



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di strumenti per l'implementazione funzionale e customizzata del selective laser melting nella produzione di giranti micro e mini hydro

A. Boschetto
L. Bottini

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
MECCANICA E AEROSPAZIALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Report RdS/PTR2020/286

SVILUPPO DI STRUMENTI PER L'IMPLEMENTAZIONE FUNZIONALE E CUSTOMIZZATA DEL SELECTIVE LASER MELTING NELLA PRODUZIONE DI GIRANTI MICRO E MINI HYDRO

A. Boschetto, Dipartimento Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, La Sapienza Università di Roma
L. Bottini, Dipartimento Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, La Sapienza Università di Roma

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo : *Tecnologie*

Progetto: Materiali di frontiera per usi energetici

Work package: WP4 - Realizzazioni sperimentali di componenti Additive Manufacturing, a favore delle industrie dei componenti metallici

Linea di attività: LA4.13 Sviluppo di strumenti per l'implementazione funzionale e customizzata del selective laser melting nella produzione di giranti micro e mini hydro

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile del Work Package: Federica Bezzi

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Sapienza Università di Roma: "Sviluppo di strumenti per l'implementazione funzionale e customizzata del selective laser melting nella produzione di giranti micro e mini hydro".

Responsabile scientifico ENEA: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile scientifico UNIROMA1: Alberto Boschetto

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	4
2 ATTIVITÀ LA1.1 INDIVIDUAZIONE DELLA TECNOLOGIA E DEL MATERIALE.....	5
2.1 LE TECNOLOGIE ADDITIVE.....	5
2.2 LA TECNOLOGIA SLM.....	6
2.3 SCELTA DEL MATERIALE.....	8
2.4 COMPOSIZIONE CHIMICA.....	8
2.5 PROPRIETÀ MECCANICHE.....	9
2.6 GRANULOMETRIA E MORFOMETRIA DELLE POLVERI.....	10
3 ATTIVITÀ LA1.2: RIDUZIONE DELLE OPERAZIONI DI FINITURA SECONDARIA.....	13
3.1 PREMessa.....	13
3.2 OPERAZIONI DI FINITURA SECONDARIE.....	14
3.3 OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI SLM AI FINI DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE.....	15
3.4 DESIGN OF EXPERIMENTS.....	16
3.5 MISURE DI CARATTERIZZAZIONE DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE.....	18
4 ATTIVITÀ LA1.3: ANALISI DELLE SUPERFICI E SVILUPPO DI MODELLI PREDITTIVI.....	20
4.1 ANALISI DEI DATI RELATIVI ALLE SUPERFICI ORIZZONTALI.....	20
4.2 ANALISI DEI DATI RELATIVI ALLE SUPERFICI CON ANGOLO DI LOCALE STRATIFICAZIONE DI 45°.....	23
4.3 ANALISI DEI DATI RELATIVI ALLE SUPERFICI CON ANGOLO DI LOCALE STRATIFICAZIONE DI 90°.....	26
4.4 ANALISI DEI DATI RELATIVI ALLE SUPERFICI CON ANGOLO DI LOCALE STRATIFICAZIONE DI 135°.....	28
5 ATTIVITÀ LA1.4: MODELLAZIONE DEI TEMPI DI PRODUZIONE.....	31
5.1 PREMessa.....	31
5.2 MODELLO GLOBALE PER IL CALCOLO DEI TEMPI DI PRODUZIONE.....	31
5.3 MODELLO ESEMPLIFICATO PER LA PREVENTIVAZIONE DEI TEMPI PER IL CONTOUR.....	32
5.4 MODELLO ESEMPLIFICATO PER LA PREVENTIVAZIONE DEI TEMPI PER L'INFILL.....	33
5.5 CASE STUDY E DIMOSTRAZIONI PRATICHE DEL MODELLO.....	35
CONCLUSIONI.....	41
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	42
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	43

Sommario

Il presente documento riporta le attività, le metodologie, i risultati e le conclusioni del primo anno di progetto inerente all'implementazione della tecnologia di Selective Laser Melting (SLM) per la produzione integrata di giranti micro e mini hydro. La struttura del documento segue quello delle attività del progetto. L'attività LA1.1 riguarda l'individuazione della tecnologia e del materiale: una anamnesi dei materiali processabili mediante la tecnologia SLM orienta la scelta verso una particolare lega di alluminio con soddisfacenti proprietà di riciclabilità ed economiche; la composizione chimica, le proprietà meccaniche e l'analisi granulometrica del materiale di ingresso costituiscono importanti elementi caratterizzanti. L'attività LA1.2 si incentra sulla riduzione delle operazioni di finitura secondaria che possono inficiare se non rendere antieconomico l'impiego della tecnologia additiva. Per questo motivo si opera una ottimizzazione dei parametri di processo attraverso l'impiego delle tecniche di Design of Experiments andando a caratterizzare le superfici mediante tecniche di rugosimetria a contatto. L'analisi delle superfici nell'attività LA 1.3 ha permesso di sviluppare modelli predittivi della rugosità media per ciascuna delle inclinazioni investigate. Infine, i tempi di produzione vengono trattati in maniera analitica trovando semplici ed immediate equazioni di predizione. I risultati sono particolarmente in accordo con i dati provenienti dai costosi software proprietari.

1 Introduzione

Il ricorso a sistemi in grado di generare energia in maniera pulita e sostenibile ha sempre più un'importanza strategica per le nazioni ma più in generale per le società tutte. Anche solo considerando la spinta emotiva correlata ai problemi climatici, la richiesta sempre più pressante di rivolgersi a fonti pulite ha visto, nel corso degli anni, i governi delle nazioni più ricche fissare il tetto della produzione da fonti non rinnovabili. Il beneficio derivante da tali scelte è indubbio mentre meno chiare sono le potenzialità strategiche dei singoli territori. In Italia lo sfruttamento dei bacini idrici in campo idroelettrico sembra attualmente giunto a piena maturità con un pieno potenziale tecnico. Non sono previste, infatti, radicali trasformazioni o implementazioni delle risorse idriche. È da rilevare però che ciò è vero per i grandi bacini e i grandi corsi d'acqua, vale a dire su grande scala. Vale la pena rivolgere l'attenzione ai numeri che possiede il nostro Paese che è tra i paesi più ricchi di acqua al mondo, almeno potenzialmente. Mediamente le precipitazioni piovose ammontano in volume a circa 300 miliardi di metri cubi ogni anno. Ciononostante, l'utilizzazione effettiva ammonta solamente a 58 miliardi di metri cubi (circa il 19%). Naturalmente le risorse sotterranee sono di difficile sfruttamento ma esse costituiscono solo il 28%. Il restante 72% sono sorgenti superficiali come fiumi e laghi. Conti alla mano esistono circa 174 miliardi di metri cubi di acqua superficiale distribuiti in maniera disomogenea su tutto il nostro paese che non vengono sfruttati. Si tratta di risorse di piccola scala come rigagnoli, acquedotti, torrenti di montagna, canali di irrigazione, etc. Il posizionamento di piccolissime centrali idroelettriche studiate attentamente potrebbe sfruttare questo enorme potenziale posseduto da sempre dal nostro territorio. Il presente progetto cerca di superare le tante criticità esistenti nell'implementazione economica di una tipologia di impianto idroelettrico con particolare cura al contenimento dei costi, l'affidabilità dei sistemi di fabbricazione nonché efficienza finale del prodotto. Il cuore del sistema è la girante idroelettrica la cui geometria presenta molte challenge dal punto di vista fabbricativo poiché richiede non solo una adeguata progettazione ma anche una implementazione integrata con il progetto delle tecnologie manifatturiere, pena un'implementazione rischiosa che sinora ne ha frenato la diffusione in piccola scala.

Tale progetto si rivolge dunque agli utenti finali che dovrebbero essere il perno applicativo degli impianti di generazione che spesso non posseggono una adeguata preparazione allo sviluppo prodotto/processo e, pertanto, non possono beneficiare adeguatamente di una progettazione favorevole alle loro esigenze e al sito di installazione. Gli utilizzatori finali sono ad esempio le Pubbliche Amministrazioni che posseggono l'uso delle risorse idriche oppure i singoli utenti. Tali figure di rado hanno le risorse per intraprendere uno

studio locale per la fattibilità tecnica ed economica. Se fossero invece dotati di metodologie semplificate, semiautomatiche per così dire, in grado di fornire loro dei mezzi diretti per la pianificazione di una produzione diretta dei componenti principali potrebbero effettuare con facilità e rapidità le loro valutazioni. Se inoltre le tecnologie impiegate fossero ridotte ad una soltanto, potrebbe essere semplice dotarsi di tali tecnologie per una soluzione integrata nella singola amministrazione in una produzione distribuita ma customizzata alle esigenze di tutti.

2 Attività LA1.1 Individuazione della tecnologia e del materiale

2.1 Le tecnologie additive

Le tecnologie additive sono una famiglia di processi in grado di fabbricare un componente direttamente dalla sua rappresentazione virtuale. Si tratta di tecnologie nate negli ultimi 40 anni ma sviluppate negli ultimi 70 anni. All'inizio i sistemi di attuazione dei principi fisici utili alla creazione degli elementi base delle tecniche non erano sufficientemente stabili ed affidabili per produrre oggetti tridimensionali. Successivamente lo sviluppo delle tecnologie laser e di nuovi materiali ha consentito alle tecnologie additive di affermarsi per la produzione, inizialmente, di prototipi, successivamente di piccole e medie serie di componenti funzionali. Oggi le tecnologie additive annoverano centinaia di varianti con migliaia di sistemi che implementano processi fisici anche profondamente differenti. La International Standard of Organization (ISO) ha stabilito una suddivisione in categorie per districare il complesso mondo delle tecnologie che si è creato. Un totale di sette categorie permette una distinzione efficace sui metodi e sulle loro applicazioni.

Il principio base delle tecnologie additive è quello di fabbricare in modo automatizzato un oggetto tridimensionale costruendo le fette che idealmente lo compongono. Tali fette vengono denominati layer da cui la generale denominazione di fabbricazione layer by layer. Esistono numerosi processi chimici, fisici, metallurgici che consentono la generazione di tali layer e, concomitantemente, ne forniscono un'unione essendo l'oggetto finale desiderato integro [1]. Grazie alla scelta di opportuni parametri di processo l'anisotropia conseguente a tale fabbricazione suddivisa può essere limitata ma non tutte le tecniche provvedono allo stesso modo a tale fine. Un importante elemento di scelta è proprio questa anisotropia che ovviamente ne limita l'applicazione. Un altro importante limite è il materiale: inizialmente studiate con materiali polimerici, le tecniche additive sono successivamente approdate ai materiali metallici. La maggior parte delle categorie rimane dedicata ai materiali plastici tuttavia molti progressi sono stati effettuati nella direzione dei materiali metallici e, concomitantemente, sono usciti nel mercato numerosi sistemi di produzione sempre più economici. Le poche categorie che consentono una produzione diretta di componenti metallici sono il Powder Bed Fusion (PBF) e il Directed Energy Deposition (DED). Un altro importante elemento su cui stabilire la tecnologia migliore per una determinata applicazione è la sua capacità di fabbricare oggetti con buone finiture superficiali e buone tolleranze. Il DED soffre purtroppo in entrambe queste direzioni ed è affetto da restrizioni geometriche connesse con l'implementazione di processo governato a 5 assi (più complicato da gestire). Le tolleranze e soprattutto le rugosità ottenibili necessitano sempre di una post-lavorazione alle macchine utensili che, per geometrie complesse come quelle delle giranti, vanifica il beneficio dell'utilizzo delle tecniche additive. Nella categoria PBF ricadono il Selective Laser Sintering (SLS), il Selective Laser Melting (SLM) e l'Electron Beam Melting (EBM). La prima tecnologia è stata la prima ad emergere per la fabbricazione di manufatti metallici. Tuttavia, è stata superata dal SLM dato che la porosità che caratterizza il componente finale è particolarmente marcata pur richiedendo circa gli stessi sforzi tecnici ed economici. Il SLM si configura come la tecnologia più diffusa attualmente poiché permette finiture e tolleranze non ottenibili con altri processi [2]. Gli svantaggi risiedono nei possibili stress residui indotti dalla fabbricazione relativamente fredda e una velocità di produzione più bassa rispetto alle competitor EBM e DED. È però da rilevare che l'EBM richiede tempi di riscaldamento e raffreddamento quali transitori per effettuare la fabbricazione che spesso non sono

considerati nel computo del tempo di produzione. Il costo di investimento dell'EBM e del DED supera le altre: in modo particolare recentemente, dato lo sviluppo industriale del SLM, molti sistemi particolarmente economici sono comparsi sul mercato. Nel grafico polare di Figura 1 sono riassunte le caratteristiche sinora discusse con assi normalizzati a 1 se la variabile porta il beneficio migliore rispetto alle altre tecnologie valutate.

A seguito delle osservazioni effettuate le tecnologie SLM e EBM presentano interessanti benefici. Tuttavia, vanno considerati i costi di implementazione riguardanti l'implementazione e la successiva fase di finitura secondaria. Tale valutazione va infatti portata relativamente al componente che deve essere prodotto e non va intesa come una valutazione assoluta. Nessuna tecnologia è infatti migliore di un'altra in senso assoluto ma presenta vantaggi locali in condizioni particolari. La girante che si vuole produrre è di tipo Pelton per le indubie proprietà di rendimento poco suscettibile alla variazione di portata. La geometria è piuttosto articolata e presenta notevoli difficoltà quando la tecnologia impiegata è di tipo sottrattivo come una lavorazione CNC. Nel caso di EBM le tolleranze e finiture superficiali sono piuttosto scadenti e portano alla necessità di ulteriori lavorazioni che saranno appunto di tipo sottrattivo. L'iniziale vantaggio connesso con l'utilizzo di una relativamente veloce (le fasi transitorie riducono questo vantaggio) tecnica additiva si perde con la successiva fase di finitura secondaria. Il SLM è in grado di produrre teoricamente finiture migliori (il progetto cercherà proprio di stabilire questo) e almeno nelle zone funzionali di contatto con il liquido dette finiture non occorrono. L'accoppiamento con l'albero dovrà comunque subire una lavorazione ma trattasi di una lavorazione tradizionale che si può effettuare tramite una tornitura longitudinale interna veloce ed economica oltre che semplice. Per gli elencato motivi la tecnologia SLM è stata eletta a migliore candidata per la produzione customizzata di micro-giranti Pelton in tale progetto.



Figura 1 Diagramma polare delle caratteristiche dei processi SLS, SLM, EBM e DED. Codice di lettura: maggiore è il valore normalizzato, migliore è la caratteristica considerata

2.2 La tecnologia SLM

Il SLM è noto anche con il nome commerciale Direct Metal Laser Sintering (DMLS) anche se è evidente che il processo è basato sulla fusione completa piuttosto che parziale delle polveri. Lo schema del processo è riportato in Figura 2. Una sorgente laser (tipicamente un laser a fibra la cui lunghezza d'onda è utile all'assorbimento da parte di un metallo) genera il fascio che viene convogliato da una fibra ottica [3]. Un beam expander espande il fascio per ridurre la sua potenza specifica che danneggerebbe la delicata ottica di riflessione che segue. La potenza utile alla liquefazione di un metallo è senz'altro molto alta per cui il

fascio concentrato per l'attraversamento della fibra ottica viene espanso sulla testa della macchina. Il fascio viene ora deviato da un sistema a due specchi movimentato da particolari galvano-motor in grado di muoversi per piccolissimi angoli ma con grande velocità e precisione. Questo dispositivo generalmente chiamato scanner deflette lungo due assi il fascio sopra un'ottica denominata F-Theta lens. Questo gruppo di lenti permette tre obiettivi molto importanti per il SLM:

- il primo è quello di rendere il piano di focalizzazione del laser piano poiché piana è la piattaforma di lavorazione ovvero il letto di polveri presente su di essa. Dato l'esiguo spessore del layer che si desidera (decine di micrometri) va da sé che la precisione di focalizzazione su tutta la superficie è molto importante per l'ottenimento di un buon prodotto;
- il secondo è quello di rendere lineare la relazione tra spostamento sul piano e angolo degli specchi. Ciò è molto importante per il controllo diretto dei motori. Il sistema è chiamato f-Theta poiché la relazione tra lo spostamento orizzontale del beam e l'angolo è lineare (f per theta appunto);
- ultimo obiettivo è quello di non deformare la distribuzione gaussiana dell'energia del fascio in dipendenza della distanza dal centro della tavola. Molte ottiche producono questo effetto che naturalmente produrrà una modifica importante nella pozza di metallo liquido che si crea (denominata melt pool) e la sua conseguente solidificazione nell'oggetto finale.

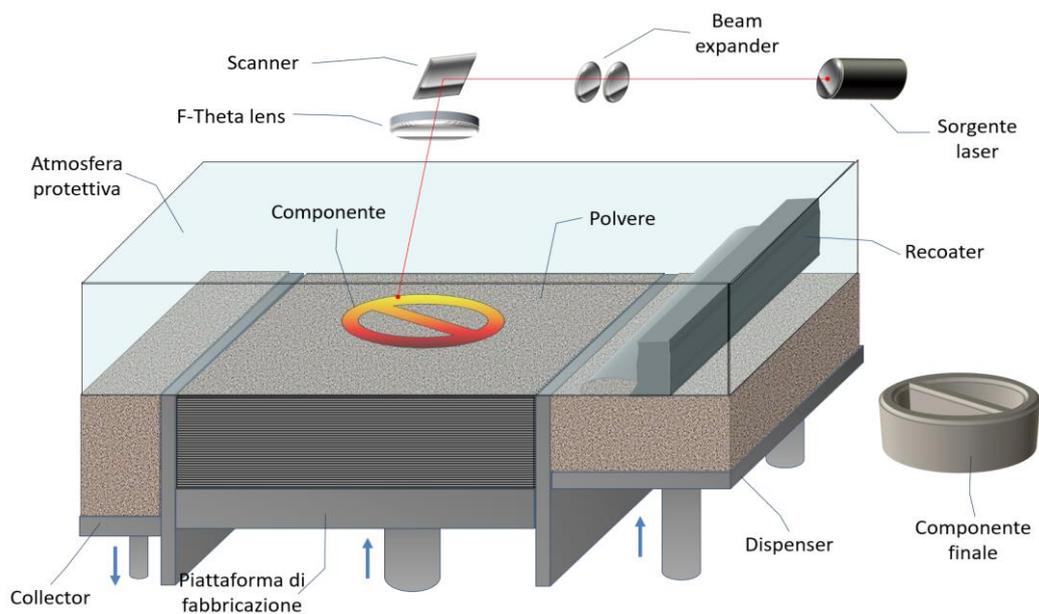


Figura 2 Schematizzazione del processo SLM

Il letto di polveri è governato da altri tre assi controllati per la movimentazione della tavola, di un dispenser e di un collector. Il dispenser è un serbatoio inizialmente pieno di polveri che è deputato all'alimentazione del recoater. Una quantità calibrata di polveri viene innalzata dal dispenser, il recoater si muove da sinistra a destra e sparge un certo ammontare di polveri sulla superficie della tavola di lavorazione all'inizio o sulla superficie del letto di polvere parzialmente scansionato in seguito. La polvere in eccesso è collezionata dal collector che appunto si abbassa gradualmente mano a mano che si riempie. Non appena il letto di polvere vergine è preparato la scansione ha inizio e localmente si ha una rapida liquefazione e solidificazione delle polveri che quindi si aggregano tra di loro e si saldano sulla tavola o su layer precedentemente scansionati che si trovano inferiormente. Il processo continua fino al completamento dei layer. Al termine della lavorazione che avviene in un ambiente controllato nella sua atmosfera (ad esempio azoto per l'acciaio, argon per l'alluminio) le polveri in eccesso vengono rimosse attraverso caute operazioni condotte con appositi sistemi deputati successivamente al riciclo delle stesse. Successivamente si passa alla separazione del pezzo dalla tavola e alla rimozione dei supporti che vengono progettati in una fase di pre-processing allo

scopo di agganciare il pezzo alla tavola ed impedirne una sua movimentazione ma soprattutto allo scambio dell'energia prodotta in solidificazione verso la tavola che altrimenti provocherebbe enormi stress residui o il collasso del pezzo per raggiunte temperature di rammollimento del materiale metallico.

2.3 Scelta del materiale

Come già accennato un forte limite delle tecnologie additive è la scarsa poliedricità dei materiali processabili. Il SLM non fa eccezione anche se il portfolio dei materiali è più ampio della media delle altre tecnologie. La lista completa comprende otto famiglie: acciai, leghe cromo cobalto, acciai per utensili, leghe di nickel, acciai inossidabili, tungsteno, leghe di titanio, metalli preziosi. Si può effettuare una rapida riduzione delle alternative eliminando materiali particolarmente costosi. Per inciso va precisato che tali materiali posseggono ampiamente le caratteristiche minime richieste per una micro-Pelton e, pertanto, il costo può essere un fattore importante. Il semilavorato è costituito da polveri gas atomizzate che vanno acquisite attraverso il mercato che odiernamente ne propone in grande quantità rispetto al passato. Data l'applicazione e l'articolata geometria del componente è facile pensare che non si riesca facilmente a scaricare le feature geometriche costituenti riducendo sensibilmente le masse ove possibile. Va da sé che il peso del componente dipenda essenzialmente dalla sua densità. Dal punto di vista progettuale tale variabile non comporta grandi fastidi se si eccettua l'inerzia al transitorio ma dal punto di vista fabbricativo ciò è molto importante. Ragionando a volume costante l'ammontare in peso di polveri effettivamente finalizzate alla fabbricazione componente (scansionate per intenderci, e quindi non riutilizzabili) varia a seconda della densità. Poiché è il costo al kg l'elemento discriminante il costo del semilavorato, è chiaro che orientarsi verso leghe leggere ed economiche è un indirizzo corretto. Con maggior dettaglio è opportuno anche considerare il tempo di processamento specifico di ciascun materiale che contribuisce al costo totale di fabbricazione. Quest'ultimo parametro non varia però quanto le densità in gioco. In ultima analisi, ma non di poco rilievo per il progetto, è il fattore ambientale: ciò vale a dire che occorre considerare materiale di facile reintegrabilità nell'ambiente. Con ovvie conseguenze per quest'ultima cautela i materiali possibili si riducono notevolmente. Volendo comunque considerare una famiglia allargata di opzioni si è effettuata un'analisi dei costi dei semilavorati e dei tempi di scansione medi. Va precisato che quest'ultimo fattore è molto lontano dall'effettivo computo del tempo di produzione poiché sia le geometrie che le preparazioni mutano considerevolmente al variare della geometria e del materiale in gioco. Tuttavia, è stata effettuata un'analisi preliminare in tal direzione. La Tabella 1 mostra valutazioni fatte per tre possibili materiali. Sembra ombra di dubbio risulta particolarmente vantaggioso l'utilizzo dell'alluminio che presenta il costo inferiore a parità di volume del componente e la maggiore velocità di produzione. Ciò principalmente è dovuto alla bassa densità e al basso costo del semilavorato. Oltretutto l'alluminio soddisfa il requisito di basso impatto a fine vita data la sua predisposizione alla riciclabilità.

Tabella 1 Costi e velocità di produzioni di possibili candidati

Unità	Costo [€/kg]	Densità [kg/dm ³]	Costo per litro di componente [€/dm ³]	Velocità di produzione [cm ³ /h]
Acciaio 316L	100 €	7,8	780	7,2
Titanio Ti6Al4V	150 €	4,4	660	13,5
Alluminio AlSi10Mg	70 €	2,7	189	18,36

2.4 Composizione chimica

La lega considerata è attraente poiché semplifica il processo metallurgico della lavorazione [4]. A seguire si riporta la composizione di tale materiale nella forma industrialmente impiegata nel SLM (Tabella 2).

Tabella 2 Composizione chimica del AlSi10Mg standard

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
9-11	≤ 0.55	≤ 0.05	≤ 0.45	0.20-0.45	≤ 0.05	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.15	Bal.

Le misure effettuate su tali polveri commerciali hanno fornito i risultati riportati in Tabella 3. Si può osservare come i limiti di definizione sono pienamente rispettati.

Tabella 3 Composizione chimica del AlSi10Mg rilevata in laboratorio in spettrometria ad emissione al plasma ICP-SP12 modello TJA Iris Advantage radiale

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
9.2	0.17	≤ 0.01	0.02	0.42	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	Bal.

Come si nota la lega di alluminio è ad alto contenuto di silicio. L'aggiunta del silicio permette, infatti, di aumentare la colabilità del materiale e la scelta di una lega prossima all'eutettico consente di limitare il contenuto di gas disciolti e di ridurre l'ampiezza dell'intervallo di solidificazione. Da quest'ultima caratteristica deriva la fragilità a caldo che nel SLM potrebbe essere particolarmente frequente dato l'elevato gradiente ingenerato nella lavorazione. Le leghe di alluminio per getti più diffuse presentano un contenuto di silicio compreso fra il 5% ed il 13% proprio perché è necessaria un'elevata colabilità unitamente ad una discreta resistenza meccanica ed una buona resistenza alla corrosione. Tali proprietà sono particolarmente gradite per l'applicazione specifica di questo progetto.

2.5 Proprietà meccaniche

La lega AlSi10Mg presenta interessanti caratteristiche meccaniche quando prodotta in SLM rispetto alle tecnologie tradizionali come fonderia e deformazione plastica. Le prove meccaniche sono state condotte in accordo alla norma ASTM E8/E8M sezione 4 relativa ai prodotti mediante tecnologie basate sulle polveri. La geometria del provino è quella mostrata in Figura 3.

Le prove sono state condotte su una macchina di trazione servo-idraulica MTS con massima forza di 250kN e 150 mm di massima corsa. La velocità di prova è stata fissata in 0.05 mm/min per rispettare le condizioni quasi statiche suggerite dalla norma. In Figura 4 è mostrato il diagramma sigma-epsilon di tre provini testati impiegando parametri standard del produttore EOS su una macchina EOS M290. Si osserva un comportamento caratterizzato da grande ripetibilità.

Calcolando le grandezze meccaniche salienti si ottengono ottimi risultati specialmente se paragonati a quelli normalmente ottenuti mediante tecniche tradizionali. In Tabella 4 tali risultati sono riportati insieme alla variabilità a 2σ : le prove sui provini prodotti in SLM sono in accordo a quelle indicate dal costruttore con una leggera deviazione per la duttilità. Infatti, l'elongazione a rottura risulta inferiore di circa il 20% a quella dichiarata.

Nella realtà ciò è dovuto al fatto che si è proceduto ad effettuare le prove su provini "as is" vale a dire senza lavorazione aggiuntiva. Ciò è stato scelto poiché, dati gli scopi del progetto, si vuol sapere quale che sia la resistenza senza lavorazioni superficiali. Infatti, l'elemento più sollecitato è la palettatura che risulterebbe molto costoso da lavorare per asportazione successiva. Lo scopo del progetto è stabilire delle modalità operative in grado da evitare tale necessità. Ciò vale a dire produrre le superfici più articolate direttamente con la tecnica additiva. È noto come una superficie non lavorata proveniente da una tecnica metallurgica sia fortemente affetta da piccole difettosità superficiali da cui si possono innescare cricche. Nel caso di una prova statica si intuisce come sia l'innescò a frattura a verificarsi. Si nota come dalla Figura 4 la epsilon connessa con la rottura sia molto variabile. Pertanto, non è sorprendente una riduzione delle prestazioni in un provino non lavorato esternamente. Se confrontiamo i risultati con un oggetto dello stesso materiale prodotto per colata in conchiglia, emerge che le prestazioni sono notevolmente migliori. Ovviamente le condizioni sono profondamente diverse e, quindi, anche questo risultato era atteso. In SLM vi è una fusione

locale tramite laser in atmosfera protetta da argon mentre in colata in conchiglia l'atmosfera è in presenza di ossigeno e azoto entrambi utili alla reattività dell'alluminio. Le tensioni di snervamento e quella di rottura sono pertanto molto più bassa per la presenza di ossidi e difetti in genere all'interno del pezzo. Ciò si riflette anche sull'elongazione a rottura che è notevolmente inferiore rispetto al prodotto fabbricato in SLM. Contrariamente, il modulo di Young non viene influenzato.

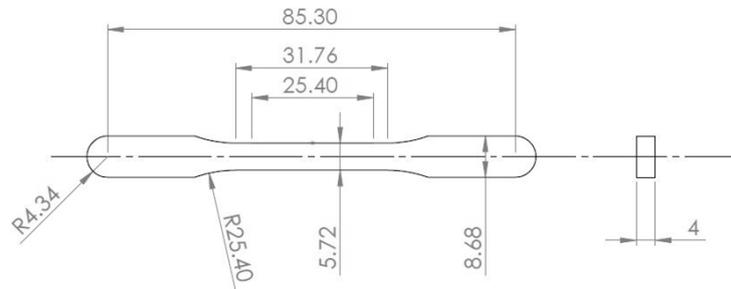


Figura 3 Dimensioni del provino di trazione in accordo alla norma ASTM E8/E8M

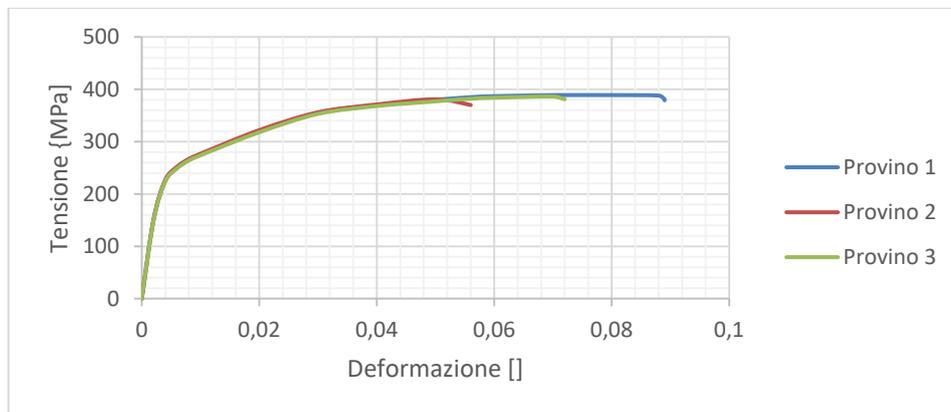


Figura 4 Diagramma di trazione per tre campioni

Tabella 4 Risultati delle prove condotte sui provini in SLM rispetto a quelli in colata in conchiglia e ai dati del costruttore

	Dati dichiarati dal costruttore	Risultato delle prove	Risultati su un provino colato in conchiglia
Tensione di rottura	460±20MPa	453±16GPa	317 MPa
Tensione di snervamento	270±20MPa	241±14GPa	165MPa
Elongazione a rottura	10±2%	8±1.1%	3.5%
Modulo di Young	70GPa	69±0.4GPa	71GPa

2.6 Granulometria e morfometria delle polveri

La granulometria delle polveri di ingresso è un elemento molto importante da discernere poiché errori nella generazione del letto di polveri non possono essere sormontati dall'azione del laser e, pertanto, si riflettono in dirette problematiche del pezzo finale [5]. Per tale motivo la distribuzione granulometrica deve essere limitata superiormente ad un valore compatibile con lo spessore del layer. Le polveri commerciali di AlSi10Mg che si impiegano generalmente sono processate ad uno spessore degli strati di 30 µm. Più precisamente è il valore che nel presente progetto è stato scelto per ottenere una finitura superficiale di partenza sufficiente ad un possibile miglioramento. Maggiore è il layer peggiore sarà la finitura dell'oggetto ottenibile per ovi motivi di staircase sulle superfici inclinate rispetto alla direzione di stratificazione.

Tuttavia, la distribuzione granulometrica non è sufficiente per stabilire se la generazione dello strato sarà adeguatamente priva di difetti come mancanze di polvere e occorre garantire la fluidità delle polveri poiché il recoater deve poterle distribuire con facilità. Tale fattore è direttamente connesso con la rotondità delle particelle che consente una facile plasticizzazione nonché un valido riempimento. Per i suddetti motivi si è effettuata un'analisi diretta delle polveri tramite microscopia e successiva analisi delle immagini piuttosto che la diffrazione laser. La seconda infatti fornisce in modo indiretto solo la distribuzione dei diametri equivalenti ed è suscettibile della forma delle particelle che è ignota. Si definisce diametro equivalente il diametro di una sfera con la stessa superficie rilevata della particella reale. Attraverso una misura diretta sulla geometria è invece possibile fornire sia una quantificazione morfometrica che morfologica.

Numerosissime scansioni al SEM hanno permesso il collage dell'immagine complessiva riportata in Figura 5. A una prima analisi ad occhio nudo si notano numerosi aggregati che probabilmente intralceranno la capacità del recoater di spargere uniformemente le polveri.

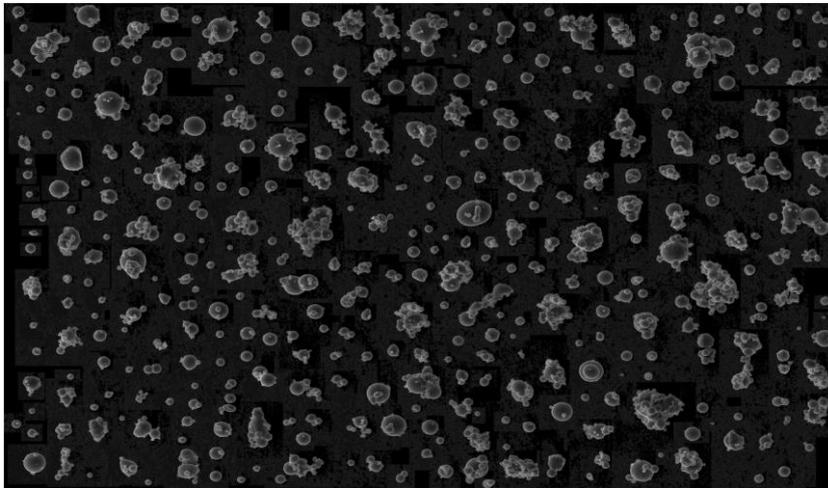


Figura 5 Composizione di numerose immagini effettuate al SEM

La velocità di ricoprimento è un parametro che va accuratamente considerato. Ad esempio, è errore comune ridurre la velocità del recoater in situazioni di ricoprimento non completo: tale azione non ha sempre benefici poiché l'azione dinamica che può fornire in casi come quello riportato in Figura 5 può separare numerosi aggregati caratterizzati da bassa energia di coesione. Sarà proprio questo lo spirito con cui è stata scelta la velocità del recoater che ha fornito i risultati delle prove di trazione precedentemente riportati. Mancanze di materiale ovviamente si ripercuotono in riduzioni delle prestazioni meccaniche evidenti nelle prove di resistenza. Attraverso routine sviluppate in ambiente Wolfram Mathematica 12 è stato possibile segmentare le singole particelle e procedere ad un'analisi automatica delle regioni. In Figura 6 è riportato il set di 437 particelle usate per l'analisi del presente progetto.

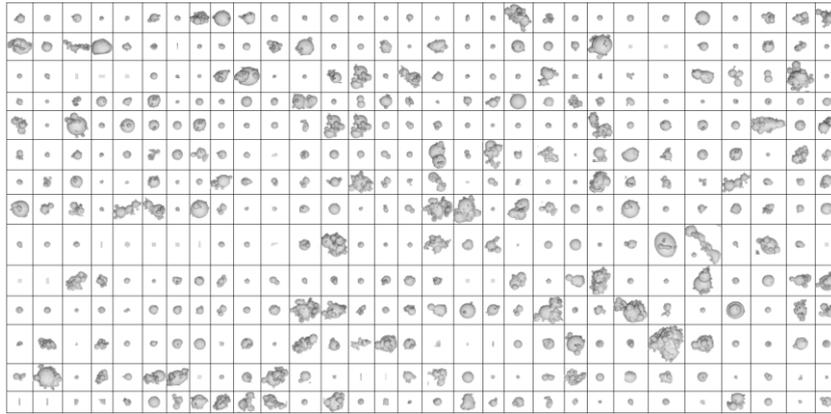


Figura 6 Particelle segmentate mediante tecniche di analisi delle immagini

Come anticipato, il diametro equivalente costituisce un mezzo tipico di caratterizzazione delle particelle solide. Misurando digitalmente l'area di ogni regione correlata a ciascuna particella è stato possibile calcolare efficientemente tale valore la cui distribuzione è riportata in Figura 7.

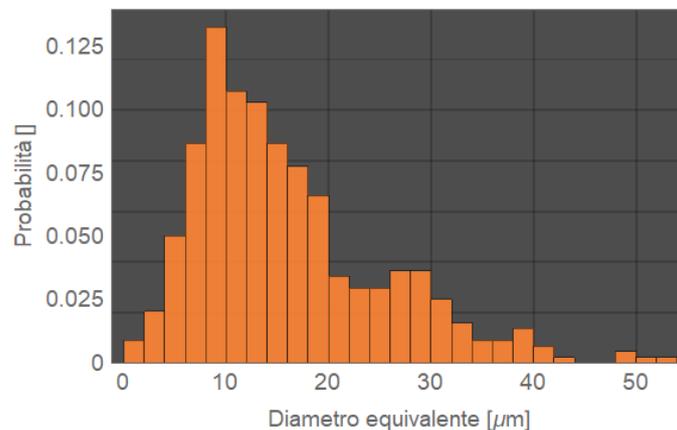


Figura 7 Distribuzione dei diametri equivalenti delle particelle misurate

Si nota come la distribuzione ha uno skewness positivo di 1.12 ovvero sia spostata verso i valori bassi del range dei diametri rilevati. Ciò era atteso poiché in un processo di gas atomizzazione le particelle piccole sono spesso più probabili. Sotto 10 μm è evidente come sia stato effettuato un taglio: ciò è molto importante poiché sotto tale soglia le polveri sottili possono intasare facilmente il sistema di ricircolo del gas protettivo del sistema di produzione complicando notevolmente il processo con costosi interventi.

La rappresentazione di Figura 7 dei diametri equivalenti non è tuttavia ciò che tipicamente si usa per la caratterizzazione: infatti si preferisce osservare la distribuzione non come probabilità o occorrenza ma come frazione di volume. È ovvio che le particelle piccole pesano su tale distribuzione molto meno di quelle grandi. La rappresentazione è mostrata in Figura 8. La distribuzione rilevata è ora centrata con un'eccezione di un'aggiunta sui valori di circa 50 μm. Si tratta di pochi elementi costituiti da grandi aggregati facilmente disintegrabili dal recoater. Se ciò non dovesse avvenire, il valore non deve spaventare poiché si usa uno spessore del layer di soli 30 μm: infatti il recoater per effettuare la spargimento delle polveri si posiziona molto più in alto dello spessore del layer poiché va distribuito un ammontare di polveri che tenga in considerazione i vuoti, il ritiro in fase liquida, le perdite per flussi piroclastici prodotti dall'azione fortemente energetica del laser. Grossolanamente il layer viene moltiplicato per un fattore circa 2 per la lega di alluminio in questione. Ciò è principalmente dovuto alla bassa densità e alla facilità da parte del flusso protettivo di argon di portare via materiale dal letto.

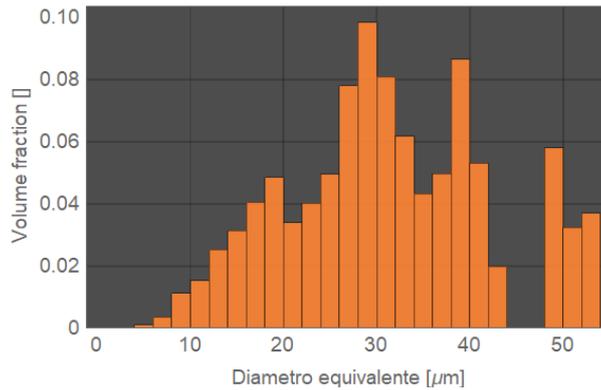


Figura 8 Distribuzione della frazione di volume dei diametri equivalenti delle particelle misurate

Come già premesso si è effettuata anche un'analisi della sfericità delle polveri per determinarne la fluidità. Ciò si traduce nel calcolo dell'indice di sfericità. Esso è definito come il rapporto tra la superficie della particella e quella di un disco avente la stessa area misurata. Per valori prossimi all'unità la particella è particolarmente sferica, mentre per valori più bassi sussistono delle deviazioni dalla curvatura costante. Per ogni particella è stato calcolato questo indice ed è stato analizzato costruendo una distribuzione dei valori. In Figura 9 si riportano i risultati con la cura di porre in alto una particella rappresentativa del bin considerato nell'istogramma.

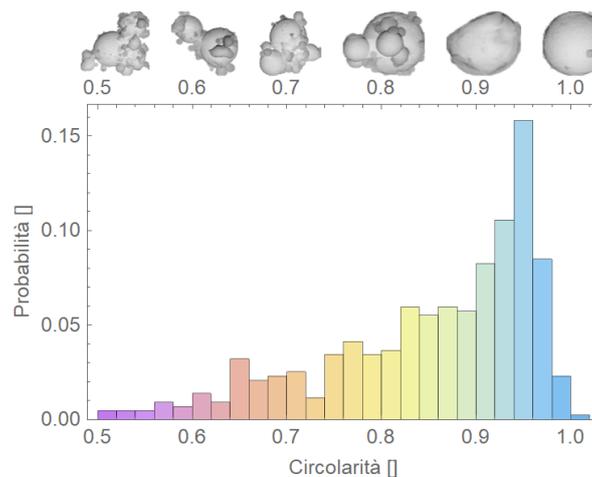


Figura 9 Distribuzione dei valori di circolarità per le particelle misurate

Il risultato è promettente: infatti seppur considerando la probabilità invece che la frazione di volume, si osserva chiaramente come la maggior parte delle particelle ha una forma sferica. Inoltre, la circolarità relativamente scadente di 0.5 è relativa ad aggregati che probabilmente verranno separati dall'azione del recoater.

3 Attività LA1.2: riduzione delle operazioni di finitura secondaria

3.1 Premessa

L'ottenimento di superfici funzionali è lo scopo delle tecnologie manifatturiere. Tra gli elementi di funzionamento vi è lo stato delle superfici. Purtroppo, questo attributo è quello più limitante la tecnologia

di SLM quando si parta di applicazioni meccaniche. Per una turbina Pelton possiamo distinguere due tipi di superfici funzionali: quella di accoppiamento con il mozzo e quelle a contatto con il fluido. La prima è considerevolmente semplice da trattare come già anticipato al Capitolo 1 mentre il dover intervenire sulle seconde costituisce la vanificazione dei vantaggi dell'implementazione del SLM poiché significherebbe impiegare considerevoli risorse per condizionare superfici di così grande complessità geometrica. Tuttavia, si considereranno alcune tipologie di azioni per valutare alternative.

3.2 Operazioni di finitura secondarie

Cinque famiglie di tecnologie ancillari sono state considerate per effettuare una riduzione della rugosità ottenibile con il processo SLM. Va premesso che il livello di rugosità è anisotropo e dipende dal cosiddetto angolo di stratificazione locale definito come l'angolo tra il vettore normale alla zona superficiale considerata e il vettore di stratificazione. Quando tale angolo è maggiore di $6-7^\circ$ e inferiore a 115° si ottengono rugosità medie prossime o di poco superiori a $20 \mu\text{m}$ [6]. Se l'angolo è inferiore a $6-7^\circ$, vale a dire per superfici quasi orizzontali la rugosità scende fino ad un valore di circa $6 \mu\text{m}$ per superfici perfettamente orizzontali poiché il laser è esattamente perpendicolare alla superficie. Quando l'angolo di stratificazione locale è maggiore di 115° le superfici sono aggettanti e numerosi effetti come il dropping (la percolazione di liquido nelle polveri sottostanti) provoca un deciso peggioramento della finitura finale superando i $45 \mu\text{m}$ Ra [7]. In Figura 10 vengono mostrati i valori di rugosità sperimentali misurati su diversi angoli di stratificazione locale insieme ad un modello di previsione per la lega AlSi10Mg [8]. Nel grafico non sono riportati i dati di superfici con angoli superiori a 135° poiché generalmente tali superfici così aggettanti sono caratterizzate da strutture di supporto che quindi arrecano ulteriori difetti.

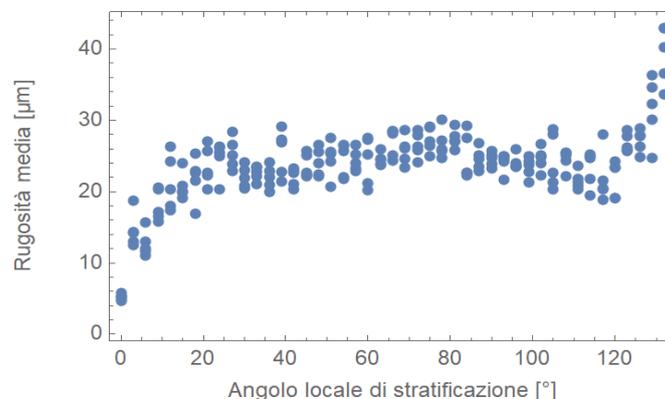


Figura 10 Andamento dei dati sperimentali di rugosità media in funzione dell'angolo locale di stratificazione

Da questa descrizione è chiaro come una rugosità così elevata va migliorata al fine da non limitare l'efficienza della girante.

Le tecnologie considerate sono: la finitura elettrochimica, la finitura secondaria con fascio laser, la finitura di massa ad alta energia, la finitura di massa a bassa energia, la fresatura a 5 assi controllati. Per determinare la fattibilità di queste famiglie di lavorazione si sono considerati diversi criteri. Il primo è la capacità di ottenere la finitura richiesta. Potenzialmente tutte queste categorie possono fornire livelli di rugosità piuttosto bassi utili ai fini dell'uso del componente. Il secondo criterio è quello di poter applicare il metodo a superfici complesse. Le prime due famiglie in questo caso hanno numerose limitazioni poiché gli elettrodi nel primo caso e il fascio laser nel secondo si trovano in chiara difficoltà con superfici così complesse come la paletta Pelton. L'azione dinamica è molto importante come ulteriore criterio. La finitura di massa è molto promettente anche se limitata dall'enorme rugosità di partenza rispetto agli scopi che ci si prefigge. Non si conoscono infatti documenti in cui si sono condotti esperimenti con tali valori all'inizio

della lavorazione di finitura. Inoltre, le tecniche ad alta energia devono essere usate con cautela quando siano in gioco turbine con piccoli dettagli come il coltello e le superfici laterali che sarebbero assoggettati a forti sollecitazioni dato l'elevata tenacità superficiale dell'alluminio rispetto all'implementazione di flussi granulari sciolti. Nelle lavorazioni di massa a bassa energia gli utensili impiegati sono molto più grandi ma l'energia cinetica da essi posseduta può essere limitata dai piccoli pertugi che si trovano tra le singole palette. Ciò richiamerebbe la necessità di fabbricare la girante con palettatura separata e con l'esigenza di provvedere alla progettazione delle superfici di accoppiamento per l'assemblaggio successivo alla finitura secondaria. Stesso ragionamento si deve applicare all'accessibilità utensile necessaria alle lavorazioni a controllo numerico. Le forze in tali lavorazioni possono essere ottimizzate attraverso l'accurata scelta dei parametri di processo come impegno assiale, impegno radiale, avanzamento per dente giro, strategia di sgrossatura e finitura, etc. la lavorazione senz'altro non è limitata dalla rugosità di ingresso, tuttavia la sua implementazione richiede ingenti costi sia in termini di tempi di lavorazione che del tempo necessario alla programmazione della toolpath per una macchina a 4 o 5 assi.

Da quanto detto emerge la conclusione che è necessario intervenire sulla rugosità ottenibile nel processo SLM per consentire una riduzione consistente alla necessità di finiture secondarie. Se si eccettua la semplice lavorazione del mozzo, l'ideale sarebbe la totale eliminazione di tali operazioni che richiedono una progettazione integrata (per l'adozione di specifici sovrametalli necessari alle lavorazioni successive) della girante stessa. Il target è ottenere rugosità medie dell'ordine di 4-5 μm nelle zone funzionali tollerando valori più elevati in zone non importanti all'esercizio del componente.

3.3 Ottimizzazione del processo di SLM ai fini della rugosità superficiale

Nel processo SLM il trasferimento di energia avviene tramite l'adozione di un laser beam che provoca l'innalzamento di temperatura di una piccola zona del letto di polvere e la conseguente liquefazione. L'energia che si trasmette è funzione di diversi fattori come la capacità della superficie di assorbire nella lunghezza d'onda usata, la conducibilità del materiale, ma soprattutto aspetti cinematici e geometrici come la velocità di scansione, lo spessore del layer e la strategia di scansione e, ovviamente, la potenza del laser impiegata [9]. Nella letteratura scientifica è accreditato l'uso di un parametro chiamato densità di energia volumetrica (VED):

$$VED = \frac{P}{L v h_d}$$

dove P è la Potenza del laser, L è lo spessore del layer, v è la velocità di scansione e h_d è la distanza tra due scansioni adiacenti. Ciò vale solo per superfici orizzontali dove la scansione interessa superfici che sono esterne. I cosiddetti contorni non sono interessati dalla strategia interna, pertanto, si definisce un'alternativa alla precedente grandezza che è denominata densità di energia lineare (LED).

$$LED = \frac{P}{v}$$

In letteratura vi è un grande uso di dette grandezze allo scopo di individuare un set di parametri utili all'ottenimento di benefici sul processo di lavorazione. I parametri standard di processamento del AlSi10Mg mediante SLM sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5 Parametri di processo standard per la fabbricazione in SLM della lega AlSi10Mg

Parametro	Unità	Valore
Potenza del laser	W	370
Spessore del layer	μm	30
Velocità di scansione	mm/s	1300
Distanza tra le scansioni	μm	190

Temperatura della piattaforma	°C	200
Strategia di scansione	-	Stripe con lunghezza massima di 7 mm e sovrapposizione di 0.02 mm
Rotazione tra i layer	°	67

Effettuando i calcoli, i valori di VED e LED sono rispettivamente 49.93 J/mm³ e 0.28 J/mm. L'idea è quella di considerare il componente prodotto diviso nella sua superficie esterna e il volume interno. Si impiegherà un'operazione denominata remelting vale a dire ogni singola scansione sarà caratterizzata da un processo con parametri standard aggiungendo un'ulteriore scansione per le sole scansioni relative alle superfici esterne. I parametri di processo di tale ulteriore scansione non sono però chiare specialmente per la lega scelta. Per questo motivo si è operato uno studio dei lavori tecnici e scientifici in cui si sono svolte delle attività sperimentali con scansioni aggiuntive in-process su superfici di parti fabbricate in SLM. L'esito di tale ricerca bibliografica è riportato in Tabella 6. Sfortunatamente si tratta di lavori che non hanno avuto nessun risultato su geometrie complesse ma si sono limitati a studi su provini parallelepipedi investigando superfici tutt'al più orizzontali o verticali. Le informazioni sono solamente indicative ma sono utili a stabilire che tipo di range dei parametri di processo può essere esplorato. Dovrà senz'altro essere aggiunto un contributo geometrico connesso con le superfici inclinate, sia aggettanti che non aggettanti. Ulteriore limitazione alle informazioni riportate è che non sempre è stato possibile definire i valori di entrambe le grandezze proprio per struttura dell'esperimento o per mancanza di valori forniti nei paper.

Tabella 6 Ricognizione della letteratura tecnica e scientifica in merito ai valori di LED e VED impiegati in sperimentazioni di laser remelting

Paper	Anno	Lega	Sistema	superfici	LED	VED
[10]	2018	AlSi10Mg	Renishaw AM400	Orizzontali Verticali		125-275 J/mm ³
[11]	2018	AlSi10Mg	EOS M290	Orizzontali		132.6 J/mm ³
[12]	2020	SS316L	EP-M250	Orizzontali	0,11-0,45 J/mm	
[13]	2019	AlSi10Mg	SLM 280HL	Orizzontali Verticali		146-200 J/mm ³
[14]	2011	AISI316L	Concept Laser M3	Orizzontali Verticali	0,1-0,125 J/mm	158 J/mm ³
[15]	2017	18Ni300	Renishaw AM250	Verticali	0,214 J/mm	53 J/mm ³
[16]	2019	AlSi10Mg	Concept Laser M2	Verticali	0,45-2 J/mm	
[17]	2019	AlSi10Mg	Renishaw AM 400	Orizzontali		175 J/mm ³
[18]	2019	AlSi10Mg	SLM 280 HL	Orizzontali Verticali		59,7 J/mm ³

3.4 Design of Experiments

Alla luce della ricerca effettuata si stabiliscono i parametri di processo da modificare e i loro livelli. Per le superfici orizzontali in cui la scansione interna è proprio quella dell'interno si aggiunge una scansione con i parametri imputati alla definizione della densità di energia volumica, vale a dire P, v e Hd. Per le altre superfici vanno considerate le scansioni denominate contour dove P e v sono essenziali per la determinazione dell'importante grandezza LED. In aggiunta si vuol investigare l'effetto del posizionamento della scansione aggiuntiva rispetto alla precedente. Il parametro relativo è il contour offset che potrebbe avere effetto sul risultato finale. Dopo attente analisi i valori dei livelli di detti parametri sono stati fissati come riportato in Tabella 7 dove per upskin si intendono le superfici orizzontali mentre per contour quelle caratterizzate da un angolo di locale stratificazione diverso da 0, vale a dire tutte le altre. In definitiva si esplorerà un campo di variazione della VED tra 45 e 222 J/mm³ mentre per la LED il campo è 0.34-1.44 J/mm.

Tabella 7 Livelli dei fattori considerati nel piano sperimentale

Upskin			Contour		
Parametro	Livello basso	Livello alto	Parametro	Livello basso	Livello alto

Potenza	270 W	360 W	Potenza	270 W	360 W
Velocità di scansione	600 mm/s	1100 mm/s	Velocità di scansione	250 mm/s	800 mm/s
Distanza tra due scansioni	0.09 mm	0.18 mm	Distanza tra due scansioni	0 mm	0.06 mm

La geometria del provino dovrà comprendere non solo superfici orizzontali e verticali ma anche quelle inclinate. Per tale motivo si è disegnata una forma romboidale posizionata come in Figura 11. Con questa geometria sarà possibile investigare quattro angoli differenti: oltre che 0° e 90° si prenderanno le misure su superfici inclinate di 45° e 135°. Come riportato in figura la parte inferiore del provino sarà supportata. Le strutture saranno progettate di tipo block come da preferenza per tale lega: si tratta di strutture sottili verticali con dei pin triangolari a contatto con le superfici da supportare che limitano considerevolmente gli sforzi in fase di post-processing lasciando difetti minimi.

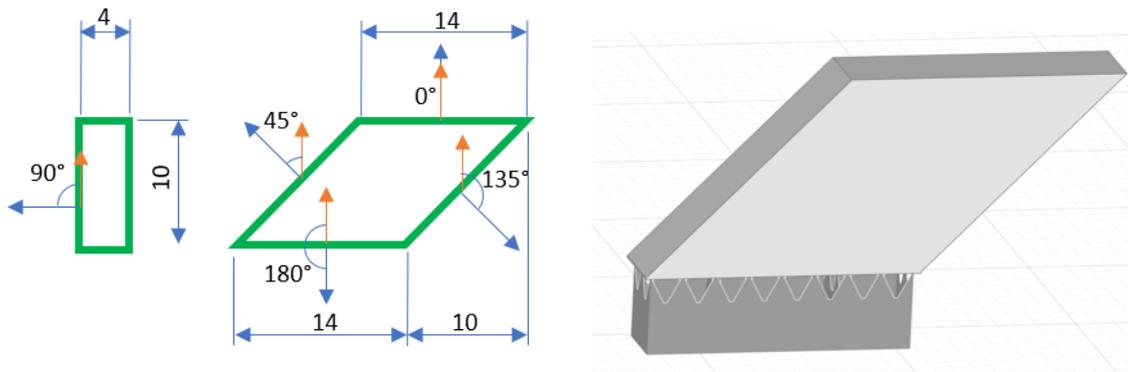


Figura 11 Geometria del provino impiegata nella sperimentazione

In definitiva poiché i livelli dei fattori sono 2 e il numero totale dei fattori è 3 si avranno un totale di 24 provini considerando un numero di ripetizioni pari a 3.

Il sistema impiegato per la fabbricazione è la macchina commerciale EOSINT®M290 equipaggiata con un laser a itterbio con potenza massima di 400 W e uno diametro dello spot di 100 μm . La piattaforma di fabbricazione è di 250 \times 250 mm^2 e l'altezza massima di fabbricazione è di 325 mm. Si tratta di un sistema molto diffuso commercialmente che ha dettato canoni progettuali per altre macchine e, di fatto, è stato e viene riprodotto da numerose aziende della concorrenza. Prima di effettuare le prove la macchina è stata calibrata in accordo alle specifiche del costruttore procedendo alla fabbricazione di un oggetto di riferimento mediante il quale è possibile intervenire in determinati fattori di compensazione in macchina. Il laser è stato invece calibrato con un foglio di calibrazione e procedura standard del costruttore basata su misure ottiche in macchina.

La Figura 12 mostra la tavola di lavorazione dopo l'operazione di pulitura delle polveri in eccesso.

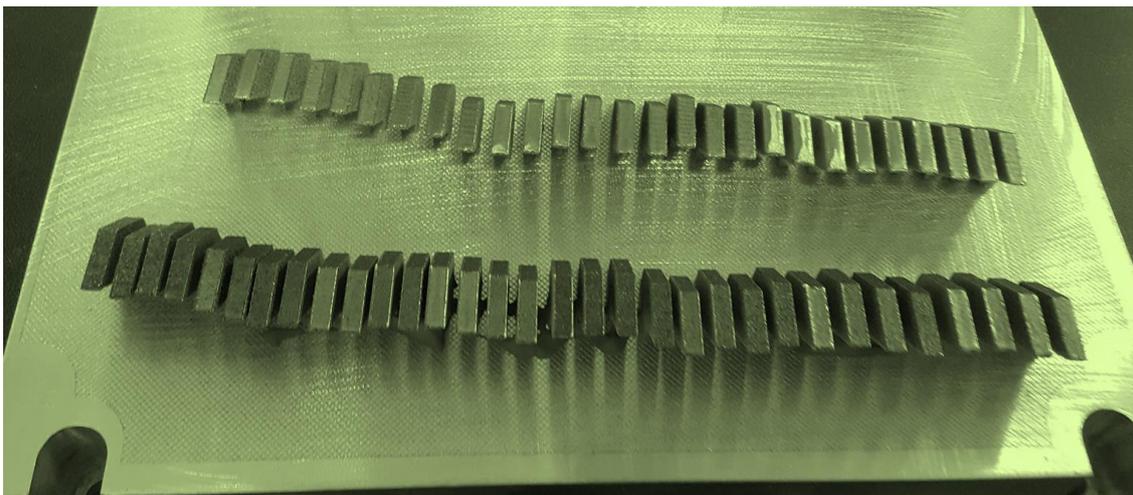


Figura 12 Foto della tavola al termine della fabbricazione

3.5 Misure di caratterizzazione della rugosità superficiale

I provini sono stati caratterizzati in merito alla rugosità delle superfici diversamente orientate tramite la profilometria a contatto. Allo scopo è stato impiegato un rugosimetro dal laboratorio Mitutoyo SurfTest SJ-412. Dato che le rugosità di partenza sono piuttosto elevate si è scelto di impiegare un cutoff di 2.5 mm. Ne deriva che per effettuare un numero soddisfacente di cutoff su cui operare il filtraggio, le misure sono state effettuate per una lunghezza di esplorazione di 12.5 mm. In accordo alle definizioni riportate nella norma ISO 4287 [19]. Poiché le superfici caratterizzate da angolo di locale stratificazione superiore a circa 130° presentano una rugosità superiore a 40 μm ci si aspetta una variabilità dei picchi e delle valli da misurare notevole. Per questo motivo si è equipaggiato il rugosimetro con lo stilo più lungo presente in commercio, vale a dire 180 mm. Ciò permette di estendere il campo di misura verticale dai consueti 800 μm a 2400 μm sufficienti per un' agevole e ripetibile misurazione dei profili. Ogni misura è stata successivamente filtrata impiegando le procedure descritte nella norma ISO 16610-22 [20]. In particolare, considerando il raggio di raccordo dell'elemento diamantato sulla punta dello stilo pari a 1.5 μm , il cutoff di lunghezza d'onda corta è stato fissato a 8 μm . Come già detto il cutoff principale è fissato a 2.5 mm. È naturale pensare che qualche contributo di micro-ondulazione probabilmente filtrato da un cutoff inferiore, qualora le misure di rugosità si trovassero ad essere inferiori a 2 μm (tra 0.1 e 2 μm la norma suggerisce il cutoff immediatamente inferiore pari a 0.8 mm), incrementerebbe sia pure di poco il valore della rugosità misurata con il cut-off superiore. Si tratta di un contributo esiguo come dimostrano alcune prove preliminari (circa il 2-4% in più). In ogni caso va a beneficio della sicurezza nell'affermare una rugosità non superiore al valore rilevato. Le misure di rugosità per i provini upskin (angolo 0°) sono riportate nella Tabella 8.

Tabella 8 Risultati delle misure di rugosità effettuate sulla campagna sperimentale per le superfici orizzontali

Potenza del laser [W]	Velocità di scansione [mm/s]	Distanza tra le scansioni [mm]	Rugosità media Ra (superfici 0°) [μm]
270	600	0,09	1,71
270	600	0,09	1,90
270	600	0,09	1,72
270	600	0,18	4,60
270	600	0,18	4,32
270	600	0,18	4,20
270	1100	0,09	4,50
270	1100	0,09	4,92



270	1100	0,09	3,99
270	1100	0,18	4,24
270	1100	0,18	4,19
270	1100	0,18	4,01
360	600	0,09	1,88
360	600	0,09	1,59
360	600	0,09	1,99
360	600	0,18	1,88
360	600	0,18	1,53
360	600	0,18	1,82
360	1100	0,09	1,98
360	1100	0,09	1,62
360	1100	0,09	1,99
360	1100	0,18	3,89
360	1100	0,18	3,44
360	1100	0,18	3,09
Provino standard senza remelting			7,61
Provino standard senza remelting			7,22
Provino standard senza remelting			7,85

Le misure per le superfici inclinate sono riportate in Tabella 9. Risulta evidente già ad una prima osservazione che la tecnica impiegata permette di ottenere grandi incrementi della qualità superficiale. Occorre però investigare bene quali che siano le combinazioni dei parametri ottimi e, nel caso del contour, poiché non è possibile disaccoppiare le strategie di scansione, effettuare un'ottimizzazione congiunta tra tutti gli angoli investigati.

Tabella 9 Risultati delle misure di rugosità effettuate sulla campagna sperimentale per le superfici inclinate

Potenza del laser	Velocità di scansione	Contour offset	Rugosità media Ra (superfici 45°)	Rugosità media Ra (superfici 90°)	Rugosità media Ra (superfici 135°)
[W]	[mm/s]	[mm]	[μm]	[μm]	[μm]
270	250	0	7,01	6,34	7,34
270	250	0	7,50	5,03	8,48
270	250	0	7,72	6,95	8,11
270	250	0,06	5,53	4,33	8,97
270	250	0,06	4,97	4,71	6,95
270	250	0,06	5,23	4,44	8,45
270	800	0	13,04	13,37	19,50
270	800	0	13,67	11,21	22,45
270	800	0	12,87	11,78	21,56
270	800	0,06	11,65	18,08	35,78
270	800	0,06	10,34	17,02	37,51
270	800	0,06	11,07	17,76	39,76
360	250	0	3,67	3,43	4,55
360	250	0	4,56	2,87	5,11
360	250	0	3,99	3,12	5,98

360	250	0,06	5,03	3,22	5,43
360	250	0,06	3,87	2,87	5,04
360	250	0,06	4,67	2,56	5,22
360	800	0	5,67	4,78	12,13
360	800	0	5,23	5,87	16,31
360	800	0	5,11	6,12	14,53
360	800	0,06	8,08	7,76	30,45
360	800	0,06	6,32	6,97	33,71
360	800	0,06	7,51	7,56	29,07
Provino standard senza remelting			22,45	21,44	43,92
Provino standard senza remelting			21,98	22,93	47,53
Provino standard senza remelting			22,83	22,04	46,30

4 Attività LA1.3: analisi delle superfici e sviluppo di modelli predittivi

4.1 Analisi dei dati relativi alle superfici orizzontali

Le superfici orizzontali sono quelle che meno trovano necessità di intervento rispetto a quelle verticali. Sfortunatamente sono anche quelle la cui pianificazione dell'operazione aggiuntiva di remelting è più facile perché disaccoppiata da tutte le altre. Si procede ora all'analisi dei dati sperimentali con approccio statistico. In Figura 13 sono riportati i main effect plot sulla rugosità media. Tutti e tre i fattori considerati sono incisivi sull'output con andamenti attesi: la rugosità migliora all'aumentare della potenza del laser al diminuire della velocità di scansione e al diminuire della distanza tra le scansioni Hd. Il che è come affermare che la rugosità migliora con l'aumentare della densità di energia volumica.

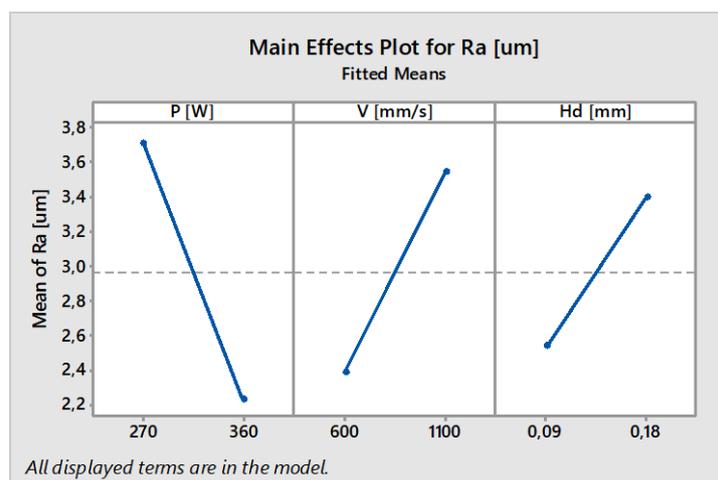


Figura 13 Main effect plot dei dati di rugosità per superfici orizzontali

I parametri considerati potrebbero essere tra di loro collegati cioè avere delle interazioni a livelli diversi. Analizzando gli interaction plot di Figura 14 tale interazione non è così evidente per la potenza e la distanza tra le scansioni mentre sembra avere effetto nelle altre due interazioni.

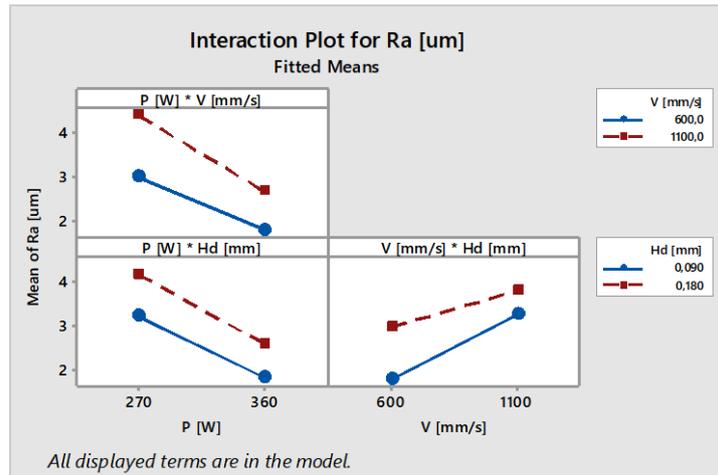


Figura 14 Interaction plot dei dati di rugosità per superfici orizzontali

Si effettua ora una regressione lineare dei dati con contestuale analisi Anova.

In Tabella 10 i risultati di regressione sono mostrati nella classica forma. Si nota come quasi tutti i parametri hanno una significatività inferiore a 0.01. Fa eccezione l'interazione precedentemente sospettata che ha una p di 0.311. Poiché l'interazione di ordine superiore è significativa, tale variabile non verrà cancellata dal modello.

Tabella 10 Analisi della varianza della regressione sui dati di rugosità delle superfici orizzontali

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	34,6667	4,9524	107,48	0,000
Linear	3	25,4847	8,4949	184,35	0,000
P [W]	1	13,0833	13,0833	283,93	0,000
V [mm/s]	1	7,9811	7,9811	173,20	0,000
Hd [mm]	1	4,4204	4,4204	95,93	0,000
2-Way Interactions	3	1,0851	0,3617	7,85	0,002
P [W]*V [mm/s]	1	0,4267	0,4267	9,26	0,008
P [W]*Hd [mm]	1	0,0504	0,0504	1,09	0,311
V [mm/s]*Hd [mm]	1	0,6080	0,6080	13,20	0,002
3-Way Interactions	1	8,0968	8,0968	175,72	0,000
P [W]*V [mm/s]*Hd [mm]	1	8,0968	8,0968	175,72	0,000
Error	16	0,7373	0,0461		
Total	23	35,4039			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0,214661	97,92%	97,01%	95,31%	

La Figura 15 mostra il diagramma di Pareto dei fattori e delle interazioni tra i fattori del modello considerato. Solo l'interazione su menzionata ha un rischio di prima specie superiore al 5%.

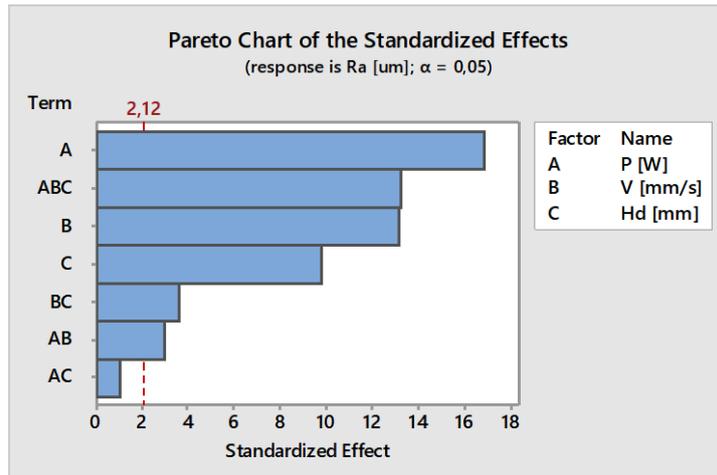


Figura 15 Digramma di Pareto dei fattori considerati per il modello di rugosità per superfici orizzontali

Il valore della varianza è piuttosto contenuto considerando che si sta parlando di rugosità. La vicinanza tra i valori di R-sq e Rq aggiustato sono molto alti e vicini tra loro. Pertanto, il numero di dati non influisce sulle deduzioni statistiche inerenti al modello. Anche il valore di R-sq predetto è molto alto indicando che il modello ha un'elevata capacità di prevedere nuovi dati. Il modello così determinato è espresso dall'equazione seguente:

$$R_a = -42,35 + 0,1284 P + 0,05674 V + 335,9 Hd - 0,000167 P * V - 0,9979 P * Hd - 0,3756 V * Hd + 0,001147 P * V * Hd$$

Effettuando un'analisi dei residui è possibile valutare la bontà del modello in modo puntuale. Il grafico di Figura 16 mostra un andamento dei residui con qualche determinismo probabilmente non considerato. Tuttavia, le curve in rosso, che rappresentano una confidenza del 95%, denotano che tutti i punti possono essere considerati casuali. Ciò è confermato dal test di Anderson-Darling che fornisce una p di 0.397.

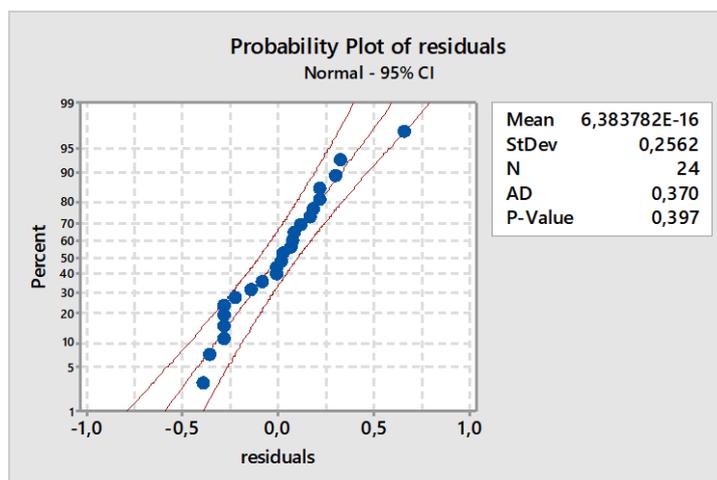


Figura 16 Analisi dei residui del modello sui dati di rugosità per superfici orizzontali

Il grafico a contorni del modello è riportato in Figura 17.

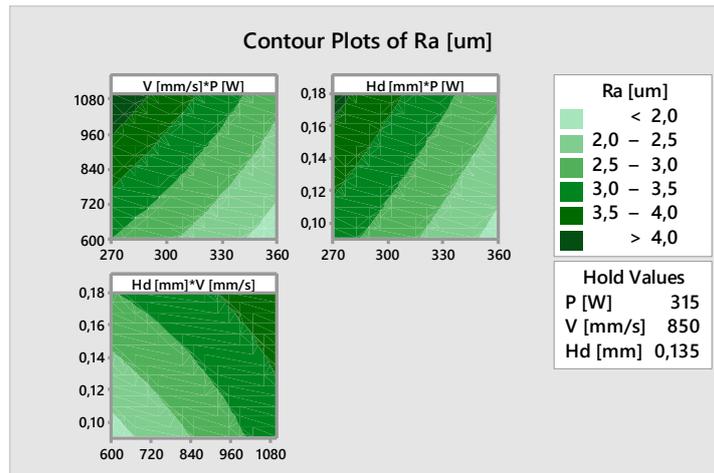


Figura 17 Contour plot del modello dei dati di rugosità per superfici orizzontali

4.2 Analisi dei dati relativi alle superfici con angolo di locale stratificazione di 45°

I dati relativi alle superfici a 45° sono stati analizzati in modo analogo. I Main effect plot riportati in Figura 18 mostrano che la potenza del laser e la velocità di scansione offrono un contributo molto più alto rispetto al contour offset. Tuttavia, c'è una forte interazione di questo fattore con la potenza del laser (Figura 19).

L'analisi della varianza mostra che l'interazione del terzo ordine questa volta non è significativa così come l'interazione tra velocità e contour offset (Tabella 11). Il diagramma di Pareto di Figura 20 mostra la T-student calcolata per tutti i fattori. Si osserva come il fattore contour offset sia particolarmente vicino al limite.

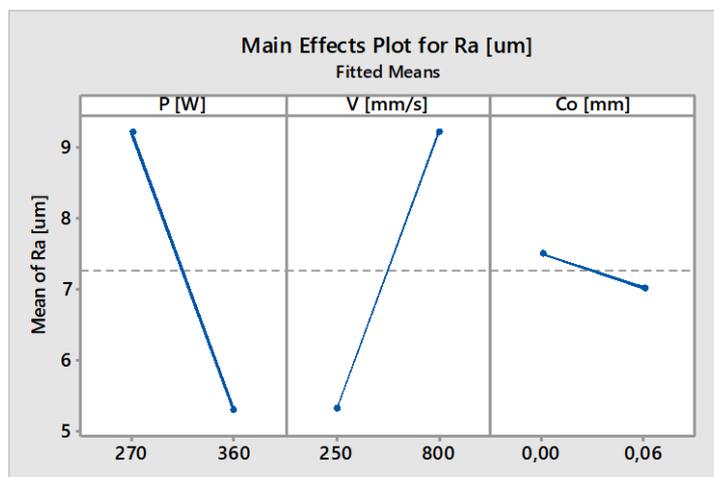


Figura 18 Main effect plot dei dati di rugosità per superfici a 45°

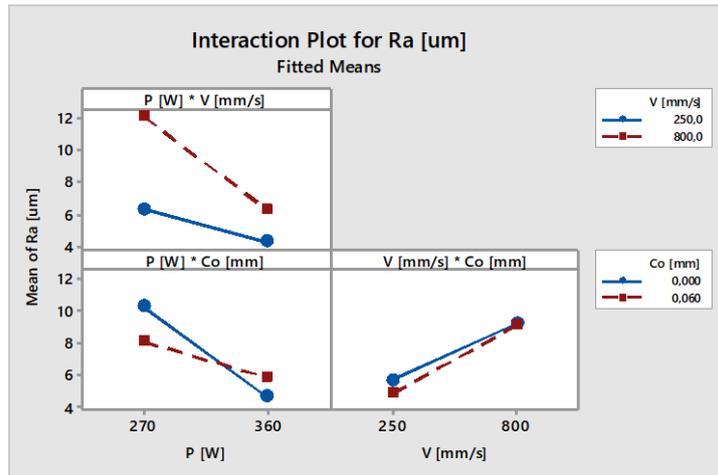


Figura 19 Interaction plot dei dati di rugosità per superfici a 45°

Tabella 11 Analisi della varianza della regressione sui dati di rugosità delle superfici a 45° con tutti i termini

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	224,330	32,0472	113,03	0,000
Linear	3	184,298	61,4325	216,66	0,000
P [W]	1	91,611	91,6113	323,10	0,000
V [mm/s]	1	91,299	91,2990	322,00	0,000
Co [mm]	1	1,387	1,3872	4,89	0,042
2-Way Interactions	3	39,162	13,0541	46,04	0,000
P [W]*V [mm/s]	1	21,188	21,1876	74,73	0,000
P [W]*Co [mm]	1	17,120	17,1197	60,38	0,000
V [mm/s]*Co [mm]	1	0,855	0,8550	3,02	0,102
3-Way Interactions	1	0,870	0,8702	3,07	0,099
P [W]*V [mm/s]*Co [mm]	1	0,870	0,8702	3,07	0,099
Error	16	4,537	0,2835		
Total	23	228,867			

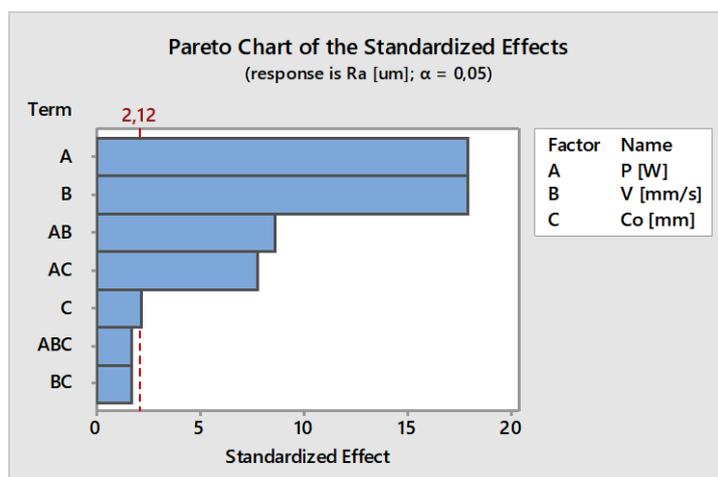


Figura 20 Digramma di Pareto dei fattori considerati per il modello dei dati di rugosità per superfici a 45°

Ripetendo l'analisi della regressione senza questi due contributi anche il fattore contour offset diventa non significativo con un rischio del 5%. Ripetendo ulteriormente l'analisi si giunge alla Tabella 12. In questo caso non è stato possibile rimuovere il fattore principale scarsamente significativo poiché ha interazione con altri fattori che risultano significative. Gli stimatori R-sq sono decisamente a favore di questo modello mostrano sia robustezza alla numerosità che predittività per nuovi dati.

Tabella 12 Analisi della varianza della regressione sui dati di rugosità delle superfici a 45° con i soli termini significativi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	222,605	44,5210	127,98	0,000
Linear	3	184,298	61,4325	176,59	0,000
P [W]	1	91,611	91,6113	263,34	0,000
V [mm/s]	1	91,299	91,2990	262,44	0,000
Co [mm]	1	1,387	1,3872	3,99	0,061
2-Way Interactions	2	38,307	19,1537	55,06	0,000
P [W]*V [mm/s]	1	21,188	21,1876	60,90	0,000
P [W]*Co [mm]	1	17,120	17,1197	49,21	0,000
Error	18	6,262	0,3479		
Lack-of-Fit	2	1,725	0,8626	3,04	0,076
Pure Error	16	4,537	0,2835		
Total	23	228,867			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,589814	97,26%	96,50%	95,14%

L'equazione del modello in forma non codificata è la seguente:

$$R_a = 10,81 - 0,02232 P + 0,03101 V - 205,1 Co - 0,000076 P * V + 0,6256 P * Co$$

L'andamento dei residui è di tipo casuale come dimostra il P-value del test di Anderson-Darling (Figura 21).

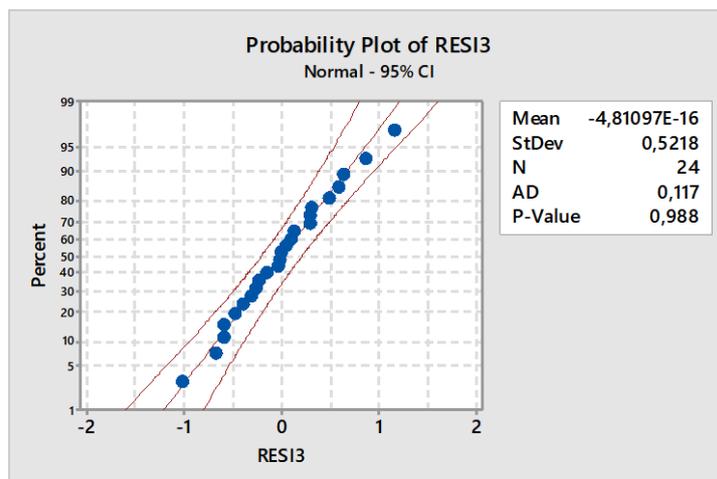


Figura 21 Analisi dei residui del modello sui dati di rugosità per superfici a 45°

In Figura 22 si riporta la rappresentazione grafica del modello.

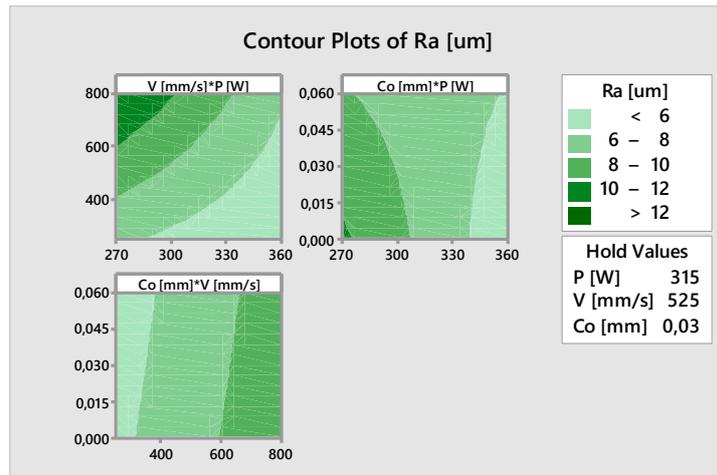


Figura 22 Contour plot del modello dei dati di rugosità per superfici a 45°

4.3 Analisi dei dati relativi alle superfici con angolo di locale stratificazione di 90°

Per brevità si riportano i risultati salienti dell'analisi portata per le superfici caratterizzate da un angolo di locale stratificazione di 90°, vale a dire le superfici verticali. L'analisi dei main effect e delle interazioni mostra un comportamento simile a quello visto per 45° (Figura 23).

Effettuando i test di significatività e costruendo il diagramma di Pareto con le T-Student si ricava il risultato di Figura 24. Si osserva come tutti i fattori sono significativi tollerando un rischio del 5% pertanto in questo caso non si eliminerà alcun elemento dal modello completo.

Effettuando l'analisi Anova (Tabella 13) della regressione quanto detto è confermato. Anche gli stimatori R-sq sono particolarmente confortanti la bontà del modello.

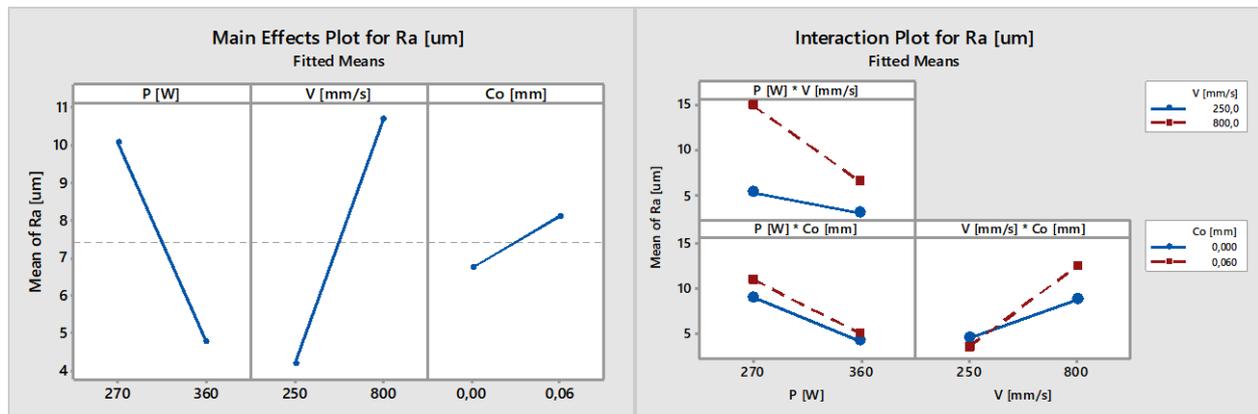


Figura 23 Main effect plot e interaction plot dei dati di rugosità per superfici a 90°

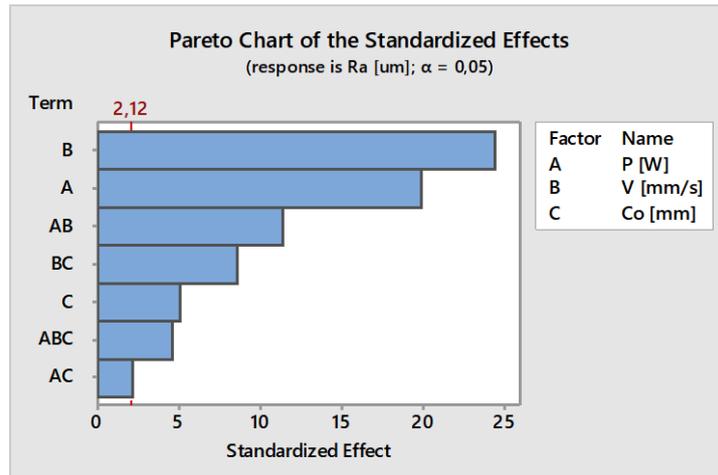


Figura 24 Digramma di Pareto dei fattori considerati per il modello dei dati di rugosità per superfici a 90°

Tabella 13 Analisi della varianza della regressione sui dati di rugosità delle superfici a 90° con i soli termini significativi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	536,007	76,572	179,46	0,000
Linear	3	437,473	145,824	341,76	0,000
P [W]	1	170,081	170,081	398,61	0,000
V [mm/s]	1	256,172	256,172	600,37	0,000
Co [mm]	1	11,220	11,220	26,30	0,000
2-Way Interactions	3	89,096	29,699	69,60	0,000
P [W]*V [mm/s]	1	55,298	55,298	129,60	0,000
P [W]*Co [mm]	1	1,990	1,990	4,66	0,046
V [mm/s]*Co [mm]	1	31,809	31,809	74,55	0,000
3-Way Interactions	1	9,438	9,438	22,12	0,000
P [W]*V [mm/s]*Co [mm]	1	9,438	9,438	22,12	0,000
Error	16	6,827	0,427		
Total	23	542,834			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,653213	98,74%	98,19%	97,17%

L'equazione del modello è la seguente:

$$R_a = 7,41 - 0,01497 P + 0,03037 V - 262,6 Co - 0,000072 P * V + 0,674 P * Co + 0,672 V * Co - 0,001689 P * V * Co$$

L'analisi dei residui conferma che il modello è segue bene i dati sperimentali in quanto la distribuzione delle differenze tra i valori predetti e quelli sperimentali risulta di tipo normale con una p-value di 0.724 (Figura 25).

La rappresentazione grafica del modello è riportata in Figura 26.

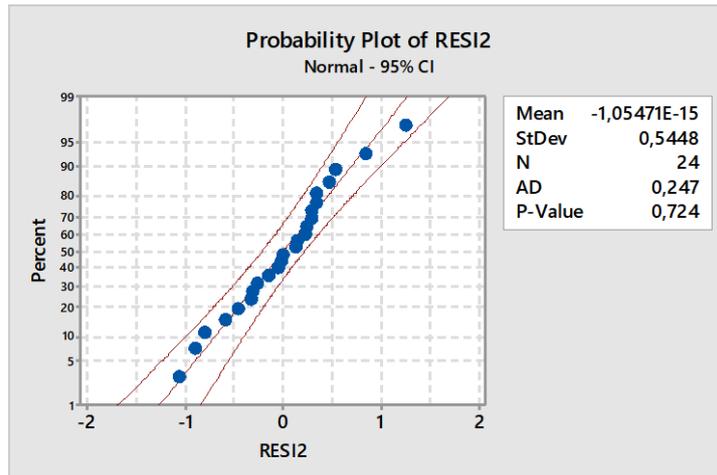


Figura 25 Analisi dei residui del modello sui dati di rugosità per superfici a 90°

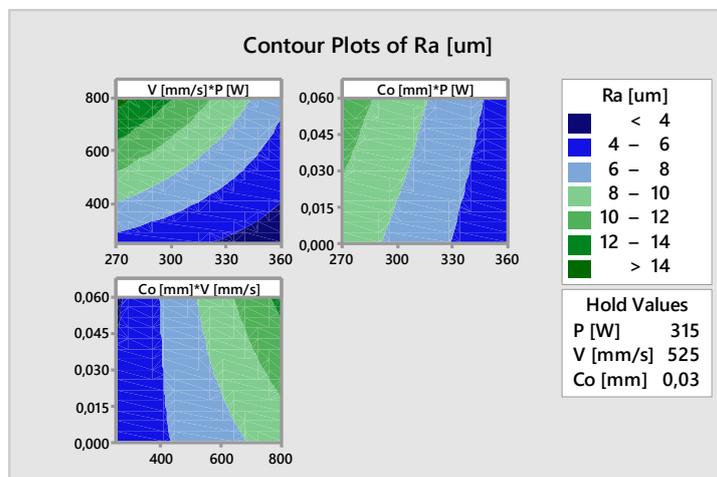


Figura 26 Contour plot del modello dei dati di rugosità per superfici a 90°

4.4 Analisi dei dati relativi alle superfici con angolo di locale stratificazione di 135°

Nel caso di superfici con angolo di locale stratificazione di 135° gli effetti causati dalla fabbricazione di un elemento aggettante si risentono particolarmente rendendo le superfici di partenza particolarmente rugose. Di certo la ricerca di parametri che conducano a finiture accettabile si fa particolarmente necessaria. Osservando il main effect (Figura 27) per questo angolo si osserva un comportamento diverso. L'effetto della potenza è molto meno rilevante rispetto all'effetto della velocità di scansione. Si fa importante anche il contour offset, probabilmente responsabile dell'effetto di trattenimento del liquido altrimenti facilmente percolante alle alte temperature che il remelting causa. L'interazione tra potenza e contour è poco evidente. Lo è quella tra la potenza e la velocità e molto marcata risulta quella tra velocità e contour che sono i fattori principali più forti.

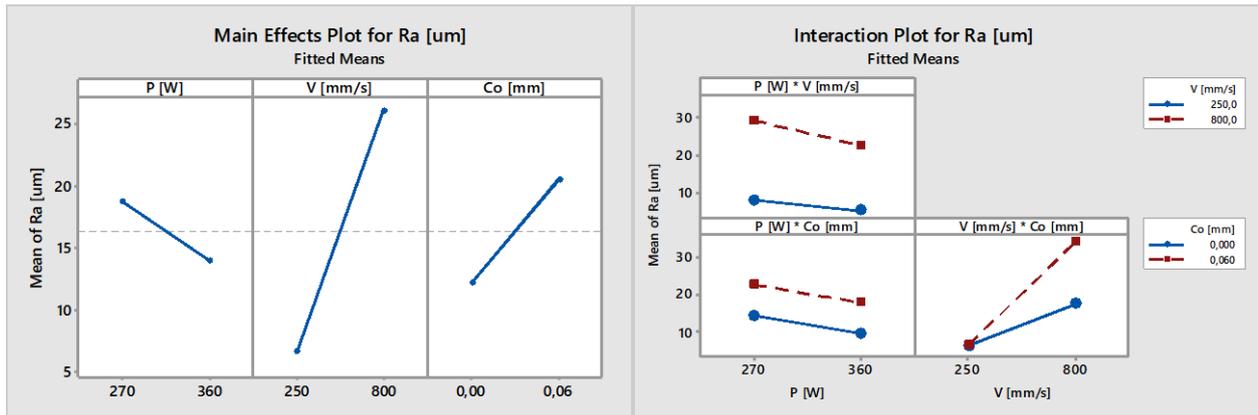


Figura 27 Main effect plot e interaction plot dei dati di rugosità per superfici a 135°

Effettuando l'analisi Pareto si ottiene che l'interazione del terzo ordine e quella già anticipata non sono significative e vengono eliminate.

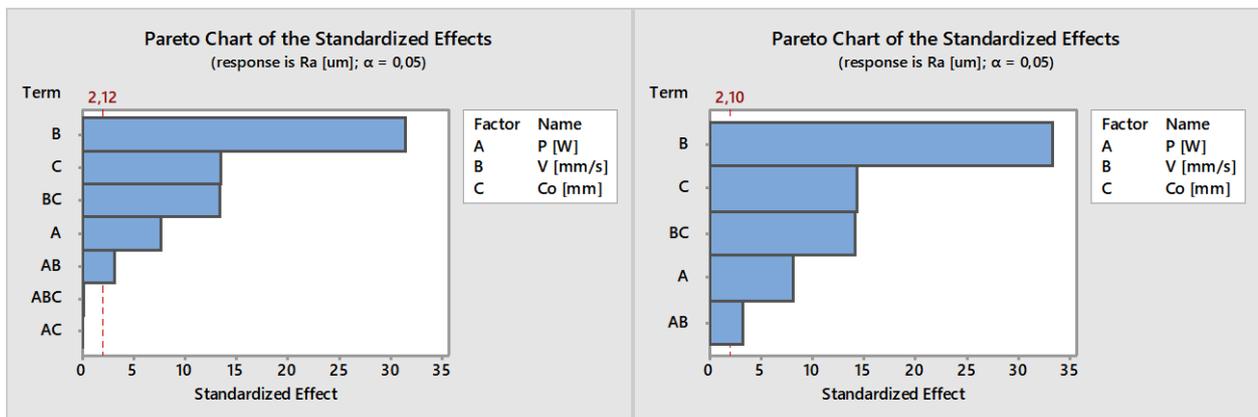


Figura 28 Digrammi di Pareto dei fattori considerati per il modello dei dati di rugosità per superfici a 135° prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'eliminazione dei fattori con confidenza inferiore al 95%.

Ripetendo il Pareto le T-Student dei fattori lasciati nel modello risultano tutti significativi con il 5% di rischio. I diagrammi sono mostrati in Figura 28.

La Tabella 14 riporta l'analisi della regressione che conferma che i fattori considerati sono significativi come elementi del modello e, anche in questo caso, gli stimatori R-sq sono tutti molto alti confermando la bontà e la predittività del modello.

L'equazione è la seguente:

$$R_a = 7,41 - 5,22 - 0,0117 P + 0,04508 V - 124,0 Co - 0,000079 P * V + 0,5016 V * Co$$

Anche l'analisi dei residui è confermativa di quanto selezionato (Figura 29).

La rappresentazione grafica dell'equazione è riportata in Figura 30.

Tabella 14 Analisi della regressione sulle rugosità delle superfici a 135° con i soli termini significativi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	3254,33	650,87	318,83	0,000
Linear	3	2820,60	940,20	460,56	0,000

P [W]	1	136,95	136,95	67,08	0,000
V [mm/s]	1	2264,57	2264,57	1109,29	0,000
Co [mm]	1	419,09	419,09	205,29	0,000
2-Way Interactions	2	433,73	216,87	106,23	0,000
P [W]*V [mm/s]	1	22,80	22,80	11,17	0,004
V [mm/s]*Co [mm]	1	410,94	410,94	201,30	0,000
Error	18	36,75	2,04		
Lack-of-Fit	2	0,06	0,03	0,01	0,988
Pure Error	16	36,69	2,29		
Total	23	3291,08			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,42879	98,88%	98,57%	98,02%

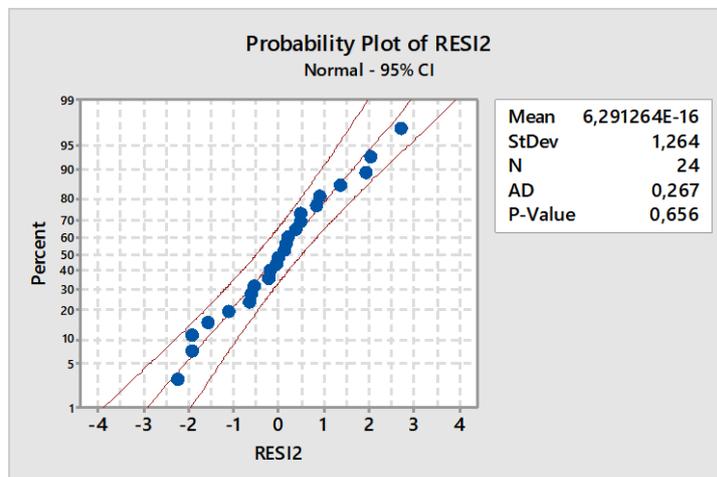


Figura 29 Analisi dei residui del modello sui dati di rugosità per superfici a 135°

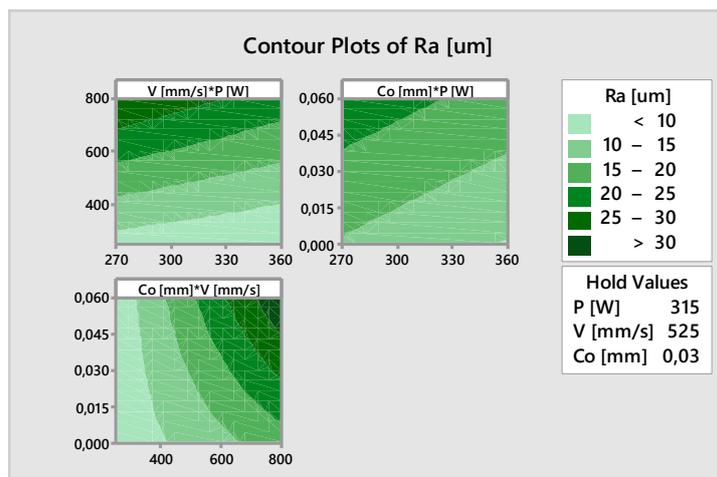


Figura 30 Contour plot del modello dei dati di rugosità per superfici a 135°

5 Attività LA1.4: modellazione dei tempi di produzione

5.1 Premessa

L'attività di preventivazione dei tempi di fabbricazione è essenziale per determinare le fattibilità pratiche ed economiche della produzione di un componente. Il processo di SLM è denso di step che molto spesso non sono chiari quando si sceglie un sistema e ne precludono il successivo utilizzo. Scopo del progetto è quello di fornire una metodologia strutturata per l'implementazione diretta del SLM. A tale scopo è opportuno avere dei metodi di preventivazione delle risorse ben prima di sapere che tipo di sistema si implementerà. Infatti, non è detto che un sistema SLM debba essere per forza acquisito da un'amministrazione o da un privato. Sebbene il costo di investimento sia calato vertiginosamente la gestione manutentiva rimane comunque una spesa che può essere suddivisa tra partecipanti se si acquista un sistema come centro di servizi. L'alternativa è quella di far uso di un centro di servizi esterno. Va detto che la predizione dei tempi in macchina va valutata impiegando dei software che simulano la toolpath generata in tali ambienti. Ovviamente dipende da numerosi fattori come l'orientazione del pezzo. Va detto che si provvederanno diverse opzioni per la fabbricazione delle giranti e, pertanto, sarebbe interessante provvedere in autonomia a tale valutazione senza l'impiego di un software che necessariamente si trova sulla macchina. Inoltre, non si tratta di una piattaforma semplice da usare. Una formula naturalmente può essere impiegata da chiunque.

Scopo di questa parte del progetto è di semplificare il più possibile tale valutazione per prevedere in anticipo quanto tempo occorra per produrre una girante, di dimensioni e geometria customizzate, in SLM.

5.2 Modello globale per il calcolo dei tempi di produzione

I tempi di produzione in SLM sono di varia natura e sono relativi a ciascuno step che occorre sviluppare allo scopo. Il tempo totale di produzione t_p sarà la somma di questi contributi. Il modello globale proposto è il seguente:

$$t_p = t_0^{Preprocessing} + t_0^{setup} + t_{cm} + t_{Im} + t_{cs} + t_{Is} + t_{recoating} + t_{pp}$$

Dove:

1. t_p è il tempo di produzione
2. $t_0^{preprocessing}$ è il tempo per progettare la lavorazione
3. t_0^{setup} è il tempo per preparare la macchina
4. t_{cm} è il tempo necessario alla fabbricazione del contour del modello
5. t_{Im} è il tempo necessario alla fabbricazione dell'infill del modello
6. t_{sc} è il tempo necessario alla fabbricazione del contour delle strutture di supporto
7. t_{Is} è il tempo necessario alla fabbricazione dell'infill delle strutture di supporto
8. $t_{recoating}$ è il tempo necessario alla stesura dello strato di polvere
9. t_{pp} è il tempo necessario per le operazioni di post-processing

In Tabella 15 sono riassunti gli scopi del presente progetto. L'adozione degli strumenti semplificati non solo consentirà l'implementazione da parte di utenti sprovvisti di forte esperienza e abilità nella progettazione prodotto/processo ma anche una forte riduzione dei tempi.

Tabella 15 Elementi del tempo di produzione, durate tradizionali e attese a seguito del presente progetto

Elemento	Durata tradizionale	Scopo del progetto
t_p	Fortemente dipendente dalla geometria	Riduzione drastica
$t_0^{preprocessing}$	Fortemente dipendente dalla geometria	Riduzione drastica attraverso una progettazione/modellazione funzionale
t_0^{setup}	1 ora	1 ora
$t_{cm}, t_{Im}, t_{sc}, t_{Is}$	Dipendente dalla geometria	Dipendente dalla geometria
$t_{recoating}$	Dipendente dall'altezza del pezzo	Dipendente dall'altezza del pezzo
t_{pp}	Decine di ore tramite finitura CNC	0.5 ^h con tornitura tradizionale del solo mozzo

Il tool in fase di sviluppo in grado di fornire una modellazione pressoché automatica permetterà un drastico abbattimento dei tempi di progettazione nonché degli sforzi necessari allo sviluppo delle strutture di supporto connesse con la scelta dell'orientazione della girante in tavola, qui denominati $t_0^{preprocessing}$. Ciò sarà sviluppato nel secondo anno del progetto. Il tempo di posto processing è consistentemente abbattuto dal lavoro fatto fino a questo punto dato che i modelli proposti consentono un drastico abbattimento della rugosità che non necessita più di costose e lunghe operazioni di post-processing (o l'impiego di operazioni non uniformi o rischiose per la qualità superficiale). I tempi $t_{cm}, t_{Im}, t_{sc}, t_{Is}$ connessi con la fabbricazione vera e propria sono dipendenti dalla geometria e dal suo posizionamento in tavola. Per tali tempi occorre un modello semplificato poiché attualmente l'unico tool risiede nel software della macchina piuttosto lungo e complicato da usare e non sempre in possesso nelle fasi iniziali di progettazione e/o preventivazione.

5.3 Modello esemplificato per la preventivazione dei tempi per il contour

L'idea alla base della semplificazione è considerare l'oggetto solido suddiviso in una pelle esterna e nella sua parte interna. I parametri di processo associati alle scansioni laser sono distinti proprio su questa base poiché hanno desiderata diversi: la superficie dell'oggetto deve essere di buona qualità mentre l'interno deve possedere buona resistenza. Oltretutto le modifiche alle strategie proposte e investigate sinora aggiungono il remelting il quale permette un drastico miglioramento della finitura del componente. Il contour è caratterizzato da una certa superficie e, per ogni layer avrà una certa lunghezza l_c . Per ogni layer i (numero totale nL) e si avranno n_p contour quali offset del perimetro dell'oggetto su ciascuno strato. Sia p_j il perimetro di ciascun contour. La lunghezza totale da scansionare sui contour sarà data da:

$$\forall i \in \{1, \dots, nL\}$$

$$\forall j \in \{1, \dots, n_p\}$$

$$l_c = \sum_{i=1}^{nL} \sum_{j=1}^{n_p} p_i^j$$

Soprattutto per i contour più grandi (di maggior peso sulla sommatoria) si può considerare che il valore non cambi, da cui:

$$l_c \cong \sum_{i=1}^{nL} n_p p_i$$

Ora è interessante notare che l'oggetto è suddiviso in strati di spessore L_t . Ciascuno strato contribuisce nella lunghezza totale e possiede una porzione di superficie totale dell'oggetto. Se idealmente si assume

L'oggetto costituito da fette costruite come estrusi dei perimetri considerati come toolpath del contour, si avrà una geometria costituita da numerosi scalini. Dato che lo spessore del layer per questa tecnologia è particolarmente piccolo (30 μm) tale oggetto ideale ha una superficie davvero molto vicina a quella dell'oggetto iniziale. I perimetri di ciascun layer allora possono essere determinati come il rapporto tra la superficie laterale dell'estruso e lo spessore del layer. La somma di tutti i perimetri allora sarà il rapporto tra la superficie totale e lo spessore del layer così come espresso dalla seguente formula:

$$l_c = \sum_{i=1}^{nL} \sum_{j=1}^{np} p_i^j \cong \sum_{i=1}^{nL} np p_i \cong \frac{np S}{L_t}$$

dove:

- l_c è la lunghezza totale della toolpath connessa con il contour
- $\forall i \in \{1, \dots, nL\}$ è l'indice per i layer
- $\forall j \in \{1, \dots, np\}$ è l'indice per i contour
- p_i^j è il perimetro del generico j-esimo contour relativo al i-esimo layer
- S è la superficie del modello
- L_t è lo spessore del layer

Il tempo necessario a processare tale toolpath è dato dal rapporto tra la sua lunghezza e la velocità di scansione v selezionata per la specifica parte. Si distingue tra modello e struttura di supporto. Va precisato fin d'ora che per la fabbricazione delle giranti si adotteranno strategie di tipo block caratterizzate da spessore unitario delle pareti scolorari costituenti. Tali strutture non posseggono l'infill e saranno interessate da velocità di scansione per i soli contour. Le precedenti approssimazioni portano alla seguente formula ove il pedice "m" è relativo al modello dell'oggetto e il pedice "s" è impiegato per le strutture di supporto.

$$t_{cm} = \frac{l_{cm}}{v_{cm}} = \frac{np_m S_m}{L_t v_{cm}}$$

Nel caso dei supporti generati con strategia block è bene tenere presente che la superficie da considerare è la metà poiché le strutture hanno uno spessore pari alla larghezza di scansione del laser e, di conseguenza, con una scansione si produce il doppio dell'area finale. Ulteriore considerazione da fare per il processamento che si impiegherà per la fabbricazione dei supporti è quello che la scansione interesserà un layer sì e uno no per uno spessore del layer doppio di quello per l'oggetto. In definitiva a denominare verrà considerato il prodotto di questi due fattori, vale a dire 4.

$$t_{cs} = \frac{l_{cs}}{v_{cs}} = \frac{S_s}{4 L_t v_{cs}}$$

È molto interessante notare come il valore dell'area della superficie del modello può essere semplicemente letto in un qualunque visualizzatore di file STL. Questo tipo di file sarà l'output della procedura automatizzata per la generazione dell'oggetto solido.

5.4 Modello esemplificato per la preventivazione dei tempi per l'infill

Si definisce infill la parte dell'oggetto da costruire che deve essere interessata da una scansione di tipo riempimento che deve conferire la migliore resistenza meccanica al componente finale riducendo al massimo lo stato di tensione residue derivanti dal rapido raffreddamento. Le attuali tecniche si sono evolute determinando una particolare combinazione della scansione di una geometria solida. Come già detto l'oggetto è suddiviso in contour (ulteriormente distinto in upskin e downskin) e infill. Ogni layer è

scansionato singolarmente con la strategia descritte nel seguito. Al fine di ridurre le tensioni residue generate dalla concomitanza tra effetti termici sovrapposti tra layer adiacenti, ogni layer è ruotato di 67°. Tale valore discende dalla considerazione aritmetica che la riproposizione di una scansione con medesimo angolo è la più distante possibile. Lo schema è riportato in Figura 31. Ciascun layer è scansionato in accordo alla strategia riportata in Figura 32. La superficie è suddivisa in stripe di larghezza massima dipendente dal materiale (per l'alluminio AlSi10Mg tale valore è di 7 mm). Ogni stripe è scansionata orizzontalmente e distanziata dal parametro distanza tra le scansioni Hd già definito e investigato. Tale strategia permette di ridurre l'effetto di distorsione locale causato dalle tensioni termiche di ritiro su lunghi tratti di materiale.

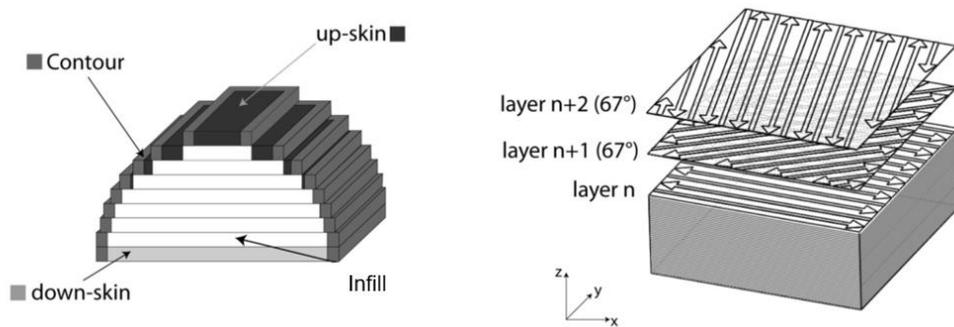


Figura 31 Schema della suddivisione dell'oggetto in contour (upskin e downskin) e infill. Schema della rotazione di 67° tra i layer

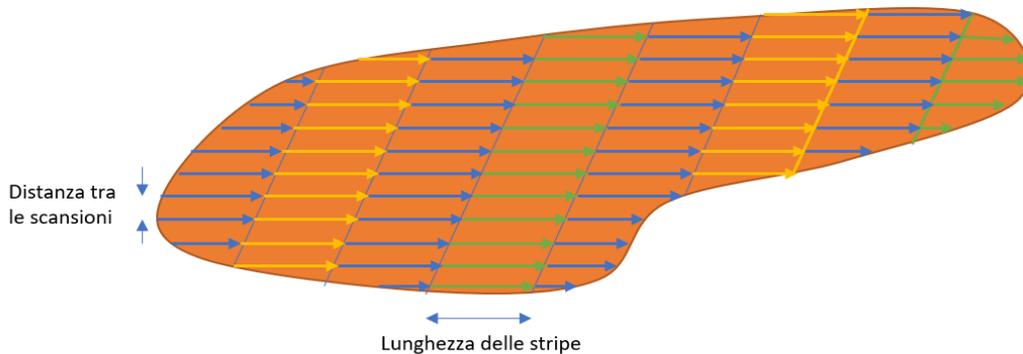


Figura 32 Schema della scansione per stripe di ogni layer

Come fatto in precedenza si parte dalla lunghezza della scansione necessaria a completare ogni layer. Sia SI_i la superficie della parte interna dell' i -esimo layer, ciò vale a dire la superficie del layer decurtata della superficie del contour processata diversamente. Ora, considerando la Figura 32, è possibile immaginare il layer suddiviso, piuttosto che verticalmente in stripe, orizzontalmente in strisce larghe quanto la larghezza di scansione. Allora la lunghezza della toolpath per ogni layer è calcolabile dal rapporto tra la superficie SI_i e l'hatch distance. Sommando per tutti i layer nL si ottiene la seguente equazione per la lunghezza di scansione dell'infill l_i . Va osservato che il valore della distanza tra le scansioni è costante e quindi può essere spostato fuori dalla sommatoria.

$$l_i = \sum_{i=1}^{nL} \frac{SI_i}{h_s} = \frac{1}{h_s} \sum_{i=1}^{nL} SI_i$$

L'oggetto la cui pelle (vale a dire la porzione di materia già scansionata con il contour) è stata eliminata è un oggetto trasformato tramite operazione di offset interno spesso denominata inflating. Come fatto in precedenza, se si considera un oggetto costituito dalle estrusioni di tutte le superfici SI_i tale solido è estremamente simile a quello originale. Allora è possibile calcolare la somma di tutte le superfici SI_i come

rapporto tra il volume di detto solido sottoposto all'operazione di inflating e lo spessore del layer L_t secondo la seguente equazione:

$$l_I = \sum_{i=1}^{nL} \frac{SI_i}{h_s} = \frac{1}{h_s} \sum_{i=1}^{nL} SI_i \cong \frac{1}{h_s} \frac{V_I}{L_t}$$

dove:

- l_I è la lunghezza totale della scansione per effettuare l'infill dell'oggetto
- h_s è la distanza tra le scansioni
- S_i è la superficie dell'infill per l'i-esimo layer
- V_I è il volume interno dell'oggetto
- L_t è lo spessore del layer

Il tempo totale di scansione dipende dalla cinematica impostata per tale operazione vale a dire dalla velocità v_I . Dividendo la lunghezza totale per tale valore si ottiene il tempo per scansionare l'infill dell'oggetto.

$$t_I = \frac{l_I}{v_I} \cong \frac{1}{h_s} \frac{V_I}{L_t v_I}$$

Va osservato che per l'impiego di questa equazione occorre effettuare la precedentemente menzionata operazione di inflating con distanza di riduzione pari proprio allo spessore di materiale scansionato con il contour. Tale operazione è molto agevole in software piuttosto diffusi per la manipolazione dei file STL. Nel caso fosse necessario è possibile effettuare un'ulteriore approssimazione. Se consideriamo che il contour ha uno spessore pari alla larghezza di scansione l_s moltiplicata per il numero di scansioni di offset np_m il volume interessato da questa operazione sarà approssimativamente pari al prodotto di tale spessore per la superficie dell'oggetto:

$$V_c \cong l_s np_m S$$

Ne deriva la seguente equazione con approssimazione di secondo livello che non necessita di nessun software di manipolazione degli STL:

$$t_I = \frac{l_I}{v_I} \cong \frac{1}{h_s} \frac{V_I}{L_t v_I} \cong \frac{V_o - V_c}{h_s L_t v_I} = \frac{V_o - l_s np_m S_o}{h_s L_t v_I}$$

dove:

- V_o è il volume dell'oggetto da produrre
- l_s è la larghezza del contour
- np_m è il numero di contour
- h_s è la distanza tra le scansioni
- S_o è la superficie dell'oggetto da produrre
- V_I è il volume interno dell'oggetto
- L_t è lo spessore del layer
- v_I è la velocità di scansione per l'infill

5.5 Case study e dimostrazioni pratiche del modello

Per dimostrare l'efficacia e l'accuratezza del modello semplificato di primo e secondo livello sono stati considerati diversi oggetti solidi da simulare mediante il software di processamento della macchina.

I primi oggetti sono relativi alle geometrie elementari usate in questo primo anno del progetto, ovvero i prismi a base romboidale. Attraverso l'uso del software Materialise Magics le strutture di supporto sono state progettate in accordo alla strategia Block con pin triangolari di support all'interfaccia. In Figura 33 i supporti sono chiaramente visibili in rosso.

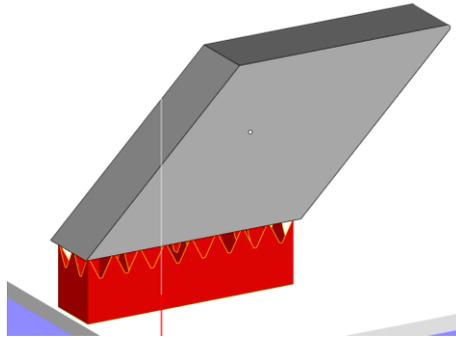


Figura 33 Geometria del provino (in grigio) impiegata nella sperimentazione e strutture di supporto (in rosso)

I pin si rendono necessari sia per ridurre i tempi per la rimozione delle strutture di supporto sia per ridurre il danneggiamento superficiale della zona supportata. Occorre definire adeguatamente la geometria del pin affinché tale accorgimento non limiti la capacità di ancorare la parte alla piattaforma. Il pin è stato configurato come un triangolo equilatero che entra dentro la parte di 0.3 mm.

Lo stesso oggetto è stato considerato scalato poiché, come è facilmente desumibile, l'effetto scala modifica in modo fortemente non lineare i tempi di fabbricazione. Il modello è stato scalato di un fattore 3 come mostrato in Figura 34.

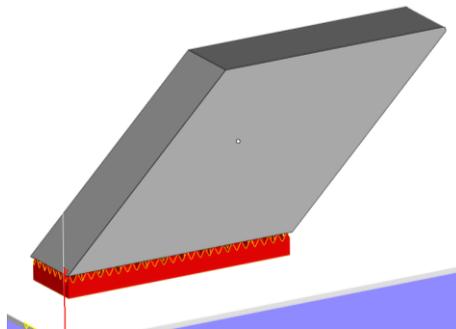


Figura 34 Geometria del provino scalata di un fattore 300% e relative strutture di supporto

Un'altra considerazione è il tempo per stendere il letto di polveri che, naturalmente, dipende dall'altezza dell'oggetto. L'orientazione in tavola è un fattore che influenza particolarmente il tempo di fabbricazione. L'oggetto sinora considerato è stato orientato con la faccia maggiore posta parallelamente alla tavola di fabbricazione come mostrato in Figura 35. Come si nota le strutture di supporto interessano una superficie molto più ampia, il che non solo aumenta i tempi di scansione ma produce un danneggiamento della faccia inferiore. Anche in questo caso si vuole investigare l'effetto del fattore di scala sui tempi di fabbricazione: in Figura 36 è mostrato il modello posto orizzontalmente e scalato di un fattore 3.

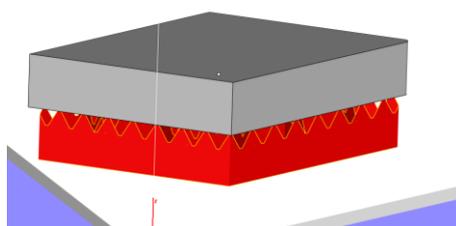


Figura 35 Geometria del provino con scala originale ma orientata parallelamente alla piattaforma e relative strutture di supporto

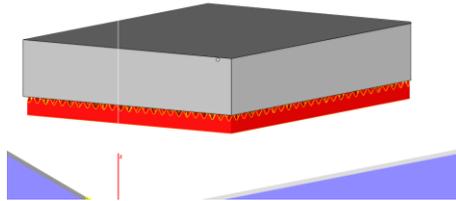


Figura 36 Geometria del provino con scala moltiplicata di un fattore 3, orientata parallelamente alla piattaforma e relative strutture di supporto

La procedura proposta richiede l'uso di un visualizzatore di file STL (sono molteplici i software anche gratuiti che si trovano a disposizione). La schermata riportata in Figura 37 mostra come all'apertura sia possibile già visualizzare le informazioni utili alla procedura. Nel caso mostrato possiamo leggere il volume e la superficie del componente. La stessa operazione può essere agevolmente condotta per l'archiviazione dei valori della superficie delle strutture di supporto (Figura 38).

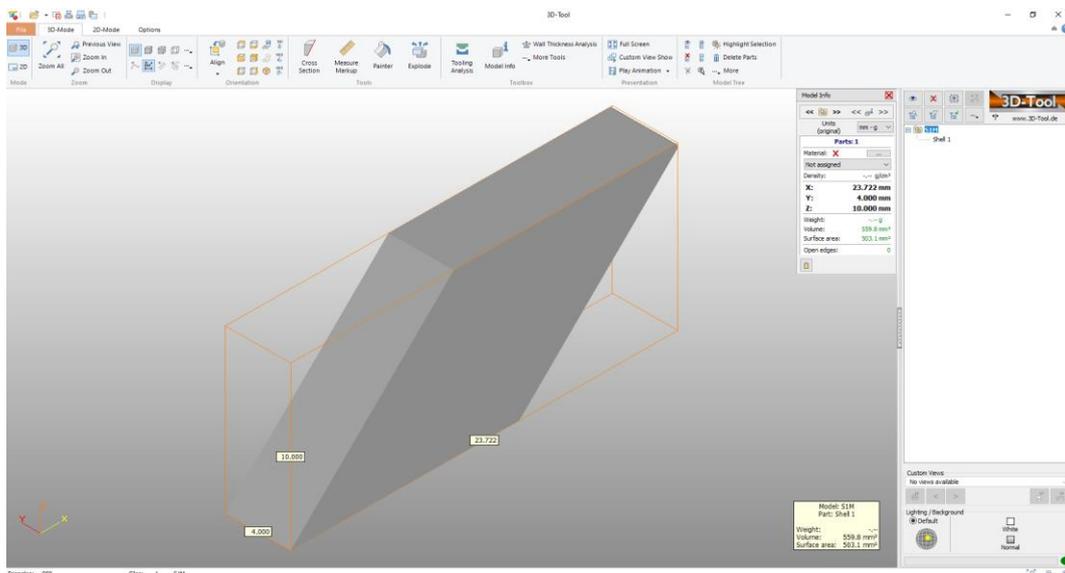


Figura 37 Schermata del 3D-Tool che permette la misura del volume e della superficie di un STL

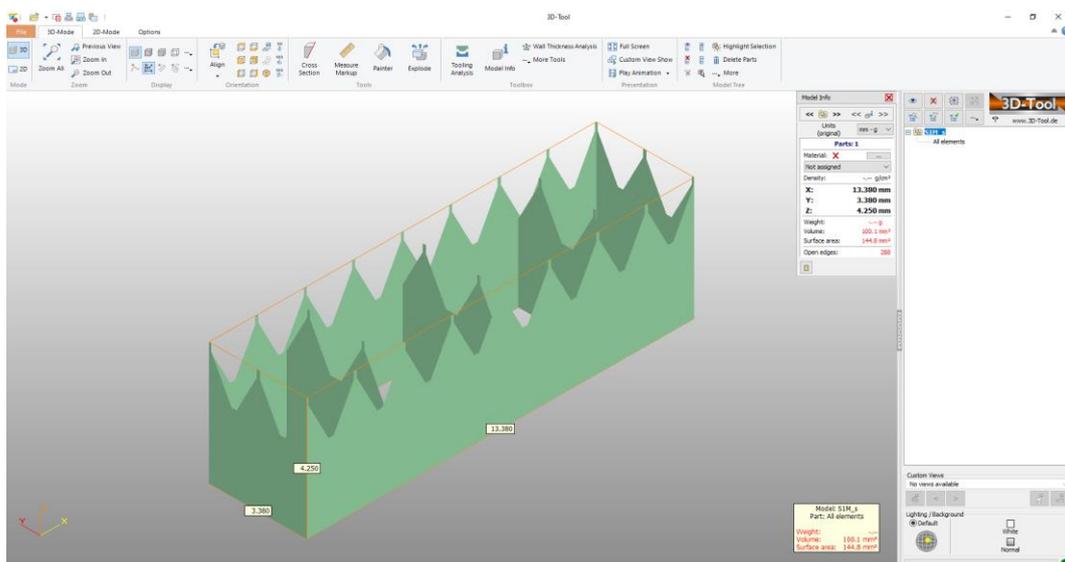


Figura 38 Schermata del 3D-Tool ove il volume e la superficie delle strutture di supporto vengono misurate

Tali operazioni sono già sufficienti per il metodo approssimato di secondo livello che è stato proposto. Nel caso si volesse maggior precisione occorre riferirsi alla prima formula del tempo di scansione dell’infill in cui compare il volume interno. Per determinare tale volume occorre effettuare un’operazione di inflating. Essa può ad esempio essere effettuata nella piattaforma Autodesk Netfabb (riportata in Figura 39).

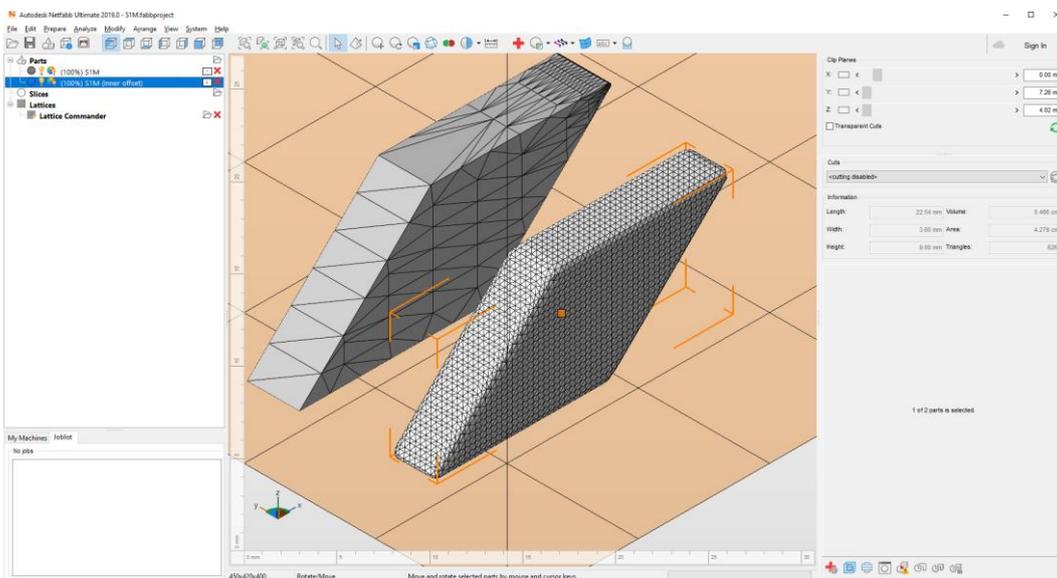


Figura 39 Oggetto originale e oggetto risultante dall’operazione di inflating che ne ha eliminato la porzione interessata dalla scansione di contour

Tale software è spesso a disposizione di chi, nell’ambito dell’Additive Manufacturing, sia impegnato nella riparazione di STL che non sono fabbricabili. La figura mostra l’oggetto originale e quello ridotto da un offset omogeneo di spessore pari alla larghezza di scansione. I valori della superficie e del volume sono di immediata lettura dopo aver effettuato l’operazione di offset che si ottiene con un solo comando.

Infine, è stato considerato un oggetto di morfologia geometrica non elementare. Si tratta di un compressore centrifugo caratterizzato da una palettatura svergolata di spessore 2 mm. In Figura 40 è mostrato l’STL prima e dopo l’operazione in offset. Per quest’oggetto si considererà solo l’orientazione mostrata. È di particolare interesse capire l’efficacia dei modelli su un componente articolato dato lo scopo del presente progetto e, più in generale, lo scopo della tecnologia SLM.

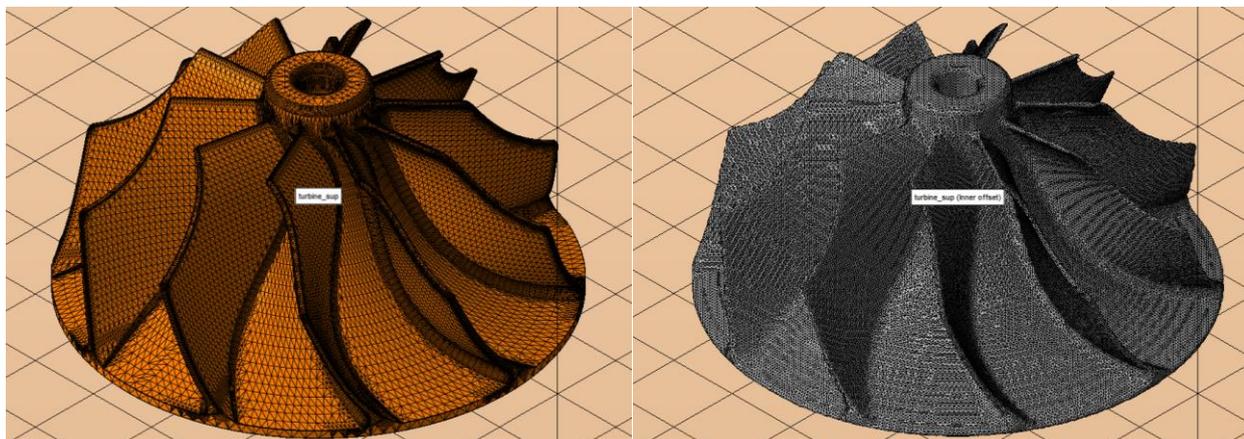


Figura 40 Compressore prima e dopo l’inflating

I modelli appena presentati sono stati sottoposti ai calcoli precedentemente descritti ottenendo le predizioni per i tempi di fabbricazione. La Tabella 16 mostra tutti i valori calcolati per ottenere i tempi di fabbricazione del contour, del modello secondo le equazioni di primo e secondo livello, delle strutture di supporto e per stendere il letto di polveri.

Tabella 16 Risultati dei calcoli dei tempi di fabbricazione per le equazioni di I e II livello

Contour				SM	np	Lt	lc	vc	tcM						
modello	scala	orientazione	numerosità	[mm ²]	[]	[mm]	[mm]	[mm/s]	[s]	[min]					
provino	1	verticale	1	503,1	1	0,03	16770	250	67	1,1					
provino	3	verticale	1	4528	1	0,03	150933	250	604	10,1					
provino	1	orizzontale	1	503,1	1	0,03	16770	250	67	1,1					
provino	3	orizzontale	1	4528	1	0,03	150933	250	604	10,1					
provino	1	verticale	10	5030	1	0,03	167667	250	671	11,2					
provino	1	orizzontale	10	5030	1	0,03	167667	250	671	11,2					
Compressore	1	orizzontale	1	16301	1	0,03	543367	250	2173	36,2					
modello infill I livello				VI	hs	Lt	II	VI	tIM						
modello	scala	orientazione	numerosità	[mm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/s]	[s]	[min]					
provino	1	verticale	1	466	0,13	0,03	119487	1300	92	1,5					
provino	3	verticale	1	12482	0,13	0,03	3200513	1300	2462	41					
provino	1	orizzontale	1	466	0,13	0,03	119487	1300	92	1,5					
provino	3	orizzontale	1	12482	0,13	0,03	3200513	1300	2462	41					
provino	1	verticale	10	4660	0,13	0,03	1194872	1300	919	15,3					
provino	1	orizzontale	10	4660	0,13	0,03	1194872	1300	919	15,3					
Compressore	1	orizzontale	1	21996	0,13	0,03	5640000	1300	4338	72,3					
modello infill II livello				Vo	Ls	np	SM	VI	hs	Lt	II	VI	tIM		
modello	scala	orientazione	numerosità	[mm ³]	[mm]	[]	[mm ²]	[mm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/s]	[s]	[min]
provino	1	verticale	1	559,8	0,2	1	503,1	459	0,13	0,03	117738	1300	91	1,5	
provino	3	verticale	1	15515	0,2	1	4528	14609	0,13	0,03	3746000	1300	2882	48	
provino	1	orizzontale	1	560	0,2	1	503,1	459	0,13	0,03	117790	1300	91	1,5	
provino	3	orizzontale	1	15515	0,2	1	4528	14609	0,13	0,03	3746000	1300	2882	48	
provino	1	verticale	10	5600	0,2	1	5030	4594	0,13	0,03	1177949	1300	906	15,1	
provino	1	orizzontale	10	5600	0,2	1	5030	4594	0,13	0,03	1177949	1300	906	15,1	
Compressore	1	orizzontale	1	25010	0,2	1	16301	21750	0,13	0,03	5576872	1300	4290	71,5	
supporto				SS	np	Lt	lc	vcs	tcS						
modello	scala	orientazione	numerosità	[mm ²]	[]	[mm]	[mm]	[mm/s]	[s]	[min]					
provino	1	verticale	1	144,8	1	0,06	1207	1800	0,67	0,01					
provino	3	verticale	1	144,8	1	0,06	1207	1800	0,67	0,01					
provino	1	orizzontale	1	363	1	0,06	3025	1800	1,68	0,03					
provino	3	orizzontale	1	2496	1	0,06	20800	1800	11,56	0,19					
provino	1	verticale	10	1450	1	0,06	12083	1800	6,71	0,11					
provino	1	orizzontale	10	3630	1	0,06	30250	1800	16,81	0,28					
Compressore	1	orizzontale	1	6818	1	0,06	56817	1800	31,56	0,53					
recoating				hmax	trec	trecTOT									
modello	scala	orientazione	numerosità	[mm]	[s]	[s]	[min]								
provino	1	verticale	1	14	10,75	5017	83,6								
provino	3	verticale	1	34	10,75	12183	203,1								
provino	1	orizzontale	1	8	10,75	2867	47,8								
provino	3	orizzontale	1	16	10,75	5733	95,6								
provino	1	verticale	10	15	10,75	5375	89,6								
provino	1	orizzontale	10	8	10,75	2867	47,8								
Compressore	1	orizzontale	1	35	10,75	12542	209								

I tempi predetti sono stati confrontati con quelli simulati dal software della macchina EOSPRINT. Le operazioni per effettuare tale attività sono piuttosto delicate e implicano la scelta di parametri e attributi di

processo che possono danneggiare la macchina oltre che produrre oggetti non rispondenti. Per questo motivo vi sono 6 fasi da controllare con cura prima di una fabbricazione di un oggetto nuovo. La Figura 41 mostra il provino posto verticalmente con le strutture di supporto perfettamente allineate con il modello. La simulazione in questo caso ha predetto 78 minuti totali.

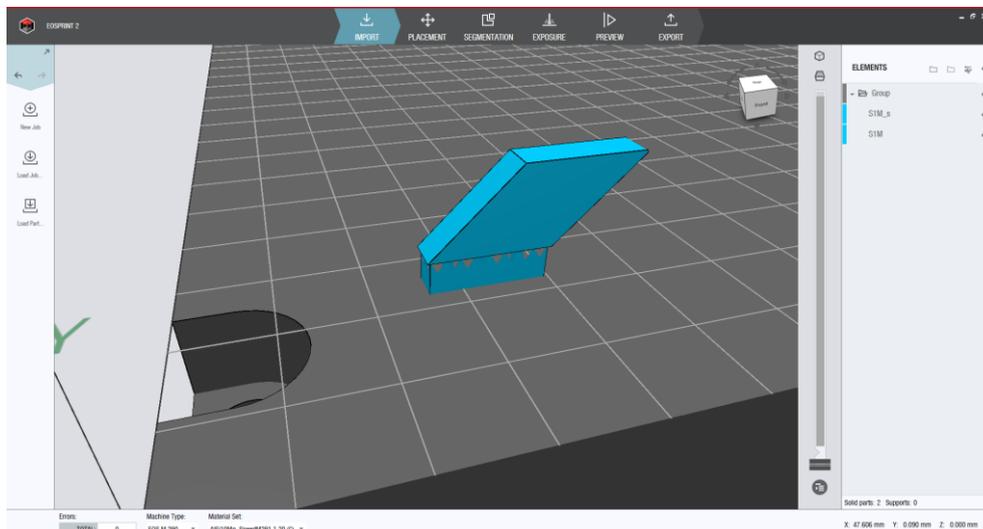


Figura 41 Ambiente EOSPRINT con modello e supporto del provino orientato verticalmente

I risultati complessivi sono riportati in Tabella 17. La stima proposta è eccellente considerando le variabilità imputate al processo fisico e al governo CNC. In particolare, basti pensare alle accelerazioni massime consentite sul vettore velocità che riduce il modulo quando il vettore cambia repentinamente la sua direzione.

Tabella 17 Tempi di fabbricazione predetti e simulati tramite EOSPRINT ed errore percentuale

	Equazione di I livello	Equazione di II livello	Simulazione con EOSPRINT	Errore percentuale I livello	Errore percentuale II livello
1 provino verticale scala 1	86,3	86,2	79,9	8,0%	7,9%
1 provino verticale scala 3	254,2	261,2	258,8	-1,8%	0,9%
1 provino orizzontale scala 1	50,5	50,4	48,1	4,9%	4,9%
1 provino orizzontale scala 3	146,8	153,8	148,2	-0,9%	3,8%
10 provini verticale scala 1	116,2	116,0	116,9	-0,6%	-0,8%
10 provini orizzontale scala 1	74,6	74,3	81,5	-8,5%	-8,8%
Compressore	318,1	317,3	340,1	-6,5%	-6,7%

In Figura 42 il paragone tra le equazioni e la simulazione dimostra l'applicabilità del metodo che, nel caso del compressore ha portato ad un errore percentuale di solo del 6,5% e del 6,7% rispettivamente per l'equazione di primo e secondo livello. Va inoltre osservato che le stime delle due equazioni sono comparabili e, dato che la seconda è molto più immediata, si farà uso soprattutto della seconda modalità.

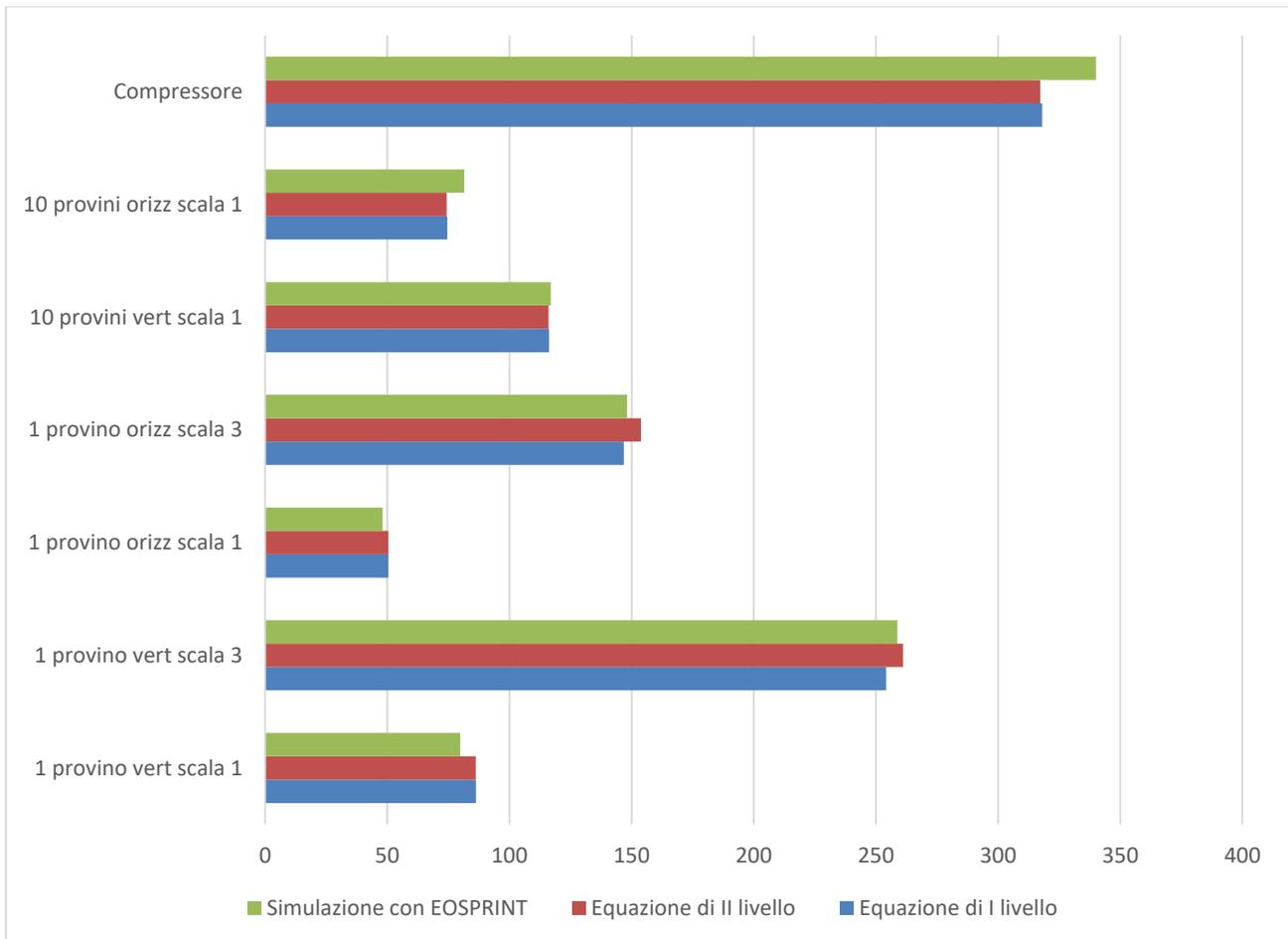


Figura 42 Grafico dei tempi di fabbricazione predetti e simulati con EOSPRINT

Conclusioni

Il primo anno di progetto si è concluso producendo i seguenti stati di avanzamento:

- È stato individuato il materiale delle giranti tra quelli commercializzati ed impiegati nella tecnologia SLM. Le polveri commerciali sono state analizzate in merito alla granulometria e morfometria, alla composizione chimica e alle prestazioni meccaniche di provini di trazione.
- Poiché la finitura secondaria è un punto critico della tecnologia, si è proposta una modifica dei parametri di processo. Tale modifica è il risultato di una campagna sperimentale atta a migliorare la rugosità ottenibile direttamente in fase di fabbricazione SLM. La caratterizzazione è stata effettuata tramite rugosimetria a contatto ottenendo osservazioni e considerazioni sui profili di specifiche inclinazioni delle superfici analizzate. Per ciascuna inclinazione è stato regredito un modello la cui bontà è stata verificata mediante tecniche statistiche. I risultati sono stati più che soddisfacenti.
- È stato proposto un modello predittivo dei tempi di produzione con due livelli di precisione. Il modello è implementabile con semplici strumenti informatici e ben collima con i risultati del costoso e complesso software del produttore della macchina

Nell'anno successivo gli strumenti sviluppati in questa prima fase del progetto verranno applicati alla produzione di giranti Pelton. Particolare riguardo verrà posto sull'integrazione tra i vari step dello sviluppo prodotto/processo in modo da rendere robusto e facilmente implementabile tutto il flusso di pianificazione.

Riferimenti bibliografici

- [1] ISO/ASTM52900-15 (2015) Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. ASTM International, West Conshohocken
- [2] Gibson I, Rosen DW, Stucker B. Design for Additive Manufacturing. In: Gibson I, Rosen DW, Stucker B, editors. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, 2nd ed., New York: Springer Verlag; 2015, p. 399-435.
- [3] Gu D (2015) Laser additive manufacturing of high-performance materials. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [4] Zhang J, Song B, Wei Q, Bourell D, Shia Y (2019) A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology* 35(2):270-284
- [5] Tan JH, Wong WLE, Dalgarno KW (2017) An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process. *Additive Manufacturing* 18:228-255
- [6] Calignano F, Manfredi D, Ambrosio EP, Iuliano L, Fino P (2013) Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *Int.J. Adv. Manuf. Tech.*67:2743-2751
- [7] Krishnan M, Atzeni E, Canali R, Calignano F, Manfredi D, Ambrosio EP, Iuliano L (2014) On the effect of process parameters on properties of AlSi10Mg parts produced by DMLS. *Rapid Prototyping Journal* 20(6):449-458
- [8] Boschetto A, Bottini L, Veniali F (2017) Roughness modeling of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *J Mater Process Technol* 241:154-163
- [9] Calignano F, Minetola P (2019) Influence of Process Parameters on the Porosity, Accuracy, Roughness, and Support Structures of Hastelloy X Produced by Laser Powder Bed Fusion. *Materials* 12(19): 3178. doi: 10.3390/ma12193178
- [10] Li BQ, Li Z, Bai P, Liu B, Kuai Z (2018) Research on Surface Roughness of AlSi10Mg Parts Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Metals* 8, 524
- [11] Mohammadi M, Asgari H (2018) Achieving low surface roughness AlSi10Mg_200C parts using direct metal laser sintering. *Addit. Manuf.*20:23-32
- [12] Xiang Z, Yan R, Wu X, Du L, Yin Q (2020) Surface morphology evolution with laser surface re-melting in selective laser melting. *Optik* 206:164316. DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164316
- [13] Majeed A, Ahmed Af, Salam A, Sheikh MZ (2019) Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 2(4):288-295. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.08.001>.
- [14] Yasa E, Kruth J (2011) Application of laser re-melting on selective laser melting parts. *Advances in Production Engineering & Management* 6(4):259-270
- [15] Demir AG, Previtali B (2017) Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maraging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction. *Int J Adv Manuf Technol* 93: 2697–2709 <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0697-z>
- [16] Yang T, Liu T, Liao W, MacDonald E, Wei H, Chen X, Jiang L (2019) The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Tech.* 266: 26-36
- [17] Liu B, Li BQ, Li Z (2019) Selective laser remelting of an additive layer manufacturing process on AlSi10Mg. *Results in Physics* 12:982–988
- [18] Yu W, Sing SL, Chua CK, Tian X (2019) Influence of re-melting on surface roughness and porosity of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* 792:574-581 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.017>
- [19] ISO 4287 (1997) Geometrical product specifications (GPS)—surface texture: profile method—terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization (ISO), Geneva

[20] ISO 16610-22 (2015) Geometrical Product Specifications (GPS) – Filtration -Part 22: Linear Profile Filters: Spline Filters. International Organization for Standardization (ISO): Geneva

Abbreviazioni ed acronimi

ISO	International Standard of Organization
PBF	Powder Bed Fusion
DED	Directed Energy Deposition
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
EBM	Electron Beam Melting
CNC	Computer Numerical Control
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
SEM	Scanning Electron Microscope
VED	Volumetric Energy Density
LED	Linear Energy Density
P	Potenza del laser
L	Spessore del layer,
v	Velocità di scansione
hd	Distanza tra due scansioni adiacenti
Ra	Rugosità media
DF	Gradi di libertà
Adj SS	Somma dei quadrati aggiustata
Adj MS	Quadrati medi aggiustati
F-Value	Valore della variabile di Fisher
P-Value	Probabilità dell'ipotesi nulla
t_p	Tempo di produzione
$t_0^{preprocessing}$	Tempo per progettare la lavorazione
t_0^{setup}	Tempo per preparare la macchina
t_{cm}	Tempo necessario alla fabbricazione del contour del modello
t_{Im}	Tempo necessario alla fabbricazione dell'infill del modello
t_{sc}	Tempo necessario alla fabbricazione del contour delle strutture di supporto
t_{Is}	Tempo necessario alla fabbricazione dell'infill delle strutture di supporto
$t_{recoating}$	Tempo necessario alla stesura dello strato di polvere
t_{pp}	Tempo necessario per le operazioni di post-processing

l_c	Lunghezza totale della toolpath connessa con il contour
nL	Numero di contour
p_i^j	Perimetro del generico j-esimo contour relativo al i-esimo layer
t_{cm}	Tempo per scansionare il contour del modello
l_{cm}	Lunghezza del contour del modello
v_{cm}	Velocità di scansione del contour del modello
np_m	Numero di perimetri del contour del modello
S_m	Superficie del modello
t_{cs}	Tempo per scansionare il contour del supporto
l_{cs}	Lunghezza del contour del supporto
v_{cs}	Velocità di scansione del contour del supporto
S_s	Superficie del supporto
l_I	Lunghezza totale della scansione per effettuare l'infill dell'oggetto
S_i	Superficie dell'infill per l'i-esimo layer
V_I	Volume interno dell'oggetto
V_o	Volume dell'oggetto da produrre
l_s	Larghezza del contour
np_m	Numero di contour per il modello
S_o	Superficie dell'oggetto da produrre
V_I	Volume interno dell'oggetto
v_I	Velocità di scansione per l'infill

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di lavoro è composto da due persone appartenenti al Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università La Sapienza di Roma. Entrambi sono particolarmente impegnati nello studio delle tecnologie additive con particolare riguardo al Selective Laser Melting. Sono responsabili di un laboratorio denominato Rapid Prototyping and Reverse Engineering iscritto al Wohlers Report e del Sapienza Selective Laser Melting Laboratory.

Alberto Boschetto è professore associato nel settore scientifico disciplinare Tecnologie e Sistemi di Lavorazione. Il settore di ricerca privilegia le seguenti tematiche:

- Lavorazioni non tradizionali di finitura mediante mass finishing, principalmente barrel finishing
- Lavorazioni tradizionali di materiali non convenzionali: tornitura di materiali compositi, foratura di reactive powder concrete
- Squeeze Casting di leghe di alluminio
- Additive Manufacturing con particolare riguardo alle tecnologie di Fused Deposition Modeling, Selective Laser Melting, Stereolitografia
- Fabbricazione di schiume metalliche di alluminio mediante infiltrazione in sale

- Analisi di immagine rivolta alla caratterizzazione dell'output dei processi di fabbricazione come: analisi dei difetti metallografici, analisi del flusso granulare, analisi della morfometria e morfologia delle polveri
- Emissione acustica volta alla caratterizzazione di polveri metalliche
- Tecniche diagnostiche per l'analisi dei vetrini citologici
- Fabbricazione di nuovi materiali mediante meccanosintesi con sistemi High Energy Ball Milling
- Analisi della morfologia superficiale applicata a molteplici ambiti: dalle lavorazioni meccaniche alla produzione del manto di asfalto stradale
- Descrizione di geometrie complesse mediante trattazione puramente matematica e loro applicazione al contesto di fabbricazione industriale di componenti

È autore di 42 pubblicazioni su riviste internazionali, 52 conferenze e 4 capitoli di libri.

È stato docente negli scorsi 16 anni nei corsi di I e II livello del Corso in Ingegneria Meccanica e Gestionale per un totale di 250 crediti. Gli insegnamenti sono: Gestione dei processi produttivi, Programmazione e controllo della produzione meccanica, Tecnologia meccanica, Programmazione e controllo della produzione, Sistemi integrati di produzione, Laboratorio di rapid prototyping, Additive Manufacturing and production systems.

È stato Principal Investigator di 6 convenzioni di ricerca, di 8 progetti di ateneo ed è stato partecipante di 12 progetti.

È membro dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica (Aitem).

È Guest Editor dello Special Issue "New Trends on Selective Laser Melting" in Applied Science Journal.

È Board Editor della rivista Applied Science Journal.

È membro della rivista Arte e Scienza.

Luana Bottini è ricercatrice nello stesso settore scientifico. Le sue linee di ricerca riguardano principalmente le tecnologie di Additive Manufacturing. Nel Fused Deposition Modeling ha sviluppato dei modelli predittivi la finitura superficiale e l'accuratezza ottenibili, le lavorazioni secondarie di finitura. Ha investigato il Selective Laser Melting in merito alla finitura superficiale su superfici diversamente inclinate, all'impiego delle strategie di laser remelting, alla fabbricazione di giunti non assemblati. Si è occupata di tecnologie tradizionali come la fresatura a controllo numerico computerizzato e le lavorazioni di finitura di massa come la burattatura e lo spindle finishing. È esperta di tecniche non invasive come la rugosimetria a contatto e l'analisi di immagine. Quest'ultima è stata impiegata per lo studio della morfologia delle schiume metalliche, delle polveri e dello studio dei vetrini citologici.

È autrice di 20 pubblicazioni su riviste internazionali, 15 conferenze e 3 capitoli di libri.

È docente di Tecnologia Meccanica e Laboratorio di Additive Manufacturing nel corso di laurea in Ingegneria Meccanica e Tecnologie di Additive Manufacturing nel corso di laurea magistrale in ingegneria Gestionale.

È membro dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica (Aitem).

È membro della rivista Arte e Scienza.