 |
| 4 | 67.5 | 269.7 | 341.8 | 2.4 |
| 7 | 39.4 | 144.1 | 147.7 | 0.3 |
| 8 | 56.3 | 216.1 | 252.0 | 1.0 |
| 9 | 72.6 | 268.1 | 378.2 | 5.8 |
| 10 | 70.1 | 265.4 | 342.2 | 2.7 |
| 11 | 76.6 | 210.9 | 331.1 | 7.6 |
| 12 | 59.4 | 228.8 | 257.9 | 0.7 |
| 13 | 72.5 | 271.8 | 382.6 | 6.4 |
| 15 | 68.9 | 269.5 | 355.3 | 3.2 |
| 81-A | 72.9 | 261.3 | 373.7 | 6.4 |
| 81-B | 70.3 | 260.3 | 372.2 | 8.0 |

Tabella 6.3

Si è volutamente scelto di non riportare anche i risultati dell'analisi di durezza, in quanto non si è utilizzata tale risposta per l'analisi DOE, ritenendola strettamente correlata alle altre proprietà meccaniche. Tale tesi trova conferma nei risultati sperimentali ottenuti durante il lavoro svolto: i provini che hanno mostrato le migliori caratteristiche in termini di densità, carico di rottura e snervamento coincidono con quelli con HB massimi.

La fase successiva dell'ottimizzazione multi parametrica è stata caratterizzata dal caricamento dei risultati sperimentali appena esposti all'interno del piano DOE. Svoltata anche questa operazione si è chiesto al software Minitab di andare a massimizzare determinate risposte. Nel dettaglio:

- ✓ Carico di snervamento;
- ✓ Carico a rottura;
- ✓ Allungamento percentuale;
- ✓ Modulo elastico;
- ✓ Densità

Così da esplorare una casistica quanto più ampia possibile.

L'immagine sottostante è stata estrapolata dal programma stesso:

| Response Optimization: Rm [MPa] | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|-----------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------|
| Parameters | | | | | | |
| Response | Goal | Lower | Target | Upper | Weight | Importance |
| Rm [MPa] | Maximum | 385,7 | 388,4 | | 1 | 1 |
| Solution | | | | | | |
| | Hatch Distance | Velocità di Scansione | | Potenza [W] | Rm [MPa] | Composite |
| Solution | [mm] | [mm/s] | | | Fit | Desirability |
| 1 | 0,2 | 2000 | | 334,646 | 387,875 | 0,805524 |
| Multiple Response Prediction | | | | | | |
| Variable | | | Setting | | | |
| Hatch Distance [mm] | | | 0,200000 | | | |
| Velocità di Scansione [mm/s] | | | 2000 | | | |
| Potenza [W] | | | 334,646 | | | |
| Response | Fit | SE Fit | 95% CI | | 95% PI | |
| Rm [MPa] | 387,875 | 0,705 | (386,399; 389,351) | | (385,546; 390,204) | |

Figura 6.1

Il programma evidenzia l'obiettivo imposto: massimizzare la risposta Rm, poi nella riga sottostante riporta la soluzione trovata, esplicitando il valore che deve possedere ciascun fattore. Infine Minitab fornisce anche una predizione sui risultati che si otterrebbero impostando quel settaggio suggerito.

Si riportano ora tutte le ottimizzazioni effettuate:

| PARAMETRI OTTIMIZZATI | | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------|------------------------------|
| Risposta massimizzata | Potenza Laser [W] | Hatch Distance [mm] | Velocità [mm/s] | Fluenza [J/mm ³] |
| Rp02 | 370 | 0,15 | 1400 | 29,36 |
| Rm | 335 | 0,2 | 2000 | 13,95 |
| A% | 340 | 0,16 | 1130 | 31,34 |
| E | 322 | 0,2 | 800 | 33,54 |
| Densità | 335 | 0,15 | 1250 | 29,78 |

Tabella 6.4

Di queste si è scelto di restringere il campo a solo tre combinazioni parametriche, così da avere un numero limitato di provini da sottoporre a trazione.

- ✓ La combinazione massimizzate Rm presenta una valore di energia per millimetro cubo eccessivamente bassa, provini con fluenza simile hanno mostrato in passato scarse prestazioni o addirittura problemi di produzione. È stata pertanto scartata.
- ✓ L'ottimizzazione del modulo elastico richiede una velocità di scansione particolarmente bassa, tale parametro è particolarmente influente sulle tempistiche di produzione e quindi sui costi. Motivo per cui anche questa combinazione non è stata presa in considerazione.

6.2. Produzione e trazione dei provini ottimizzati

La EOS M290, le cui caratteristiche sono già state esposte nel CAPITOLO 4, è stata utilizzata per la produzione dei provini con i parametri ottimizzati.

I passaggi che hanno permesso di trasformare il file CAD in provini tridimensionali su cui poter effettuare la prova di trazione sono gli stessi di cui si è già ampiamente trattato in precedenza. L'unica sostanziale differenza è risieduta solamente nella scelta della direzione di accrescimento dei provini che in questo caso era assiale e non radiale. I provini prodotti con questo accorgimento hanno richiesto un post processing più breve e quindi anche economicamente vantaggioso: non si è andati infatti a tornire l'intera superficie esterna al fine di ottenere la geometria ad osso di cane, tipica dei provini sottoposti a trazione. Tale forma era stata già imposta in fase di produzione, tramite il macchinario additivo; il post processing si è così composto della sola fase di pallinatura e della successiva filettatura.

Inoltre, impostando in questo modo la stampa del componente non è stato neanche necessario andare a supportarlo. I provini sono solamente stati distanziati dalla piastra di lavoro di 5 mm al fine di salvaguardare la geometria degli stessi durante l'operazione di rimozione.

Infine si precisa che si è consci del fatto che andando a produrre il pezzo con l'asse dei cilindri paralleli all'asse Z, le proprietà meccaniche subiranno un peggioramento. Lo spessore di ciascuno strato è rimasto invariato e pari a 0.60 micrometri.

Ogni combinazione parametrica candidata ad essere ideale è stata utilizzata per produrre 3 provini, così da poter ripetere la prova di trazione tre volte e quindi di assicurare valori sperimentali meno esenti da errori.

Un' immagine dei tre provini "as built" e delle rispettive tre copie è proposta qui di seguito:



Figura 6.2

Di seguito vengono invece proposti i risultati della prova a trazione, tra parentesi è riportata la deviazione standard.

| TRAZIONE PROVINI OTTIMIZZATI - XZ | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|------------------------------|--------------|------------|
| JOB N°1 | | | | | | |
| Provino | d0 [mm] | S0 [mm] | E [GPa] | Rp02 [MPa] | Rm [MPa] | A % |
| 1 | 7.9 | 49.02 | 70.5 (±1) | 243.3(±3.9) | 361.5 (±4.2) | 3.3 (±0.3) |
| 2 | 7.9 | 49.02 | 69.8 (±0.2) | 225.3 (±2.4) | 341 (±2.0) | 3.3 (±0.5) |
| 3 | 7.9 | 49.02 | 70.5 (±0.9) | 219 (±2.3) | 335 (±2.9) | 3.6 (±0.3) |
| PARAMETRI UTILIZZATI | | | | | | |
| Provino | Potenza Laser [W] | Hatch Distance [mm] | Velocità [mm/s] | Fluenza [J/mm ³] | - | - |
| 1 | 370 | 0,15 | 1400 | 29,36 | - | - |
| 2 | 335 | 0,15 | 1250 | 29,78 | - | - |
| 3 | 340 | 0,16 | 1130 | 31,34 | - | - |

Tabella 6.5

CONCLUSIONI

Saper sfruttare al meglio la tecnologia che si possiede, oltre ad essere uno dei prerequisiti per conferire elevata qualità ai propri prodotti, può spesso tradursi in un vantaggio concorrenziale.

Tale concetto assume un ruolo ancora maggiore nel momento in cui vengono apportate innovazioni sia in termini di processo che di prodotti. Nel caso presentato nel corso di questi sei capitoli, l'innovazione introdotta dall'azienda Fiat Chrysler Automobiles risiede nei materiali processati.

I parametri di processo della tecnica di fabbricazione additiva Selective Laser Melting dovevano quindi essere ottimizzati al fine di processare al meglio una lega relativamente nuova di alluminio, l'AlSi7Mg. Essa, rispetto alla lega AlSi10Mg presenta il grande vantaggio di avere una composizione chimica equivalente a quella utilizzata nei processi di casting. Essendo il target attuale del Centro Additive di FCA quello della produzione di prototipi, tale vantaggio si traduce nella possibilità di realizzare componenti prototipali dello stesso materiale che poi sarà utilizzato nella produzione di larga scala, conferendo quindi al prototipo la qualità di essere predittivo delle caratteristiche meccaniche che avrà il componente definitivo.

L'obiettivo posto era quindi quello di individuare quei valori di Potenza Laser, Hatch Distance e Velocità di Scansione che permettessero di conferire al componente, proprietà meccaniche maggiori o almeno uguali a quelle di un componente prodotto tramite processi fusori. L'iter che ha permesso di adempiere a tale scopo è sintetizzabile nei seguenti passaggi:

- ✓ Studio del processo produttivo e del materiale;
- ✓ Creazione di un appropriato Design Of Experiments;
- ✓ Produzione dei provini con tecnologie additive;
- ✓ Analisi di laboratorio;
- ✓ Interpretazione dei risultati sperimentali e completamento dell'ottimizzazione.

Di seguito verranno quindi riportate le considerazioni e i risultati conseguiti tramite tale lavoro.

▪ L'IMPORTANZA DEI PARAMETRI DI PROCESSO

Si è potuto verificare come la modifica di tre dei parametri di processo di una tecnologia complessa come la SLM possa avere ripercussioni particolarmente importanti. Il primo lotto di provini prodotti ha visto infatti l'aborto di tre delle diciassette combinazioni parametriche. La causa è stata, quindi, individuata nel conferimento di energia in quantità e tempistiche che provocavano un'errata fusione e solidificazione della lega di alluminio. Causando in definitiva l'innalzamento dello strato processato e quindi l'impatto tra componente e racla.

Allo stesso tempo, impostando in maniera corretta gli stessi tre parametri del macchinario si sono ottenuti componenti dalle proprietà meccaniche estremamente interessanti. Come appunto evidenziato dalla tabella 7.2 riportata più avanti. Si sottolinea che tali proprietà sono risultate addirittura migliori di quelle che le tecnologie tradizionali sono in grado di conferire.

▪ COERENZA TRA LE ANALISI DI LABORATORIO

Come precedentemente illustrato si sono svolte diverse analisi di laboratorio:

- ✓ Misura della densità
- ✓ Determinazione della durezza Brinell;
- ✓ Prove di trazione;
- ✓ Analisi metallografica con microscopio ottico.

Nel corso di queste analisi si è osservato che sulla base dei parametri considerati:

- Il provino che ha presentato le caratteristiche meccaniche migliori (provino N°13) ha fatto registrare i valori massimi relativamente a tutte le prove di laboratorio a cui è stato sottoposto.
- Al contrario il provino peggiore (provino N°7) ha presentato i valori minimi nel corso di tutte le analisi sperimentali.

Tali osservazioni oltre a confermare la corretta esecuzione delle sperimentazioni portano a riflettere sul fatto che le proprietà meccaniche non sono indipendenti le une dalle altre, bensì sono strettamente correlate. Per questo motivo, in sede di

progettazione bisogna tener conto di come tali proprietà si influenzino vicendevolmente.

▪ PARAMETRI OTTIMIZZATI

Infine tra le tre combinazioni parametriche ottimizzate, presentate nel corso del sesto capitolo, la scelta per l'utilizzo nelle attività quotidiane aziendali è ricaduta sui valori di Potenza Laser, Hatch Distance e Velocità di Scansione posseduti dal provino N°1

| PARAMETRI OTTIMIZZATI – PROVINO N°1 | | | |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------------|
| Potenza Laser [W] | Hatch Distance [mm] | Velocità [mm/s] | Fluenza [J/mm ³] |
| 370 | 0,15 | 1400 | 29,36 |

Tabella 7.1

Il motivo di tale scelta è sicuramente da ricercare:

- ✓ Nei risultati delle prove di trazione che sono i più elevati di questo lotto;
- ✓ Nell'elevata velocità di scansione (pari a 1400 mm/s) che permette di andare a ridurre quanto più possibile le tempistiche di produzione, il tutto a vantaggio della produttività e dell'economia aziendale.

Inoltre la tabella sottostante permette di effettuare dei paragoni diretti, sia tra componenti costituiti dalla stessa lega, ma prodotti con tecnologie differenti (SLM vs casting) che tra componenti prodotti con la stessa tecnologia ma leghe differenti (AlSi7Mg e AlSi10Mg).

| TABELLA DI CONFRONTO | | | | |
|--|------------|------------|--------------|------------|
| | E [GPa] | Rm [MPa] | Rp02 [Mpa] | A% |
| A357.0-T61 Sand Cast | 72.4 | 310 | 241 | 3.0 |
| A357.0 – T61 Permanet mold cast | 72.4 | 310 | 248 | 3.0 |
| AlSi7Mg – Z | 70.05 (±1) | 361.5 (±1) | 243.3 (±1) | 3.3 (±0.5) |
| AlSi10Mg – Z | 72 (±1.2) | 367 (±5) | 215.8 (±3,2) | 3.8 (±0.1) |

Tabella 7.2

Risulta evidente come i parametri di processo individuati abbiano permesso di ottemperare allo scopo inizialmente imposto: le proprietà meccaniche del provino prodotto con tecnologia additiva risultano infatti migliori rispetto a quelle dei componenti realizzati con il casting. Unica eccezione per il carico a snervamento del componente prodotto tramite “permanent mold casting” che risulta essere di poco maggiore (circa 1.2%).

Si sottolinea tuttavia, che tali risultati sono stati ottenuti facendo accrescere i provini in macchina, con l’asse parallelo a quello Z e senza alcun trattamento termico; tale condizione risulta essere quella più critica per i processi additivi. Evidenze sperimentali hanno, infatti, evidenziato come tale condizione sia quella che vada a conferire le proprietà meccaniche più basse al componente.

Guardando invece al confronto tra AlSi7Mg e AlSi10Mg, così come già anticipato all’inizio del lavoro di tesi, i risultati delle prove confermano che una seppur minima differenza di percentuale di Silicio (3%) ha delle ripercussioni nelle proprietà meccaniche dei componenti. Infatti, i provini a maggior contenuto di Silicio presentano un carico di rottura e un allungamento percentuale leggermente migliori, mentre il carico di snervamento risulta inferiore. Tale risultato è imputabile al fatto che un maggior quantitativo di silicio consente di avere un bagno fuso più fluido e quindi di minimizzare sia il fenomeno dello shrinkage che quello delle tensioni residue interne. La differenza in termini di proprietà meccaniche tra le due leghe risulta quindi minima, conferendo quindi all’AlSi7Mg un ampio campo di utilizzo.

BIBLIOGRAFIA

1. Appunti del corso di Tecniche di Fabbricazione Additiva, Ing. Prof. Iuliano Luca – Politecnico di Torino, 2017
2. Appunti del corso di Materiali per la Fabbricazione Additiva, Ing. Prof. Fino Paolo – Politecnico di Torino 2017
3. <https://prototek.it/hp-jet-fusion-3d-4200-vediamo-cose-rivoluzionario-voxel/>
4. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods – 2009.
5. Influenza del ferro sulla solidificazione e la microstruttura di leghe a base al-si – Tesi di laurea magistrale in ingegneria dei materiali – Università degli studi di Padova – Angelini Fausto, 2015
6. Fusione e solidificazione di leghe di alluminio eutettiche in crogiolo a levitazione magnetica cclm – Università degli studi di Padova – Salbego Michele, 2013
7. Additive Manufactured A357.0 Samples Using the Laser Powder Bed Fusion Technique: Shear and Tensile Performance – Luca Denti
8. MatWeb Material Property Data
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=3033751a102b4fd08bc568f0784ac907&ckck=1>
9. Effect of Process and Post-Process Conditions on the Mechanical Properties of an A357 Alloy Produced via Laser Powder Bed Fusion
<https://www.mdpi.com/2075-4701/7/2/68/htm>
10. <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/>
11. Redesign for AM production of an Engine Mounts - 2nd Level Master in Additive Manufacturing, Politecnico di Torino, Paradiso Stefano – 2018
12. Studio e ottimizzazione del processo di fabbricazione additiva (slm) per applicazioni in ambito biomedicale: produzione di protesi e strutture reticolari – Liverani Erica, Dottorato di ricerca in meccanica e scienze avanzate dell'ingegneria 2017.
13. Prova di durezza, www.studentionline.eu

14. Classe 5[^] - Tecnologie mecc. di proc. e prod. - UdA n° 3: Prove e controlli –
Prova di trazione – Prova di trazione statica. Tecnologie mecc. di proc. e prod.
- Appunti dalle lezioni del prof. Di Cara Nicola - (UNI 551 – UNI 552 – UNI
556 – UNISIDER 4 – UNI EN 10002/1)
15. https://it.qwertyu.wiki/wiki/Keller's_reagent
16. “Studio ed ottimizzazione del processo di fabbricazione additiva (SLM) per
applicazioni in ambito biomedicale: produzione di protesi e strutture reticolari”
- Dottorato di ricerca, Università di Bologna, 2017 – Liverani Erica