POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Additive Manufacturing di leghe Al-Si-Mg-Cu

Relatore

Prof.ssa Mariangela Lombardi

Candidato

Jacopo Cremona

Aprile 2019

Sommario

1. Introduzione 1

2. Tecniche di fabbricazione additiva per i materiali metallici 5

2.1 Powder Bed Fusion (PBF) 6

2.2 Directed Energy Deposition (DED) 8

3. Materiali metallici per la fabbricazione additiva 11

3.1 Proprietà delle polveri 12

3.2 Parametri di processo 13

3.3 Leghe di alluminio 17

3.3.1 Lega AlSi10Mg 18

4. Materiali e metodi 21

4.1 Analisi delle polveri 21

4.2 Produzione dei campioni 23

4.3 Analisi dei single scan 25

4.3.1 Analisi on top 26

4.3.2 Analisi dei melt pool 28

4.4 Analisi dei componenti massivi 30

5. Risultati e discussione 37

5.1 Analisi delle polveri 37

5.2 Analisi dei single scan 38

5.2.1 Primo lotto di produzione 38

5.2.2 Secondo lotto di produzione 46

5.3 Analisi dei componenti massivi 50

5.3.1 Primo lotto di produzione: strategia di scansione 0° 50

5.3.2 Secondo lotto di produzione: strategia di scansione ruotata di 67° 58

5.4 Analisi microstrutturale 63

5.5 Microdurezza Vickers 64

6. Conclusioni 67

7. Bibliografia 69

1. Introduzione

La fabbricazione additiva è una tecnologia innovativa che permette la creazione di un oggetto fisico partendo da un modello CAD 3D, tipicamente depositando e fondendo numerosi layer, ognuno dei quali rappresenta una sottile sezione della parte da realizzare. È pertanto una tecnologia che si distanzia da quelle tradizionali, tipicamente a carattere sottrattivo, in cui le parti vengono realizzate rimuovendo materiale da un volume iniziale. Il principio che sta alla base dei processi di fabbricazione additiva è la divisione in sezioni sottili di modelli CAD 3D e la costruzione in modo incrementale di tali sezioni [1].

L'ideatore della tecnologia è stato Charles Hull che negli anni Ottanta brevettò la stereolitografia (US Patent No 4.575.330, 1984), tecnica capace di creare oggetti partendo da resine liquide sensibili alla radiazione emessa da una sorgente laser. Negli ultimi trent'anni c'è stata un'evoluzione dei processi e la fabbricazione additiva è passata dall'essere un semplice sistema di prototipazione ad un sistema di fabbricazione che permette di realizzare parti funzionali [2], assicurando adeguate prestazioni in termini di tolleranze dimensionali, rugosità superficiali e caratteristiche meccaniche [3]. Ai nostri giorni lavora anche materiali metallici ed è utilizzata in diversi campi: dal dentale al biomedicale, dall'aerospaziale all'automotive, permettendo di ottenere notevoli vantaggi rispetto alle tecnologie tradizionali.

L'additive manufacturing è considerato uno dei mercati a più veloce espansione: dalle sue origini negli anni Ottanta fino al 2013 è cresciuto oltre 3 miliardi [4]. Tuttavia, seppur in continua espansione, ad oggi sono ancora poche le leghe metalliche utilizzabili in fabbricazione additiva. Ciò accade principalmente per due ragioni: in primo luogo occorre una considerevole ricerca per l'individuazione di tutti i parametri di lavorazione che permettono di ottenere parti completamente dense e con le desiderate caratteristiche meccaniche [5]; in secondo luogo è necessario considerare altre variabili, di pari importanza, legate alle caratteristiche chimiche e fisiche delle polveri utilizzate. Come osservato da I. Yadroitsev et al. [6], i più importanti parametri di processo che occorre definire sono: potenza del laser, velocità di scansione, hatching distance, spessore di strato e la strategia di scansione. Tali

fattori hanno un effetto significativo sul processo di fabbricazione additiva, ma la loro mutua interazione non è di facile comprensione, rendendo più complicata l'individuazione del set di parametri ottimale.

Le leghe di alluminio sono tra le più utilizzate al mondo, seconde solamente all'acciaio [7]. Dato il basso peso specifico, l'eccellente rapporto resistenza-peso, l'ottima conducibilità termica ed elettrica e l'elevata resistenza alla corrosione, tali leghe risultano di notevole interesse nei settori aeronautico, aerospaziale ed automotive [7]. Come riportato da Louvis et al. [8] e Xiaojia et al. [9], processare le leghe di alluminio per Laser Powder Bed Fusion (LPBF) non è semplice a causa della loro elevata riflettività e conducibilità. Nonostante le difficoltà da affrontare, lavorando le leghe di alluminio per fabbricazione additiva è possibile ottenere componenti con proprietà meccaniche superiori rispetto ai processi tradizionali.

Nel seguente lavoro di tesi è stato studiato l'effetto dei principali parametri di processo sulla lega AlSi10Mg modificata con l'aggiunta di un significativo quantitativo di Cu. Il rame è stato aggiunto allo scopo di migliorare le proprietà meccaniche della lega, la sua resistenza a fatica e la sua durezza. L'analisi è stata svolta partendo dallo studio del comportamento di single scan e melt pool, elementi basilari del processo additivo [9], fino all'esame di componenti massivi. È stato applicato uno schema di Design Of Experiments (DOE) per riuscire ad individuare il set di parametri ottimali che permettesse di realizzare componenti densi. Inoltre, è stato svolto uno studio di Analisi della Varianza (ANOVA) per comprendere i parametri più influenti sul processo.

La valutazione morfologica dei single scan e dei corrispettivi melt pool è stata oggetto di numerose attività di ricerca negli ultimi anni [6], [9]–[15]. Ciò è dovuto al fatto che in fabbricazione additiva gli oggetti massivi sono realizzati per sovrapposizione di molteplici scansioni affiancate e di conseguenza la presenza di difetti e di irregolarità nei single scan potrebbe compromettere la qualità del componente finale. Pertanto, analizzando la morfologia dei single scan è possibile ottimizzare la ricerca dei parametri di lavorazione che permettono di realizzare componenti della densità desiderata.

Il presente lavoro di tesi si articola in una prima parte dedicata ad un'introduzione alle tecniche di additive manufacturing e alle leghe di alluminio; nella seconda parte viene

descritta l’attività sperimentale e i risultati ottenuti, partendo dalla caratterizzazione delle polveri fino all’analisi dei componenti massivi.

2. Tecniche di fabbricazione additiva per i materiali metallici

A partire dagli inizi degli anni Duemila c'è stata una notevole crescita delle tecniche di fabbricazione additiva per materiali metallici, con lo sviluppo di numerosi sistemi di Powder Bed Fusion (PBF) e Directed Energy Deposition (DED). Nel primo caso si assiste alla fusione selettiva di un letto di polvere per mezzo di una sorgente laser oppure un fascio di elettroni; mentre nel secondo caso si ha la deposizione della materia prima, sottoforma di polvere o filo, attraverso degli ugelli e la fusione per mezzo di una sorgente laser oppure un fascio elettronico [1].

Tali sistemi presentano numerosi vantaggi come la possibilità di realizzare oggetti dall'elevata complessità geometrica, strutture leggere, componenti ergonomici e personalizzabili, consentendo una libertà di progettazione maggiore rispetto alle tecnologie tradizionali, ammettendo anche sottosquadri e spessori variabili delle pareti [16]. Permettono inoltre, sfruttando tecniche di ottimizzazione topologica, di massimizzare le prestazioni dei componenti prodotti, attraverso una sintesi delle forme, delle dimensioni e delle strutture, utilizzando materiali che presentano proprietà meccaniche superiori rispetto a quelli tradizionali [17]. D'altra parte, si hanno volumi di lavoro e velocità di costruzione limitati, scarsa finitura superficiale delle parti realizzate, necessità di strutture di supporto, un numero esiguo di materiali lavorabili e dal costo elevato. Nonostante queste limitazioni, le tecnologie additive trovano numerose applicazioni in svariati settori come l'aerospace, l'automotive e il biomedicale [16].

Grazie alla possibilità di aggiungere materiale solamente dove necessario, la fabbricazione additiva si configura come una tecnologia sostenibile che permette un ridotto consumo di materie prime, un'ottimizzata efficienza dei prodotti realizzati, componenti alleggeriti e nuovi modelli di vendita [1], [17].

2.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Vi sono due processi appartenenti alla classe di Powder Bed Fusion (PBF): il Laser Powder Bed Fusion (LPBF) e l'Electron Beam Melting (EBM). Entrambi prevedono la fusione selettiva di un sottile layer di polvere per mezzo di un'intensa sorgente di energia: tipicamente nei processi LPBF viene impiegato un laser a fibra di itterbio; invece, nei processi EBM si utilizza un fascio di elettroni emessi da un filamento di tungsteno riscaldato ad una temperatura superiore a 2500°C. Di conseguenza, nei processi LPBF la fusione avviene per assorbimento di fotoni; nei processi EBM per trasferimento di energia cinetica dagli elettroni alle particelle di polvere. Nei processi LPBF, al fine di evitare ossidazioni, il processo fusorio avviene in una camera di lavoro riempita con gas inerte (azoto o argon); invece con EBM si lavora sotto vuoto spinto (10^{-3} Pa nella camera di lavoro) sia per scongiurare il rischio ossidazioni sia per evitare che le molecole d'aria deflettano il fascio elettronico [1], [18].

Nelle seguenti immagini vengono mostrate le rappresentazioni schematiche dei processi LPBF (Figura 2.1) ed EBM (Figura 2.2). In entrambi i casi si ha un sottile strato di polvere metallica, con spessore compreso tra i 25 µm e i 250 µm [1], che viene steso per mezzo di un rullo su una piattaforma riscaldabile. Terminata la deposizione del layer, la sorgente di calore fonde selettivamente la polvere, fornendo un'energia sufficiente a rifondere parzialmente il layer precedente, garantendo in tal modo l'aderenza tra gli strati [3]. Terminato il processo, la piattaforma viene abbassata per permettere la stesura di un nuovo layer di polvere che viene poi livellato e fuso. Queste fasi si ripetono fino al completamento della parte da realizzare.

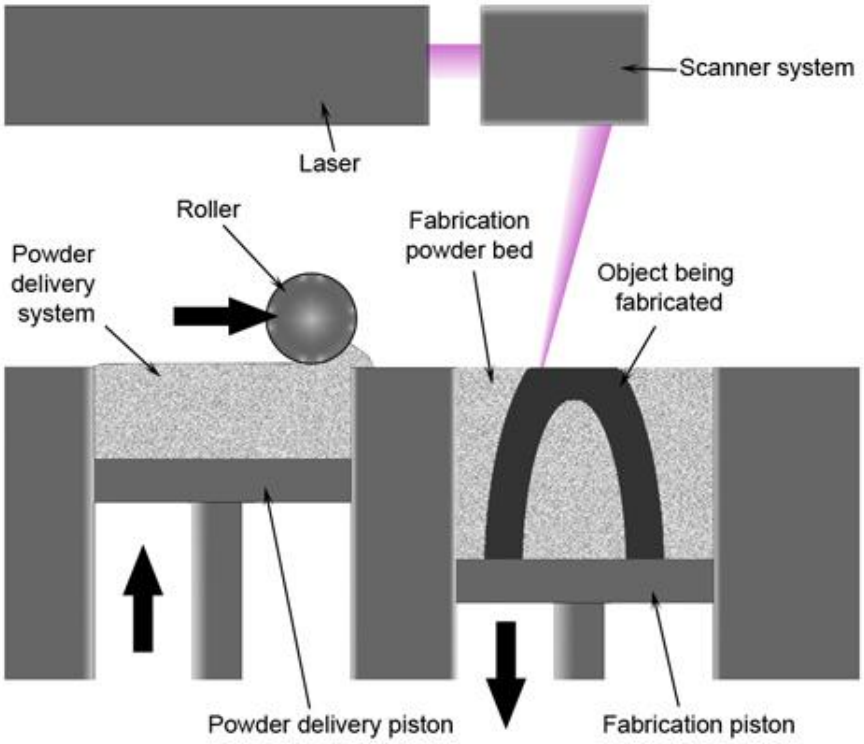

Figura 2.1 Rappresentazione schematica del processo di LPBF [19]

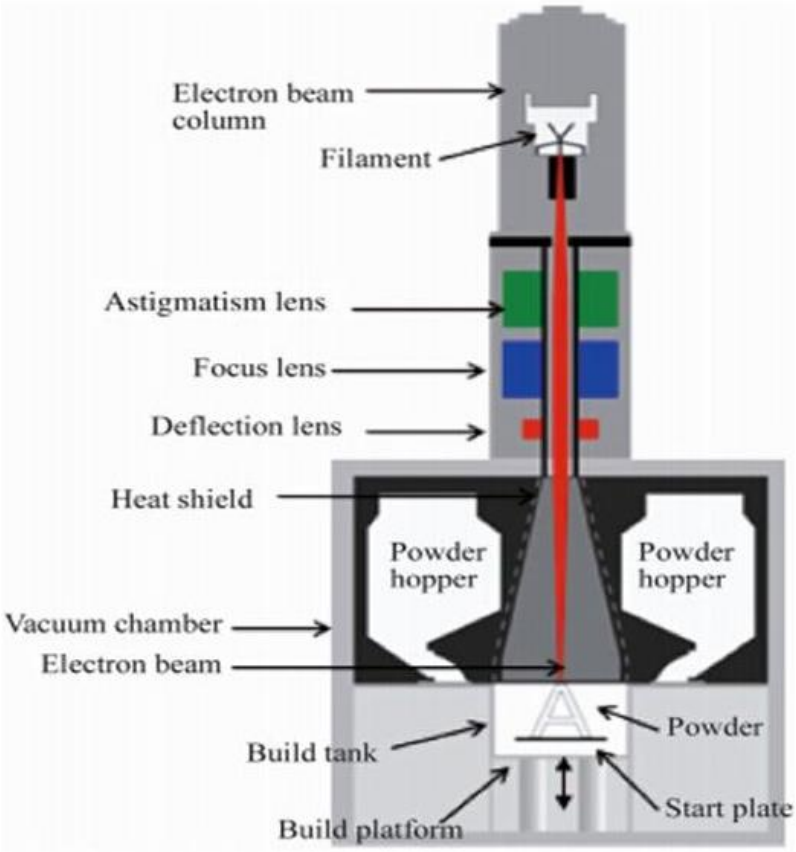

Figura 2.2 Rappresentazione schematica del processo EBM [20]

2.2 Directed Energy Deposition (DED)

Con il termine Directed Energy Deposition si fa riferimento ad un insieme di tecnologie che si basano sulla deposizione della materia prima (sottoforma di polvere o filamento metallico) direttamente sulla parte da realizzare, fondendola per mezzo di un'intensa sorgente energetica come mostrato schematicamente in Figura 2.3. Nei processi basati sulla deposizione di polvere come sorgente energetica viene solitamente impiegato un laser; nel caso in cui si lavori con un filamento metallico (Electron Beam Additive Manufacturing) si utilizza un fascio elettronico. Al fine di evitare ossidazioni il processo fusorio avviene in una camera di lavoro riempita con un gas di copertura (deposizione di polvere), oppure sottovuoto (EBAM) [21], [22].

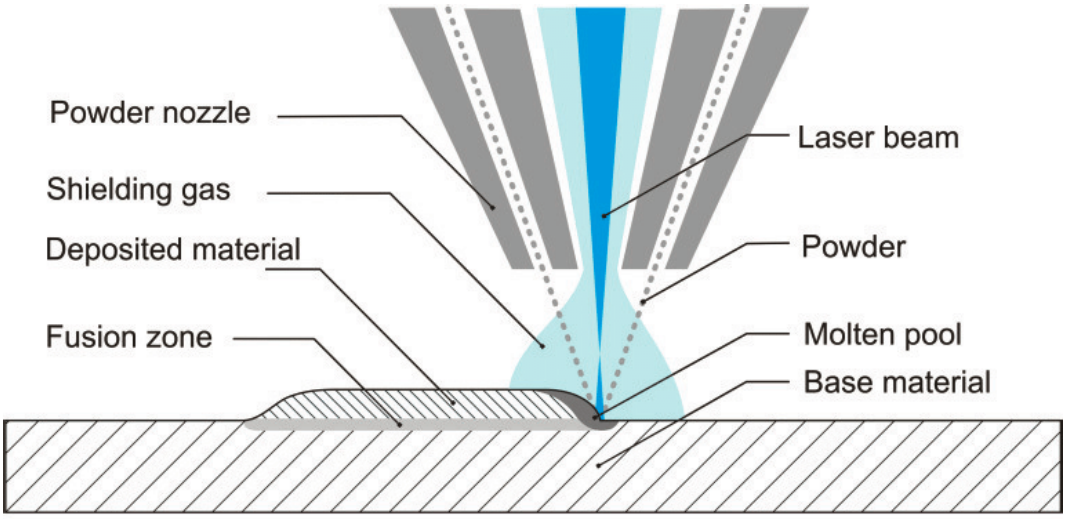

Figura 2.3 Rappresentazione schematica del processo DED [23]

In Tabella 2.1 viene mostrato un confronto tra i processi descritti, mettendone in evidenza i punti di forza e debolezza [1], [24]. È possibile notare che le tecnologie appartenenti alla classe Directed Energy Deposition (DED) presentano alcuni vantaggi rispetto ai processi di Powder Bed Fusion (PBF), come la possibilità di realizzare oggetti di dimensione maggiore (in quanto la deposizione e la fusione sono localizzate) e l'opportunità di ottenere componenti in multimateriale [21]. Inoltre, permettono di eseguire riparazioni e aggiungere features su parti già esistenti, grazie ad un sistema di deposizione a cinque assi [1]. D'altra parte, ci sono limiti sulle geometrie realizzabili, che non possono avere la medesima complessità di quelle

ottenute per PBF, ed una scarsa finitura superficiale delle parti realizzate che di conseguenza necessitano un'operazione di finitura alle macchine utensili [1], [21].

Tabella 2.1 Comparazione processi PBF-DED [1], [24]

Caratteristica	**Powder Bed Fusion**	**Direct Energy Deposition**
Velocità di costruzione	5-20 cm^3/h	Fino a 70 cm^3/h
Volume di lavoro	Limitato	Ampio e flessibile
Spessore di strato	25-100 µm	500-1000 µm
Dimensione del fascio	50-250 µm	2-4 mm
Finitura superficiale	R_a 4-10 µm	R_a 20-50 µm
Capacità di dettaglio	0.04-0.2 mm	0.5-1.0 mm
Capacità di costruzione	Geometrie complesse	Geometrie relativamente semplici
Esecuzione riparazioni	Impossibili	Possibili
Componenti Multimateriale	Impossibili	Possibili

3. Materiali metallici per la fabbricazione additiva

Nonostante la crescita esponenziale degli ultimi anni delle tecnologie di additive manufacturing, i materiali metallici ad oggi lavorabili sono limitati, come si può osservare in Tabella 3.1. Infatti, con i sistemi Laser Powder Bed Fusion (LPBF) è possibile processare con successo solamente alcune tipologie di acciaio, le leghe di titanio, le leghe a base nickel, il cromo cobalto ed alcune leghe di alluminio [1].

Tabella 3.1 Materiali metallici EOS GmbH [25]

Classe di prodotto	**Nome della lega**
Acciai maraging	EOS MaragingSteel MS1
Acciai inossidabili	EOS StanlessSteel GP1
	EOS StanlessSteel PH1
	EOS StanlessSteel 316L
	EOS StanlessSteel CX
	EOS StanlessSteel 17-4PH
Leghe a base nickel	EOS NickelAlloy IN718
	EOS NickelAlloy IN625
	EOS NickelAlloy HX
Cromo cobalto	EOS CobaltChrome MP1
	EOS CobaltChrome SP2
	EOS CobaltChrome RPD
Titanio	EOS Titanium Ti64
	EOS Titanium Ti64ELI
	EOS Titanium TiCP
Alluminio	EOS Aluminium AlSi10Mg

La scarsità di materiali disponibili è dovuta alla necessità di definire un elevato numero di fattori e variabili al fine di ottenere componenti completamente densi e con le desiderate caratteristiche meccaniche [26]. Le difficoltà associate alla ricerca del set ottimale di parametri di lavorazione sono ben note e rappresentano una delle grandi barriere che impediscono un'ulteriore espansione della tecnologia [5].

I parametri che influenzano il processo sono rappresentati sinteticamente in Tabella 3.2, e possono essere suddivisi in due categorie: proprietà delle polveri e parametri di processo [26]. Comprendere l'effetto di ciascun fattore e la loro mutua interazione permette di ricavare il giusto set di parametri con cui processare una lega e, di conseguenza, consente di ottenere componenti densi e della qualità desiderata [5].

Tabella 3.2 Parametri del processo di LPBF [26]

Proprietà delle polveri	**Parametri di processo**	
Morfologia delle polveri	Potenza del laser	Spessore di strato
Particle Size Distribution	Velocità di scansione	Strategia di scansione
Composizione chimica	Hatching distance	Orientazione della parte
Conducibilità termica	Atmosfera protettiva	Flusso di gas
Temperatura di fusione	Raggio del laser	Temperatura del letto di polvere
Riflettività	Tipo di laser	

3.1 Proprietà delle polveri

Le proprietà delle polveri utilizzate nel processo additivo hanno un ruolo chiave nel determinare la qualità del componente finale [1]. Le polveri attualmente utilizzate hanno dimensioni comprese tra 10 e 105 µm ed una forma sferica [5], poiché grazie alla buona flowability delle particelle sferiche si ha la possibilità di ottenere la deposizione di un layer con spessore uniforme [1].

Non tutti i sistemi produttivi permettono di ottenere polveri con caratteristiche adatte alla fabbricazione additiva. Generalmente si preferisce utilizzare polveri ottenute con processi di gas atomizzazione poiché, seppur il sistema sia più costoso rispetto ad altri come

l'atomizzazione ad acqua, permette di ottenere particelle maggiormente sferiche (Figura 3.1) e delle dimensioni desiderate [1], [26].

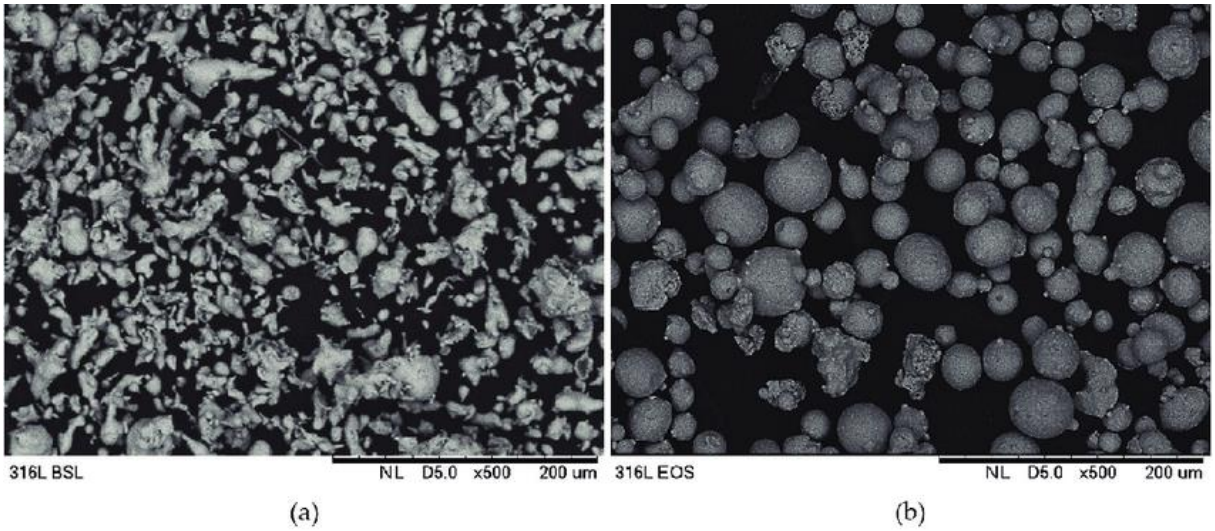

Figura 3.1 Immagini delle polveri di AISI 316L prodotte per (a) atomizzazione ad acqua; (b) gas atomizzazione [27]

Oltre alla morfologia, un altro parametro che è importante controllare è la Particle Size Distribution (PSD), la quale rappresenta la gamma della dimensione delle particelle presenti in un singolo lotto di polveri [5]. La PSD deve rispettare range ben stabiliti in quanto influenza l'interazione tra il laser e il letto di polvere: particelle di dimensione differente richiedono un diverso quantitativo di energia per essere fuse [26].

Infine, è importante che le polveri abbiano un elevato grado di purezza e siano dunque prive di impurità ed umidità che ne possano compromettere l'utilizzo [26], impedendo il conseguimento di componenti completamente densi [1].

3.2 Parametri di processo

I parametri di processo sono quelle impostazioni di macchina che permettono di ottenere un componente della qualità desiderata e con risultati ripetibili. I produttori delle macchine di additive manufacturing garantiscono i parametri di processo ottimizzati solamente per un ristretto ventaglio di materiali, che devono essere lavorati con macchine e con polveri proprietarie. Lo sviluppo del proprio set di parametri è un processo lungo ed impervio che richiede la definizione di un elevato numero di variabili [5].

I single scan sono gli elementi basilari del processo additivo, in quanto ogni sezione è costituita da molteplici scansioni affiancate. La presenza di difetti e di irregolarità nei single scan potrebbe compromettere la qualità del componente finale. Pertanto, analizzare la morfologia delle singole scansioni al variare dei parametri di processo può essere un metodo efficace per ottimizzare la ricerca del miglior set di parametri. I parametri di processo che occorre definire per lo studio dei single scan sono la potenza del laser P [W] e la velocità di scansione v [mm/s]. L'effetto combinato di tali parametri viene rappresentato dalla Linear Energy Density (LED), definita come:

$$LED = \frac{P}{v} \left[\frac{J}{mm}\right] \tag{3.1}$$

Come osservato da W. Pei [15], tale parametro può essere utilizzato per valutare l'effetto della potenza del laser e della velocità di scansione sulla stabilità del single scan. Al variare del LED è possibile distinguere differenti morfologie della traccia fusa: tipicamente si osserva che per bassi valori di LED si hanno carenze di fusione o fenomeni di balling (Figura 3.2a-b); mentre per valori di LED troppo elevati si hanno scansioni irregolari oppure troppo spesse e profonde (Figura 3.2d-e) [11].

È necessario determinare il quantitativo ottimale di energia che occorre fornire al letto di polvere al fine di avere una combinazione ottimale di densità del componente e qualità della superficie fusa [1], [26]. I parametri che influenzano maggiormente l'energia fornita al letto di polvere sono la potenza del laser P [W], la velocità di scansione v [mm/s], l'hatching distance h_d [mm] e lo spessore del layer depositato s [mm] [1], [26]. L'effetto combinato di tali parametri viene rappresentato da un termine detto Volumetric Energy Density (VED) definito come:

$$VED = \frac{P}{v \cdot h_d \cdot s} \left[\frac{J}{mm^3}\right] \tag{3.2}$$

Generalmente per valori di VED eccessivi o inferiori ad una certa soglia si osservano porosità elevate nel componente realizzato (Figura 3.3a,c); invece, operando con i valori di VED corretti, si ottengono porosità decisamente inferiori (Figura 3.3b) [1].

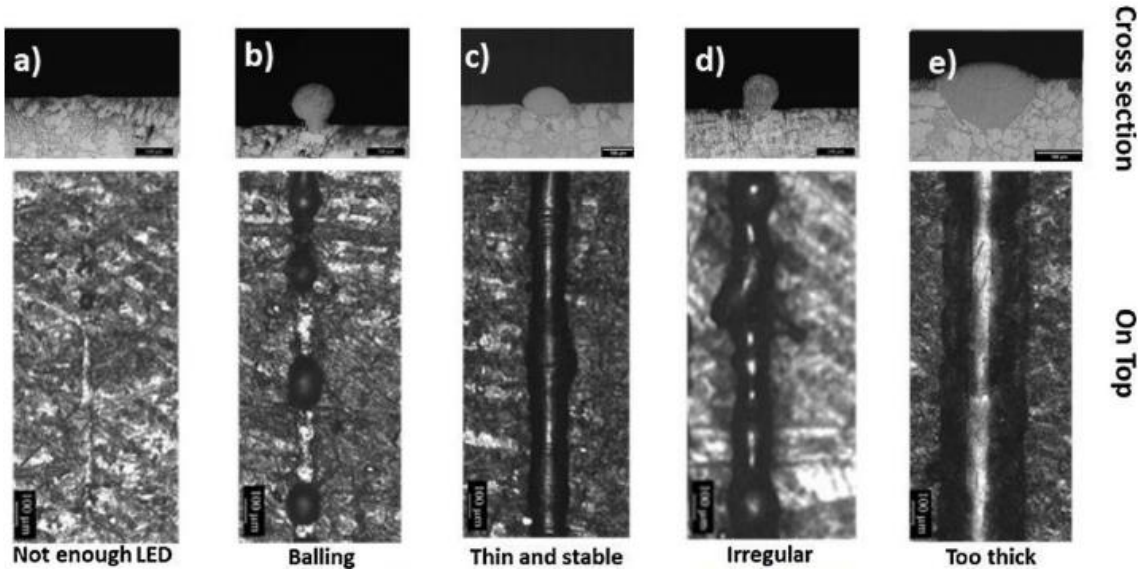

Figura 3.2 Morfologia dei single scan al variare del LED: (a) assenza di fusione; (b) balling; (c) scansione sottile e stabile; (d) irregolare; (e) troppo spessa [11]

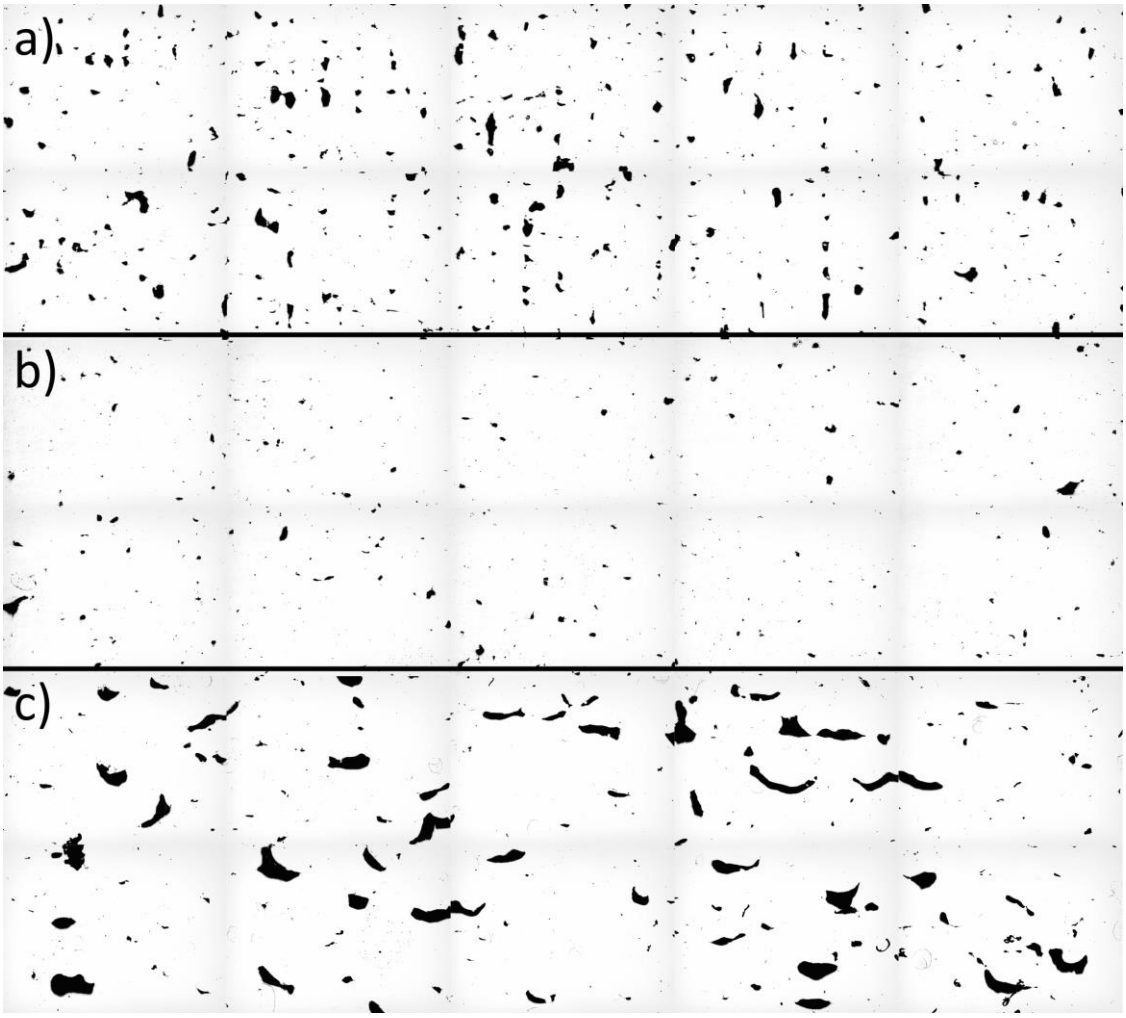

Figura 3.3 Differenza di porosità al variare del VED: (a) VED = 38.10 J/mm^3; (b) VED = 53.57 J/mm^3; (c) VED = 101.19 J/mm^3

Il percorso seguito dal laser durante il passaggio sul letto di polvere viene detto strategia di scansione (in Figura 3.4 vengono mostrate alcune tipiche strategie di scansione). Tale parametro influenza profondamente la densità, le proprietà meccaniche, le microstrutture e le tensioni residue del componente realizzato [26]. Infatti, la strategia di scansione determina la lunghezza dei vettori di scansione, i quali influenzano sensibilmente le tensioni residue. Di conseguenza, utilizzando strategie di scansione opportune è possibile ridurre la porosità dei componenti [1] e le loro tensioni residue [28]: vettori di scansione più corti permettono di generare meno tensioni residue nel componente finale [28].

La scelta della strategia di scansione più opportuna dipende dal componente da realizzare: la strategia a linee parallele mostrata in Figura 3.4a permette tempi di costruzione ridotti ma provoca un incremento delle tensioni residue ed è pertanto impiegata nella realizzazione di componenti piccoli o con pareti sottili; viceversa, per parti di dimensione maggiore è opportuno utilizzare la strategia a scacchiera (Figura 3.4c) che consente una distribuzione omogenea delle tensioni residue, seppur comporti tempi di costruzione più elevati [28]. La strategia di scansione a spirale mostrata in Figura 3.4b permette una migliore dispersione delle tensioni interne generate dal ritiro di solidificazione ma comporta l'impiego di algoritmi di scansione molto complessi [18].

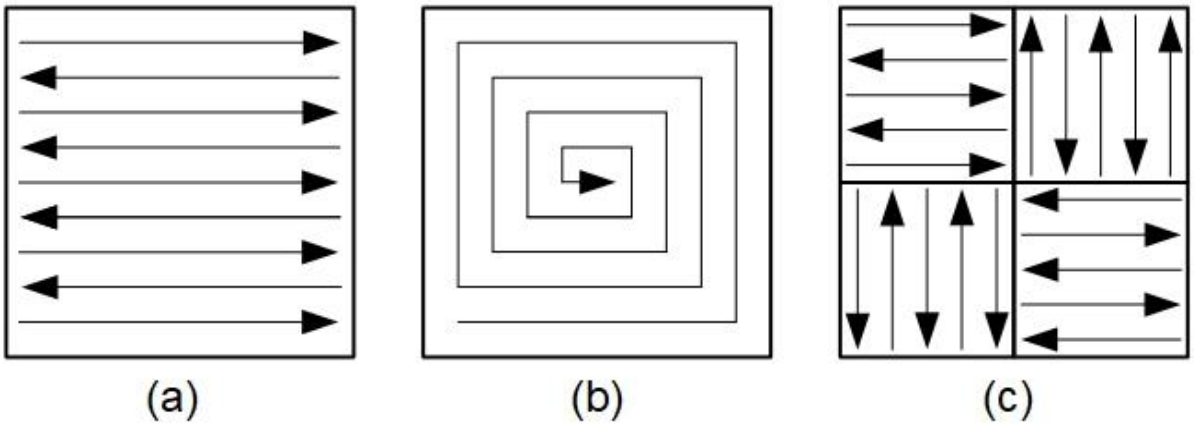

Figura 3.4 Tipiche strategie di scansione: (a) scansione con linee parallele; (b) scansione a spirale; (c) scansione a scacchiera

Per avere maggiore isotropia ed evitare che tutte le tensioni residue siano allineate sullo stesso piano, è possibile ruotare la strategia di scansione tra due layer consecutivi. Come mostrato in Figura 3.5, generalmente si sceglie una rotazione di 67° nel passaggio tra un layer

ed il successivo, perché in tal modo si hanno numerosi layer prima di osservare due orientazioni uguali [28].

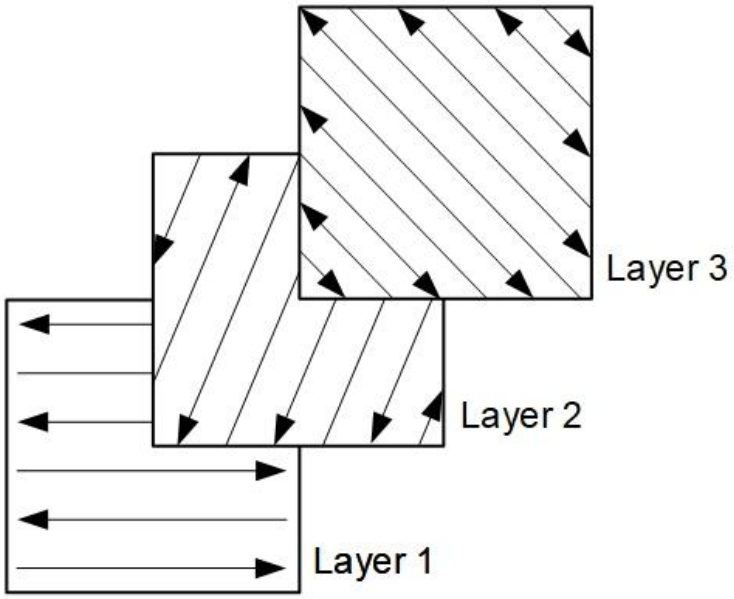

Figura 3.5 Rotazione della strategia di scansione tra layer consecutivi

3.3 Leghe di alluminio

Seppur per utilizzo le leghe di alluminio siano seconde solo all'acciaio, la loro applicazione all'additive manufacturing è molto limitata a causa di alcune proprietà chimico-fisiche che le rendono difficilmente processabili con le tecnologie additive [1], [13], [26]. Infatti, le leghe di alluminio riflettono gran parte della radiazione laser incidente (solamente il 7% viene assorbita [1]) e hanno un'elevata conducibilità termica, che comporta un aumento della potenza necessaria per fondere le polveri [1]; inoltre, la natura passivante dell'alluminio causa la formazione di uno strato di ossido che rimanendo intrappolato all'interno della pozza di fusione, può essere il punto di innesco di fratture e cricche [1]. Per tale ragione i processi di LPBF di leghe di alluminio devono avvenire in camere di lavoro con atmosfera inerte ed un contenuto di ossigeno inferiore allo 0.2% [1].

Ad oggi le leghe AlSi10Mg e AlSi12 sono le leghe di alluminio maggiormente utilizzate in fabbricazione additiva. Ciò accade poiché sono le più semplici da lavorare grazie all'elevato quantitativo di silicio che permette di avere un bagno fuso particolarmente fluido e di ridurre il ritiro di solidificazione. Inoltre, come si può osservare dal diagramma di stato mostrato in

Figura 3.6 [29], per percentuali di silicio attorno al 10%, si ha una piccola differenza tra le temperature di liquidus e solidus, il che permette di ridurre il rischio di cricche a caldo [1].

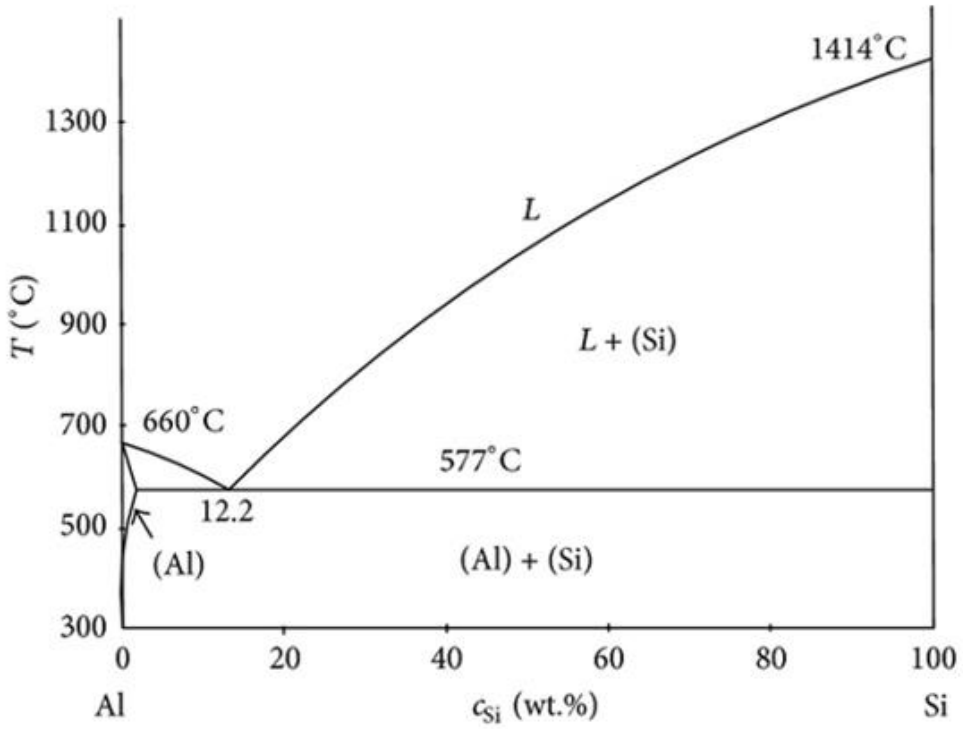

Figura 3.6 Diagramma di stato Al-Si [29]

In tempi recenti, le leghe Al-Cu sono state oggetto di notevole interesse da parte del mondo additivo a causa di alcune loro ottime proprietà meccaniche come resistenza meccanica, resistenza a fatica e durezza. Tuttavia, le numerose ricerche svolte per processare queste leghe con tecnologie LPBF hanno riscontrato alcune difficoltà dovute all'elevata differenza di temperatura (compresa tra 90°C e 136 °C) tra la linea di liquidus e quella di solidus [1], [30].

3.3.1 Lega AlSi10Mg

La lega AlSi10Mg è caratterizzata da buone proprietà meccaniche, ottima resistenza alla corrosione, elevata conducibilità termica e basso peso. Per tali ragioni trova numerose applicazioni nei settori automotive ed aerospaziale [31].

La composizione chimica della lega viene riportata in Tabella 3.3 [31]:

Tabella 3.3 Composizione chimica della lega AlSi10Mg (EOS) [31]

Elemento	**%wt**
Al	Balance
Si	$9.00 - 11.00$
Fe	≤ 0.55
Cu	≤ 0.05
Mn	≤ 0.45
Mg	$0.2 - 0.45$
Ni	≤ 0.05
Zn	≤ 0.10
Pb	≤ 0.05
Sn	≤ 0.05
Ti	≤ 0.15

I rapidi raffreddamenti tipici del processo additivo permettono di ottenere una microstruttura estremamente fine, con conseguenti proprietà meccaniche simili a quelle dei componenti di colata dopo il trattamento termico T6 [31]. Le proprietà meccaniche dei componenti prodotti per DMLS vengono illustrate in Tabella 3.4.

Tabella 3.4 Proprietà meccaniche AlSi10Mg as-built (EOS) [31]

	As built
Tensile strength [6]	
- in horizontal direction (XY)	460 ± 20 MPa 66.7 ± 2.9 ksi
- in vertical direction (Z)	460 ± 20 MPa 66.7 ± 2.9 ksi
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]	
- in horizontal direction (XY)	270 ± 10 MPa 39.2 ± 1.5 ksi
- in vertical direction (Z)	240 ± 10 MPa 34.8 ± 1.5 ksi
Modulus of elasticity	
- in horizontal direction (XY)	75 ± 10 GPa 10.9 ± 0.7 Msi
- in vertical direction (Z)	70 ± 10 GPa 10.2 ± 0.7 Msi
Elongation at break [6]	
- in horizontal direction (XY)	(9 ± 2) %
- in vertical direction (Z)	(6 ± 2) %
Hardness [7]	approx.119 ± 5 HBW

4. Materiali e metodi

4.1 Analisi delle polveri

La lega oggetto di studio è stata ottenuta da polveri di AlSi10Mg e di Cu puro, prodotte per gas atomizzazione rispettivamente da EOS GmbH e Sandvik Osprey LTD, e miscelate in giare ceramiche per 24 ore alla velocità di 60 rpm.

La composizione delle polveri di AlSi10Mg, Cu e della loro miscela viene riportata in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Composizione chimica delle polveri (wt%)

Lega	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	O	Al
AlSi10Mg	9-11	≤ 0.55	≤ 0.05	≤ 0.45	0.2-0.45	≤ 0.15	-	Bal.
Cu	-	-	≥ 99.96	-	-	-	≤ 0.04	-
AlSi10Mg +4%wtCu	8.6-10.6	≤ 0.55	4	≤ 0.45	0.19-0.43	≤ 0.15	≤ 0.04	Bal.

Le proprietà morfologiche delle polveri di partenza sono state valutate utilizzando il Field Emission Scanning Microscope (FESEM) Zeiss Supra Tm 40 (Figura 4.1), attraverso l'analisi di micrografie a diversi ingrandimenti.

Figura 4.1 Field Emission Scanning Microscope (FESEM) Zeiss Supra Tm 40 [32]

Per determinare la distribuzione granulometrica delle polveri di AlSi10Mg+4%wtCu è stato utilizzato il granulometro laser Fritsch Analysette 22 Compact mostrato in Figura 4.2.

Figura 4.2 Granulometro laser Fritsch Analysette 22 Compact

Come si può osservare in Figura 4.3, il principio di funzionamento della granulometria laser è la diffrazione di un fascio laser fatto passare attraverso un porta campione contenente del liquido ed una quantità definita di polvere mescolata in modo vorticoso. La deviazione del fascio laser che attraversa il porta campione dipende dalla dimensione delle particelle e, di conseguenza, misurando tale deviazione è possibile risalire alla distribuzione granulometrica

della polvere. In Figura 4.3 viene mostrata una rappresentazione schematica del processo appena descritto.

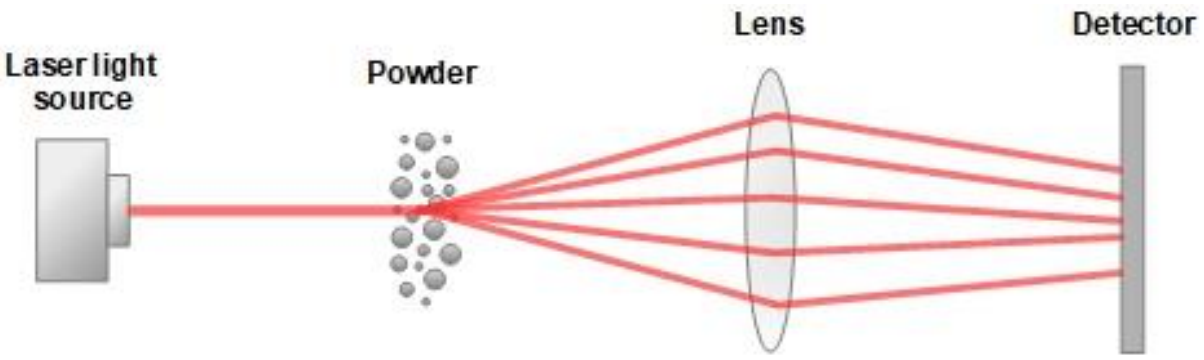

Figura 4.3 Schema rappresentativo della diffrazione laser

4.2 Produzione dei campioni

Per la produzione dei campioni di AlSi10Mg+4%Cu è stata utilizzata la stampante EOSINT M270 Dual Mode System (EOS GmbH) presso i laboratori POLITO DISAT-IIT (Figura 4.4).

Figura 4.4 EOSINT M270 Dual Mode System [33]

Tale stampante è un sistema di Direct Metal Laser-Sintering (DMLS) che permette la realizzazione di parti metalliche partendo direttamente dal modello CAD. Utilizzando un fascio

laser in fibra di itterbio con potenza regolabile fino a 200 W, permette di fondere localmente la polvere metallica, realizzando il componente layer by layer. Il processo fusorio avviene in atmosfera protetta (Ar) e con la piattaforma riscaldata a 100°C. Le specifiche tecniche della macchina utilizzata sono elencate in Tabella 4.2.

Tabella 4.2 Scheda tecnica EOSINT M270 Dual Mode System [34]

Volume della camera di lavoro	250 mm x 250 mm x 215 mm
Velocità di costruzione	2 – 20 mm^3/s
Spessore di strato	20 – 100 µm
Tipo di laser	Yb-fibre laser, 200 W
Velocità di scansione	fino a 7.0 m/s
Diametro del fascio	100 – 500 µm

Seguendo il criterio proposto da Yadroitsev et al. [35], i parametri di processo ottimali per la lega AlSi10Mg+4%wtCu sono stati ricercati partendo dall'analisi delle singole tracce fuse (single scan) e dei corrispondenti melt pool, fino alla realizzazione di piastrine solide di dimensione 10x10x5 mm, prodotte con diverse strategie di scansione (Figura 4.5).

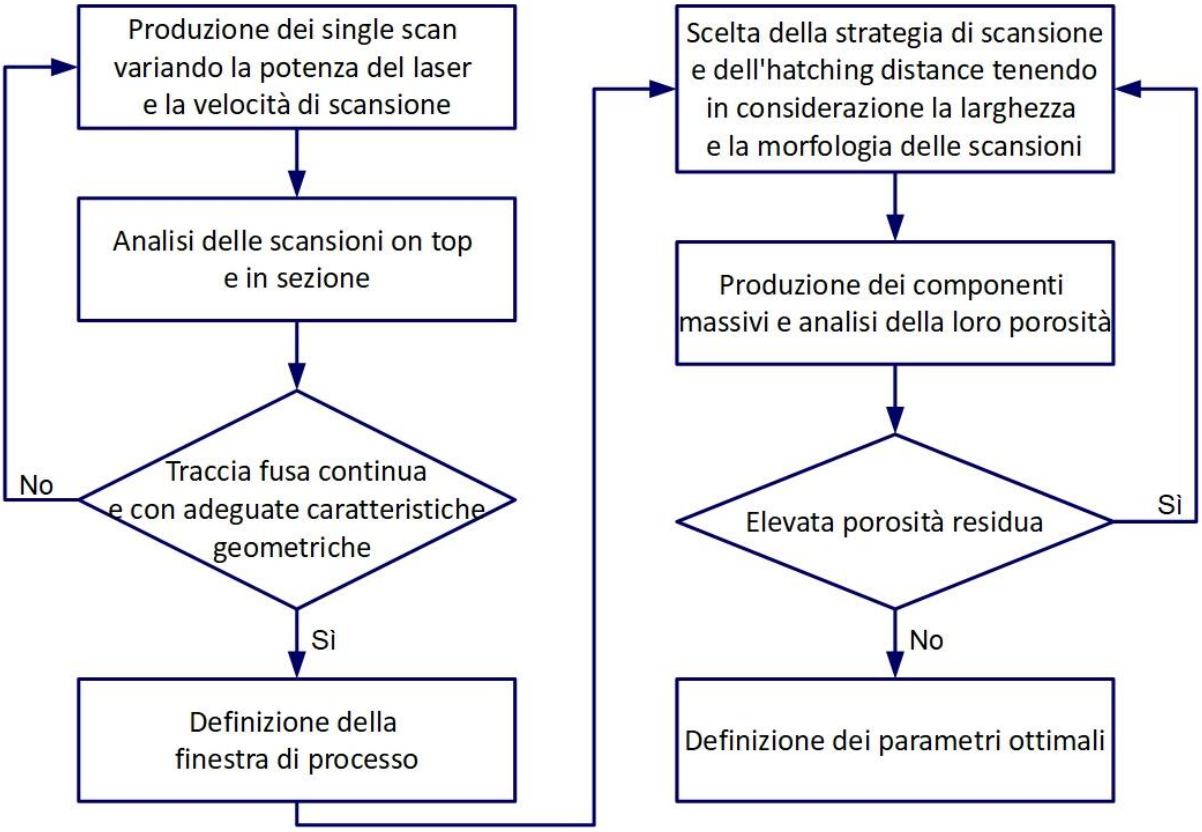

Figura 4.5 Criterio seguito nello studio della processabilità della lega [35]

4.3 Analisi dei single scan

I single scan sono stati realizzati, in accordo allo schema in Figura 4.6d, depositando manualmente uno strato di polvere di 50 µm su dei dischetti di AlSi10Mg di 4 cm di diametro (Figura 4.6c), vincolati meccanicamente alla piattaforma di costruzione (Figura 4.6a, b). La composizione chimica dei dischetti è stata scelta simile a quella della lega oggetto di studio al fine di evitare contaminazioni nella traccia fusa. Le polveri sono state miscelate con etanolo per facilitarne la deposizione e la piattaforma è poi stata riscaldata per un'ora a 100°C al fine di completare l'evaporazione dell'etanolo. Il processo fusorio è stato eseguito in atmosfera protetta, ricca di Argon, con la piattaforma mantenuta a 100°C.

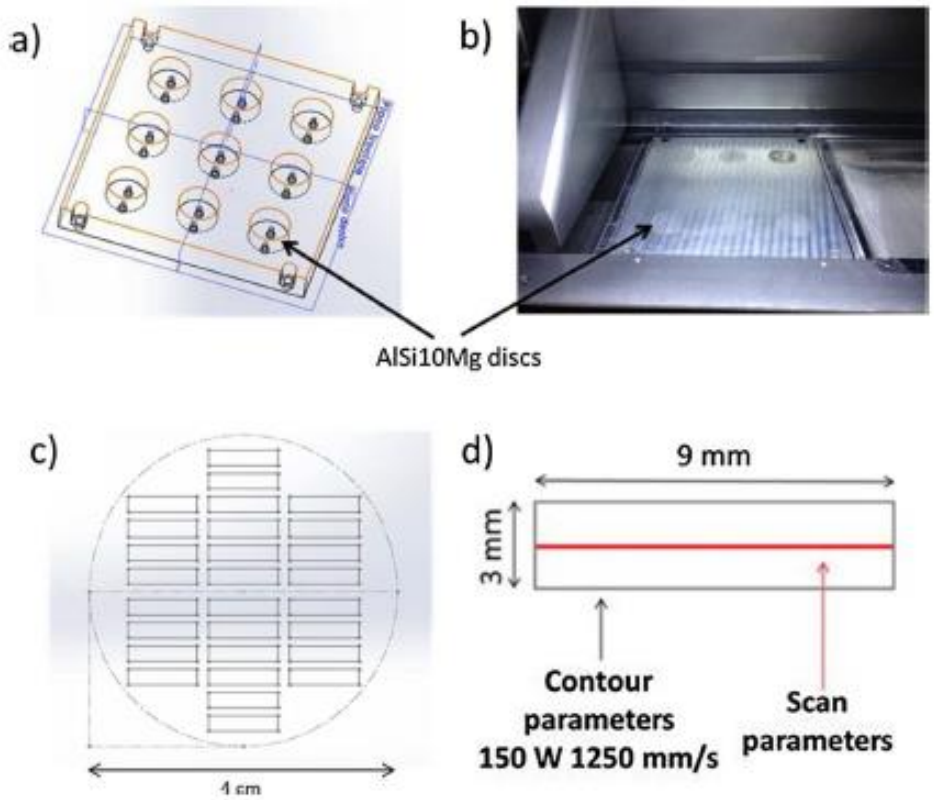

Figura 4.6 Piattaforma di costruzione (a, b), dischetti utilizzati per la deposizione (c) e geometria di scansione (d) [11]

Per studiare l'effetto della potenza del laser e della velocità di scansione sulla morfologia dei single scan sono stati prodotti due lotti, utilizzando i parametri di processo illustrati in Tabella 4.3. Nel primo lotto è stata analizzata una finestra di processo molto ampia, con 25 campioni, allo scopo di verificare la processabilità della lega e individuare rapidamente la zona in cui

affinare la ricerca dei parametri ottimali. La finestra di processo è una matrice potenza-velocità in cui vengono evidenziati i parametri che danno luogo a scansioni regolari, fornendo di conseguenza i parametri ottimali con cui è opportuno processare le polveri [11]. Nel secondo lotto prodotto sono stati utilizzati parametri di processo prossimi a quelli individuati come ottimali nella prima analisi e sono stati esaminati 12 campioni. Occorre precisare che per ogni accoppiata potenza-velocità di scansione sono stati prodotti ed analizzati due single scan.

Tabella 4.3 Parametri di processo utilizzati nella produzione dei single scan

Lotto	Potenza [W]	Velocità di scansione [mm/s]
1	100, 130, 160, 180, 195	300, 600, 800, 1200, 1500
2	160, 170, 180	700, 800, 900, 1000

4.3.1 Analisi on top

I single scan così ottenuti sono stati in primo luogo analizzati on-top acquisendo mediante il microscopio ottico LEICA DMI 5000M (Figura 4.7) cinque immagini della superficie (Figura 4.8a), e valutando la larghezza di ogni scansione con i software Paint.net ed ImageJ secondo lo schema mostrato in Figura 4.8. Ogni immagine è stata quindi privata dello sfondo (Figura 4.8b) e convertita in immagine binaria (Figura 4.8c). Infine, all'immagine binaria è stata sovrapposta una griglia con 45 linee verticali ottenendo 45 segmenti rappresentanti la larghezza locale della traccia fusa (Figura 4.8d). La larghezza media così ricavata è stata poi utilizzata come base di partenza nella definizione dell'hatching distance ottimale per la produzione di componenti massivi.

Figura 4.7 Microscopio LEICA DMI 5000M [36]

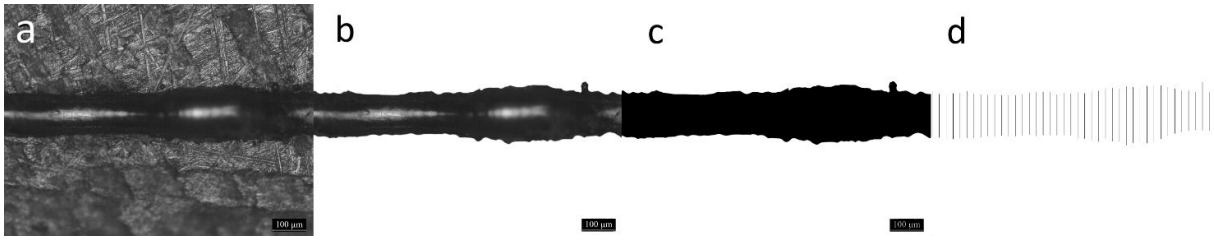

Figura 4.8 Immagine del single scan acquisita al microscopio ottico (a); immagine del single scan a seguito della rimozione dello sfondo mediante il software Paint.net (b); immagine binaria del single scan(c); single scan dopo la sovrapposizione della griglia (d)

Nel tentativo di comprendere l'influenza di potenza e velocità di passata sulla morfologia della traccia fusa, sono state calcolate media e deviazione standard delle larghezze dei single scan. Le larghezze medie così individuate sono state utili per stabilire l'hatching distance da utilizzare per la produzione dei componenti massivi.

Con l'obiettivo di determinare quale fosse il parametro più influente per la definizione della larghezza delle scansioni, è stata eseguita l'analisi ANOVA a due fattori: potenza e velocità di scansione.

4.3.2 Analisi dei melt pool

Dopo l'analisi on top, i single scan sono stati sezionati utilizzando la troncatrice MECATOME T210 (Figura 4.9) presente presso i laboratori POLITO DISAT-IIT. È stata utilizzata una lama diamantata, tagliando le sezioni nel mezzo della scansione per evitare effetti di bordo che avrebbero potuto condizionare l'analisi.

Figura 4.9 Troncatrice MECATOME T210 [37]

I campioni sono poi stati inglobati utilizzando una resina termoindurente a freddo di marchio Struers, preparata miscelando all'interno di un becher un opportuno agente indurente liquido con la polvere in proporzione 6:10. Il composto così ottenuto è stato versato in uno stampo in cui era stato inserito il campione da inglobare. Infine, il sistema è stato lasciato indurire sotto cappa per 20 minuti.

Per l'osservazione al microscopio ottico LEICA DMI 5000M, è stato necessario lucidare manualmente i campioni, utilizzando la lucidatrice PRESI Mecapol P320 mostrata in Figura 4.10, presente presso i laboratori POLITO DISAT-IIT.

La lucidatura a specchio è stata eseguita partendo da una carta con grana 180 e proseguendo con grane 400, 600, 800, 1200, 2400 e 4000. Dopo le carte si è passati all'utilizzo dei panni e degli stick diamantati da 3 µm e 1 µm. Infine, i campioni sono stati lavati con acqua e sapone ed asciugati con aria compressa.

Figura 4.10 Lucidatrice PRESI Mecapol P320

Le sezioni lucidate sono state osservate al microscopio ottico LEICA DMI 5000M ed analizzate al fine di determinare i parametri morfologici e dimensionali mostrati in Figura 4.11.

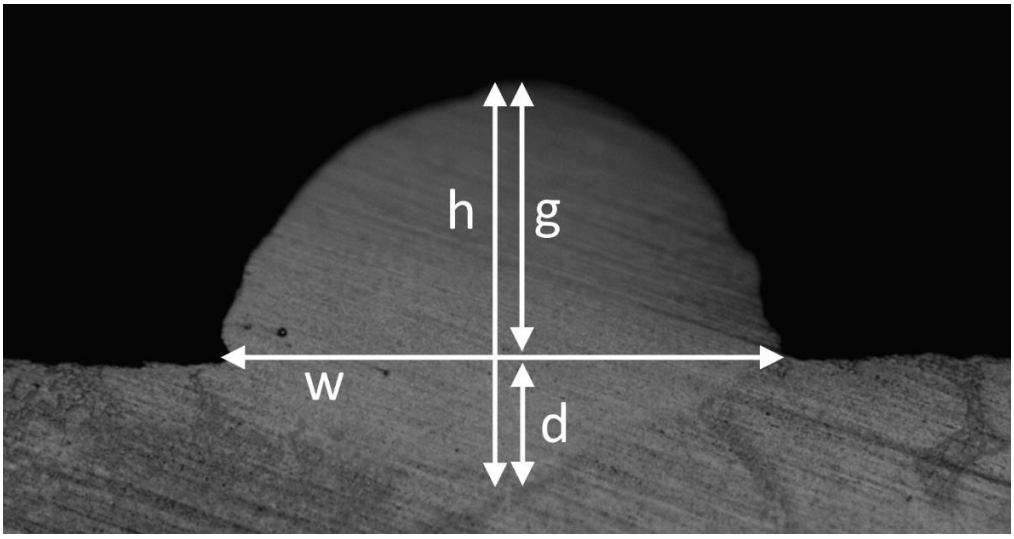

Figura 4.11 Rappresentazione schematica di una sezione dei melt-pool in cui sono mostrati i parametri geometrici analizzati

Mediante i software Paint.net ed ImageJ, è stato possibile individuare per ogni sezione i parametri dimensionali di larghezza (*w*), crescita (*g*), profondità del substrato (*d*), aspect ratio (*AR*) e circolarità (*R*).

Aspect ratio (AR) e circolarità (R) sono indicatori di forma adimensionali definiti come:

$$AR = \frac{Asse\ maggiore}{Asse\ minore} \tag{4.1}$$

$$R = 4 \cdot \frac{Area\ melt\ pool}{\pi \cdot (Asse\ maggiore)^2} \tag{4.2}$$

dove asse minore e maggiore, indicati nelle formule, sono stati ricavati mediante ImageJ ed indicano gli assi dell'ellisse che meglio approssima il melt pool.

Le immagini delle sezioni sono state acquisite mediante microscopio ottico LEICA DMI 5000M (Figura 4.12a), successivamente è stato eliminato lo sfondo lasciando la linea di demarcazione della superficie (Figura 4.12b) e si è resa binaria l'immagine (Figura 4.12c). Allo scopo di valutare crescita e profondità di penetrazione, la linea di demarcazione della superficie è stata prolungata attraverso la sezione (Figura 4.12d) e l'immagine è stata poi resa binaria (Figura 4.12e).

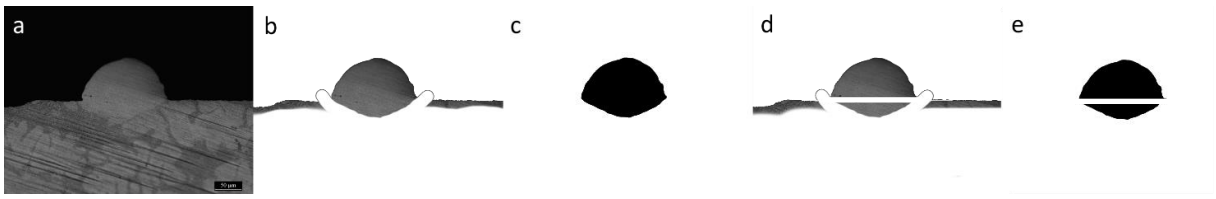

Figura 4.12 Immagine del melt pool acquisita al microscopio ottico (a); immagine del melt pool a seguito della rimozione dello sfondo mediante il software Paint.net (b); immagine binaria dell'intero melt pool (c); suddivisione del melt pool per distinguere crescita e profondità (d); immagine binaria del melt pool suddiviso (e)

4.4 Analisi dei componenti massivi

Sono stati realizzati due lotti di produzione dei componenti massivi, adottando i parametri di lavorazione mostrati in Tabella 4.4.

Il processo fusorio è stato eseguito in atmosfera protetta, ricca di Argon, e con la piattaforma mantenuta a 100°C. Si è scelto uno spessore di strato pari a 30 µm.

Le piastrine del primo lotto di produzione sono state realizzate mantenendo costante in tutti i layer la strategia di scansione (Figura 4.13a); invece, nel secondo lotto prodotto la strategia di scansione è stata ruotata di 67° tra due layer successivi, come mostrato in Figura 4.13b.

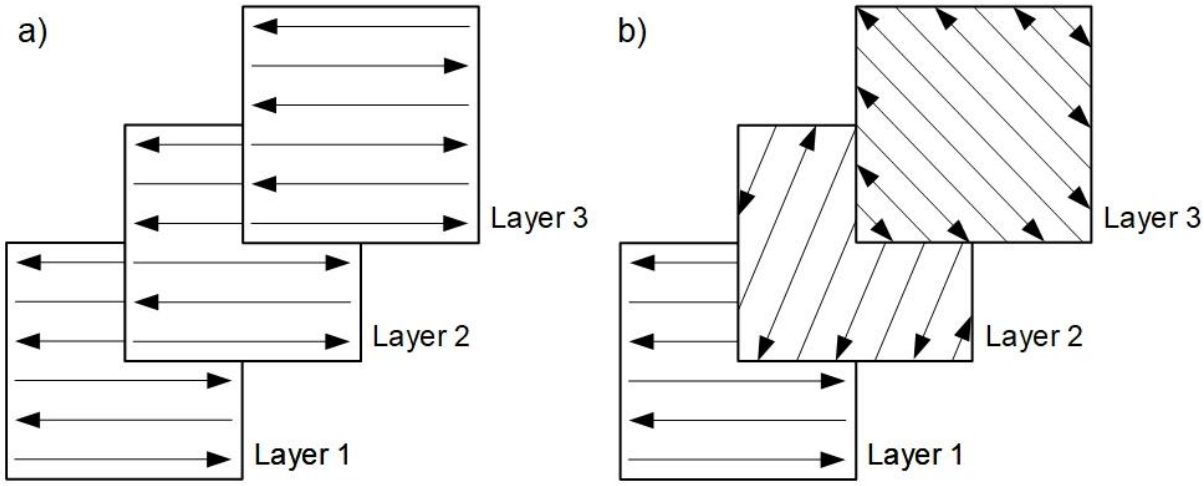

Figura 4.13 Strategie di scansione utilizzate: primo lotto di produzione (a); secondo lotto di produzione (b)

Per le piastrine prodotte con strategia di scansione monodirezionale, al fine di studiare l'effetto dei differenti parametri sulla porosità del componente finale, è stato seguito un modello di Design of Experiments (DOE) con 3 fattori: potenza del laser, velocità di scansione e hatching distance.

Come mostrato in Tabella 4.4, si è scelto di variare la potenza su tre livelli tra 160 W e 180 W, la velocità di scansione su quattro livelli tra 700 mm/s e 1000 mm/s e l'hatching distance su tre livelli tra 0.08 e 0.14 mm, con un conseguente totale di 36 esperimenti. Per ciascuna triade di parametri è stata prodotta una piastrina di dimensione 10x10x5 mm, come mostrato in Figura 4.14. Le piastrine sono poi state rimosse dalla piattaforma per elettroerosione.

Tabella 4.4 Parametri di processo utilizzati nella produzione delle piastrine

Strategia di scansione	**Potenza [W]**	**Velocità di scansione [mm/s]**	**Hatching distance [mm]**
Monodirezionale, 0°	160, 170, 180	700, 800, 900, 1000	0.08, 0.12, 0.14
Ruotata di 67°	170, 180	700, 800, 900, 1000	0.12, 0.14

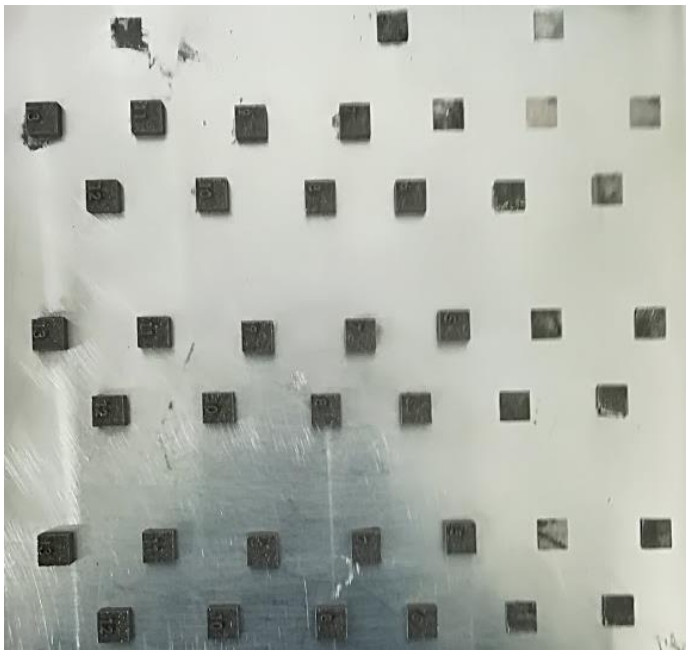

Figura 4.14 Griglia delle piastrine prodotte

Ciascuna piastrina è stata lucidata su ogni faccia utilizzando carte abrasive in modo da rifinire la superficie dei campioni, così da poter misurare la densità applicando il metodo di Archimede. A tale scopo è stato utilizzato il Sartorius Density Determination Kit YDK 01, mostrato in Figura 4.15.

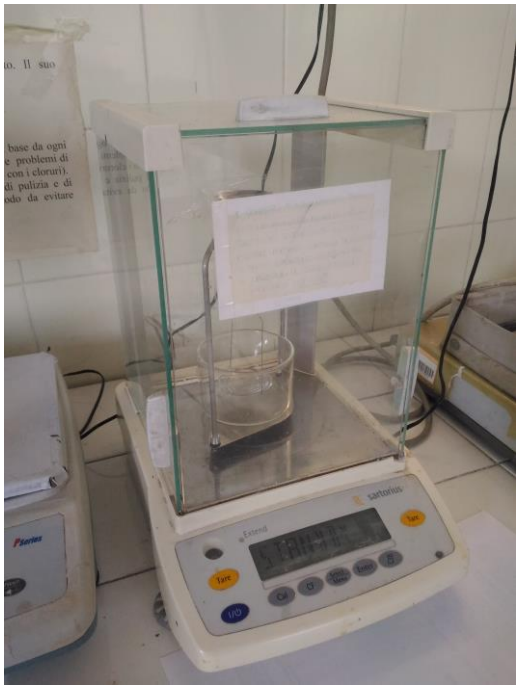

Figura 4.15 Sartorius Density Determination Kit YDK 01

Tale sistema permette di pesare un corpo solido sia in aria che in acqua dando la possibilità di determinare la densità delle piastrine di AlSi10Mg+4%Cu, mediante la formula:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(fl)}{W(a) - W(fl)} \qquad (4.3)$$

dove:

$\rho(fl) = densità\ dell'acqua\ distillata$

$W(a) = peso\ in\ aria\ del\ campione$

$W(fl) = peso\ in\ acqua\ del\ campione$

Il peso in aria e in acqua di ciascun campione è stato ricavato dalla media di tre misurazioni.

La densità relativa della lega di AlSi10Mg+4%wtCu è stata calcolata mediante la seguente equazione:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{Archimede}}{\rho_{th.AlSi10Mg+4\%wtCu}} = \frac{\rho_{Archimede}}{\rho_{th.AlSi10Mg} \cdot V_{AlSi10Mg} + \rho_{th.Cu} \cdot V_{Cu}} \qquad (4.4)$$

dove:

$\rho_{Archimede} = densità\ della\ piastrina\ misurata\ con\ il\ principio\ di\ Archimede$

$\rho_{th.AlSi10Mg+4\%wtCu} = densità\ teorica\ della\ lega\ di\ AlSi10Mg + 4\%wtCu$

La densità teorica della lega è pari a 2.74 kg/dm^3 ed è stata calcolata utilizzando la regola delle miscele.

I dati così ottenuti sono stati analizzati utilizzando il software Microsoft Excel.

Con l'obiettivo di determinare i parametri più influenti per ottenere componenti densi, utilizzando il software Matlab è stata eseguita un'analisi ANOVA a tre fattori: potenza, velocità di scansione e hatching distance.

Successivamente, le piastrine sono state inglobate con una resina termoindurente e lucidate fino a 1 µm. Mediante il microscopio ottico LEICA DMI 5000M, per ogni piastrina sono state acquisite 10 immagini, sufficienti a coprire l'intera sezione (Figura 4.16a). Tali immagini sono

state trasformate in binarie grazie al software ImageJ (Figura 4.16b) e, misurando la percentuale di area nera nella sezione, è stato possibile stimare la porosità del componente utilizzando anche questo metodo. Inoltre, in questo modo è stato possibile osservare la presenza dei difetti nelle sezioni analizzate.

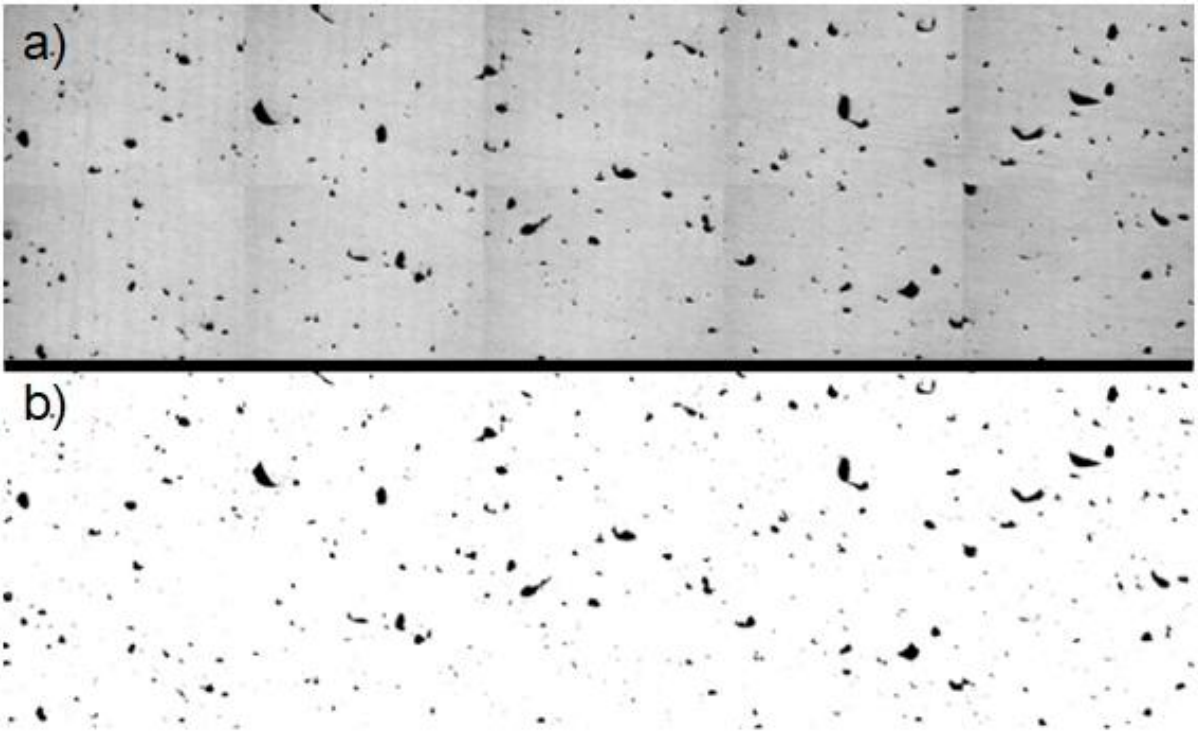

Figura 4.16 (a) Immagine della sezione della piastrina al microscopio ottico; (b) Immagine binaria della sezione della piastrina

Sulle piastrine aventi una porosità inferiore all'1% sono state eseguite prove di microdurezza Vickers utilizzando l'indentometro CM-800 Series Micro Indentation Hardness Testers (Figura 4.17).

Nell'eseguire le microindentazioni è stato seguito lo Standard Test Method for Microindentation Hardness of Powder Metallurgy (PM) Materials [38]. In accordo a tale procedura, un carico di 100 gf è stato applicato per 15 s sulla sezione x-z dei campioni, usando come penetratore una punta di diamante a forma piramidale retta con angolo al vertice di 136°. Su ogni campione sono state effettuate 35 indentazioni: 17 in orizzontale, 6 in verticale e 12 sulle diagonali.

Figura 4.17 Indentometro CM-800 Series Micro Indentation Hardness Testers [39]

L'immagine di ogni impronta è stata acquisita mediante il microscopio ottico LEICA DMI 5000M, ed è stata poi ricavata la misura delle diagonali d_1 e d_2 (Figura 4.18) utilizzando il software ImageJ.

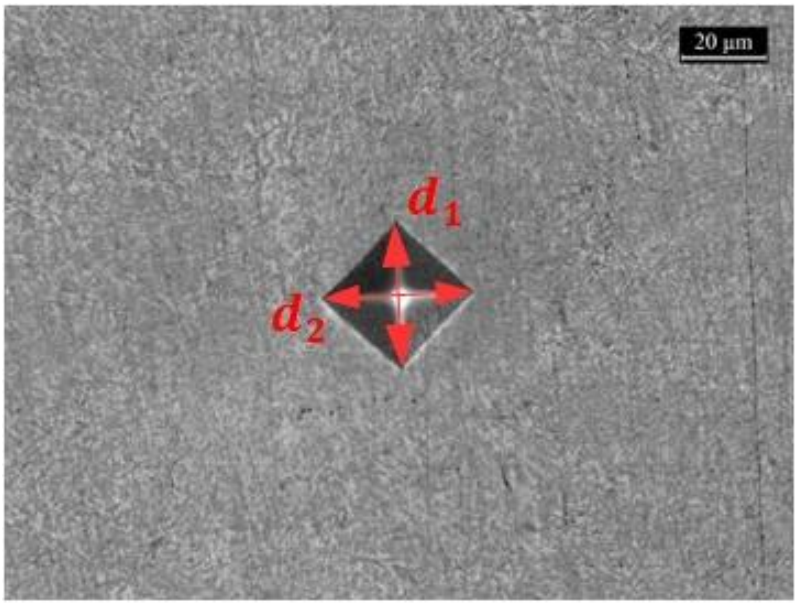

Figura 4.18 Misura delle diagonali d_1 *e* d_2

La durezza Vickers è stata misurata mediante la seguente formula:

$$HV = 1854.4\frac{P}{d^2} \qquad (4.5)$$

dove:

$P = \ forza\ applicata\ [gf]$

$d = \ media\ della\ lunghezza\ delle\ due\ diagonali\ [\mu m]$

Le analisi effettuate sulle piastrine del primo lotto di produzione hanno permesso di restringere ulteriormente la finestra di processo, eliminando quei parametri coi quali non si ottenevano risultati ottimali.

Per le piastrine del secondo lotto di produzione, è stato seguito un modello di DOE in accordo alla nuova finestra di processo individuata: la potenza è stata variata tra 170 W e 180 W, la velocità di scansione su quattro livelli tra 700 mm/s e 1000 mm/s e l'hatching distance tra 0.12 mm e 0.14 mm, con un conseguente totale di 16 esperimenti.

Tali piastrine sono state analizzate sia con analisi di immagine sia usando il metodo di Archimede, al fine di determinarne il livello di densità.

Infine, l'analisi della microstruttura delle piastrine è stata effettuata utilizzando il microscopio FESEM.

5. Risultati e discussione

5.1 Analisi delle polveri

Per poter analizzare al FESEM le proprietà morfologiche delle polveri, è stato necessario depositarle su dei porta campioni adesivi. In Figura 5.1 e in Figura 5.2 vengono mostrate le micrografie a diversi ingrandimenti delle polveri analizzate. In entrambi i casi si osserva una dimensione variabile delle particelle senza ossidazioni e altri difetti superficiali. Inoltre, si nota la presenza di satelliti, ovvero l'adesione delle particelle più piccole a quelle di dimensione maggiore con la conseguente formazione di larghi cluster. Come si può osservare in Figura 5.1, le polveri di AlSi10Mg presentano una morfologia sferica, mentre quelle di Cu hanno una forma tendente a sferoidale (Figura 5.2) e di conseguenza avranno una minore flowability.

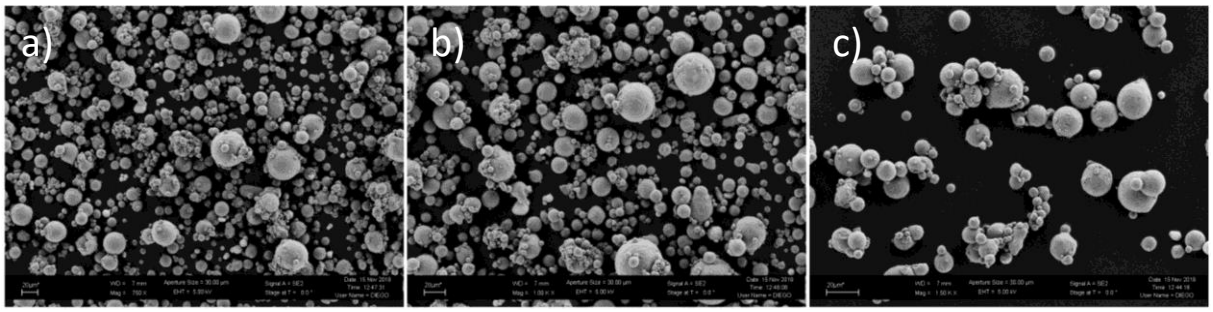

Figura 5.1 Micrografie a diversi ingrandimenti delle polveri di AlSi10Mg: (a)750X, (b)1000X, (c)1500X

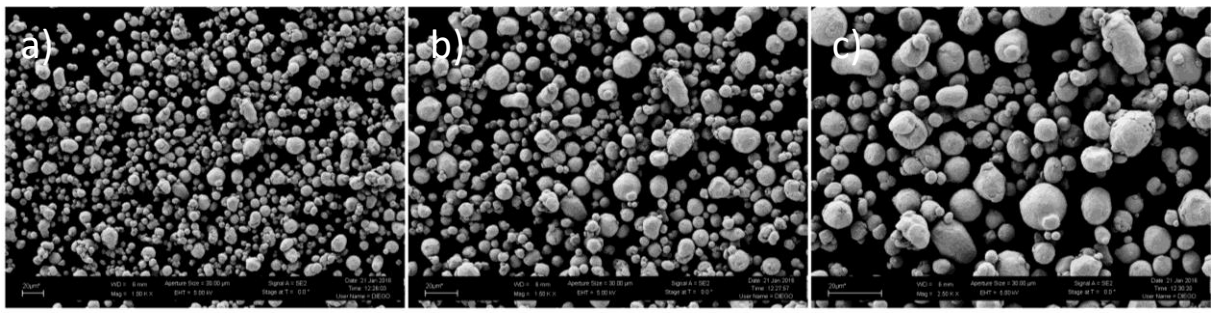

Figura 5.2 Micrografie a diversi ingrandimenti delle polveri di Cu: (a)1000X, (b)1500X, (c)2500X

In Figura 5.3 viene mostrata la distribuzione di taglia della miscela delle polveri, valutata utilizzando il granulometro laser Fritsch Analysette 22 Compact (Figura 4.2) e calcolata in volume. Come mostrato in Figura 5.3, si ha che i d_{10}, d_{50} e d_{90} delle particelle sono rispettivamente pari a 13.32, 28.22 e 44.77 µm. Di conseguenza, è possibile concludere che le polveri hanno dimensioni adatte per la fabbricazione additiva.

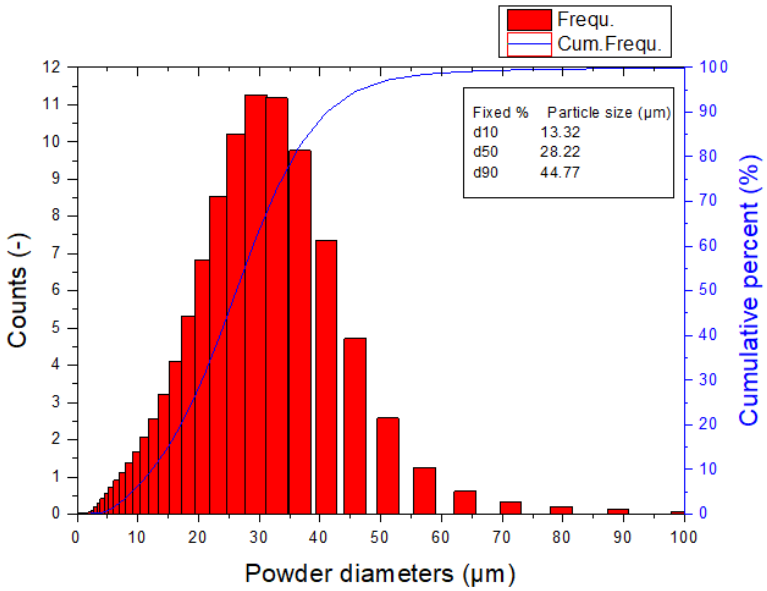

Figura 5.3 Distribuzione della dimensione delle particelle per la lega AlSi10Mg+4%wt Cu

5.2 Analisi dei single scan

5.2.1 Primo lotto di produzione

Dall'analisi on top dei single scan è stato possibile distinguere quattro differenti morfologie delle tracce fuse:

- "balling" (Figura 5.4a)
- "regolare" (Figura 5.4b)
- "irregolare" (Figura 5.4c)
- "troppo spessa" (Figura 5.4d)

Come osservato da Aversa et al. [11], tale differenza morfologica può essere spiegata in funzione della potenza e della velocità di scansione utilizzate nella fabbricazione dei single

scan. Per valutare l'effetto combinato di tali parametri si utilizza la densità di energia lineare (LED) [15]. In Figura 5.5 le immagini on top delle scansioni sono ordinate nella finestra di processo analizzata, mettendo in evidenza il LED con cui sono stati realizzati i single scan. I colori utilizzati nell'immagine permettono di distinguere le varie scansioni in accordo alla classificazione mostrata in Figura 5.4.

Come si può osservare in Figura 5.5, per bassi valori di potenza del laser ($P = 100\ W$) ed elevate velocità di scansione, l'energia fornita al letto di polvere non è sufficiente per fondere completamente le particelle [15], di conseguenza si hanno scansioni con evidenti fenomeni di balling, quindi caratterizzate da una traccia fusa discontinua, fortemente irregolare, in cui il materiale fuso è solidificato sottoforma di una larga sfera [13].

Operando con maggiori valori di potenza ($P = 130, 160, 180\ W$), l'energia fornita permette la corretta fusione delle particelle, pertanto si osservano scansioni regolari, in cui la traccia fusa è continua e simmetrica.

Se il LED è troppo elevato, si osservano scansioni irregolari che presentano una traccia fusa continua ma fortemente asimmetrica. Ciò è dovuto ad un eccessivo quantitativo di energia fornito al letto di polvere che comporta un incremento del gradiente di temperatura lungo la superficie della scansione, il quale, accoppiato con la tensione superficiale, causa un'accentuazione del flusso di Marangoni, con un conseguente aumento di instabilità della scansione [11], [15], [18].

Sorprendentemente, una scansione stabile, seppur molto spessa, è stata osservata operando con LED estremamente elevato ($LED = 0.65\ J/mm$). Tale scansione, benché stabile, non è ritenuta adatta alla produzione di componenti massivi poiché, come dimostrato da Wang et al [40], al crescere dell'energia fornita al letto di polvere si assiste ad un aumento di intensità del fenomeno di spattering, che consiste in schizzi di metallo dal bagno fuso, determinando una riduzione delle polveri disponibili attorno alla scansione ed un conseguente aumento di porosità nella parte realizzata. Inoltre, occorre tenere in considerazione che operando con valori elevati di LED, si potrebbero avere maggiori tensioni residue nella parte realizzata a causa dell'eccesso di calore prodotto, e si potrebbe assistere alla vaporizzazione di alcuni elementi di lega [11].

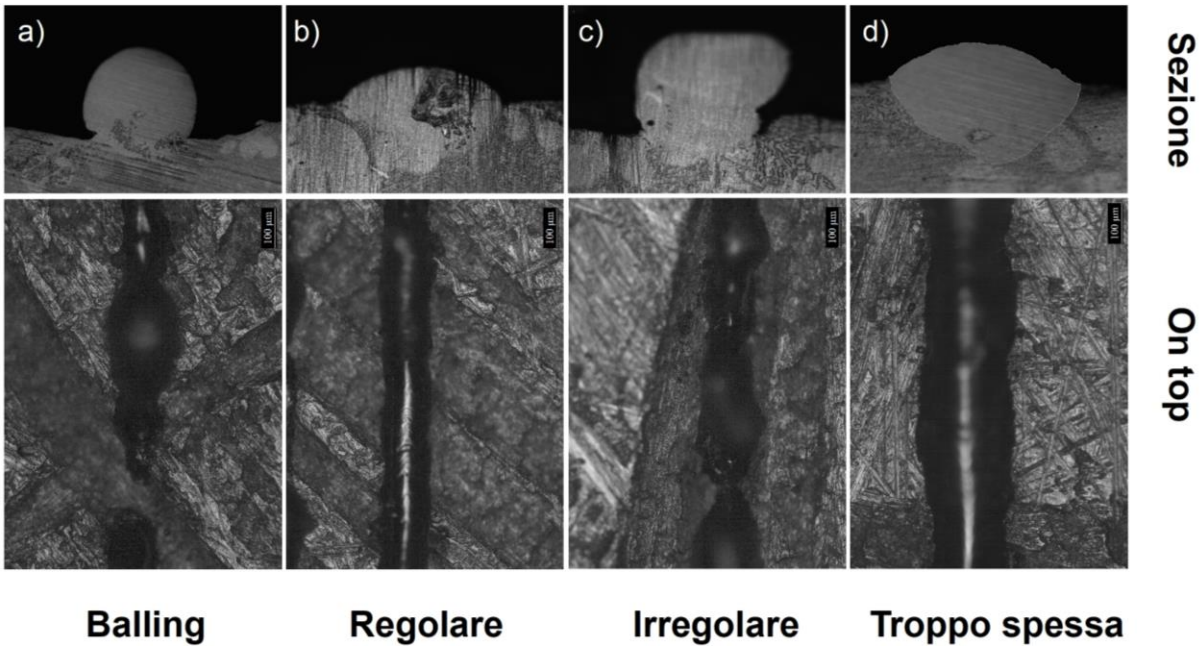

Figura 5.4 Morfologia dei single scan on top ed in sezione: (a) scansione irregolare, (b) scansione continua e stabile

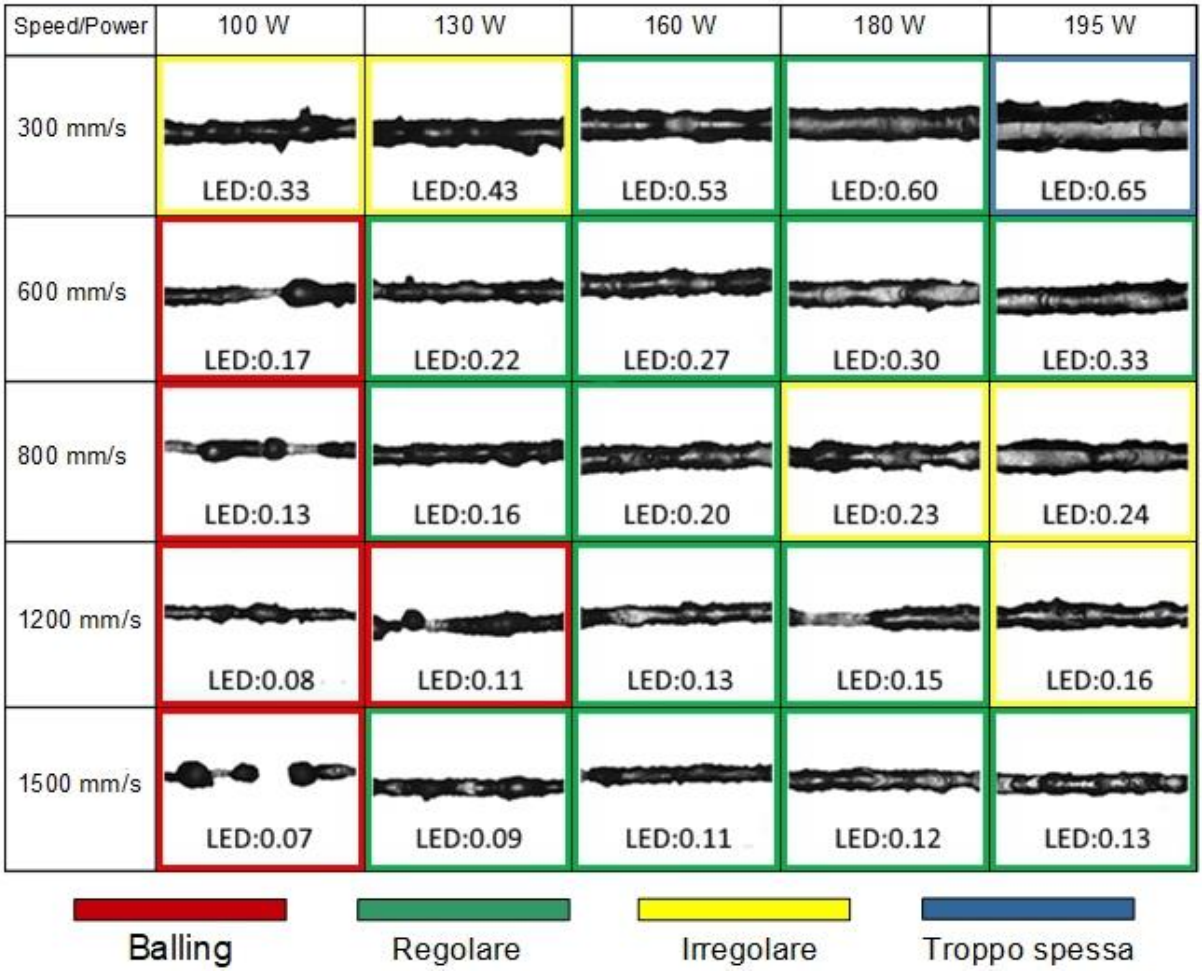

Figura 5.5 Finestra di processo analizzata nel primo lotto di produzione (i colori indicano la morfologia della scansione)

La deviazione standard può essere pensata come un indicatore della stabilità delle scansioni: ad alti valori di deviazione standard corrispondono scansioni irregolari; viceversa, per bassi valori di deviazione standard si osservano scansioni maggiormente regolari [11]. Nel diagramma in Figura 5.6, la deviazione standard della larghezza delle scansioni viene mostrata in funzione del LED. Si osserva che le scansioni che presentano fenomeni di balling hanno valori di deviazione standard molto elevati, superiori a 20 µm, mentre le scansioni classificate come "irregolari" presentano deviazioni standard comprese tra 16 e 20 µm. Viceversa, le scansioni "regolari" e "troppo spesse" presentano generalmente basse deviazioni standard.

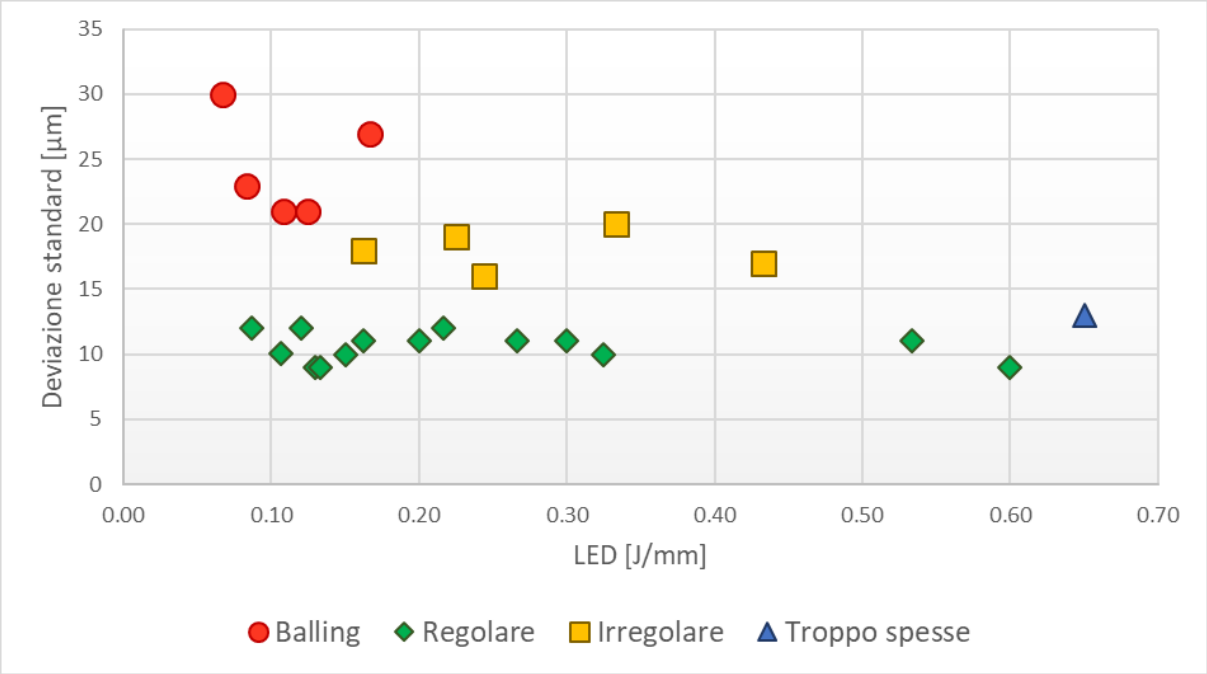

Figura 5.6 Distribuzione dei valori di deviazione standard in funzione del LED

Osservando i diagrammi in Figura 5.7 è possibile notare che la larghezza dei single scan si riduce al crescere della velocità di scansione (Figura 5.7a), mentre aumenta al crescere della potenza del laser (Figura 5.7b). Di conseguenza, in accordo con i risultati ottenuti in numerose ricerche sui single scan ([9], [13], [14]), è possibile affermare che vi è una correlazione diretta tra la larghezza delle scansioni ed il LED [9].

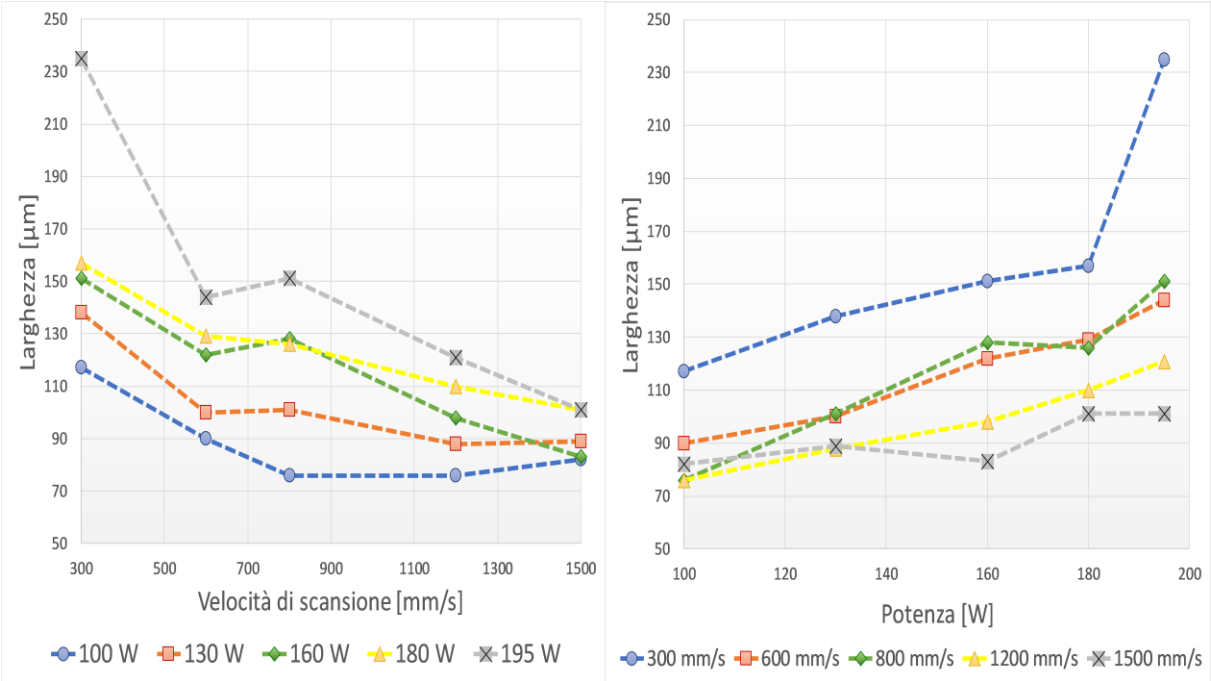

Figura 5.7 Influenza sulla larghezza dei single scan della velocità di scansione (a) e della potenza del laser (b)

Al fine di valutare con maggiore dettaglio la morfologia delle scansioni, si è scelto di analizzarne i melt pool.

In Figura 5.8 si possono osservare le immagini binarie dei melt pool ordinati all'interno della finestra di processo. Per ogni melt pool sono state analizzate sei caratteristiche geometriche: altezza, larghezza, crescita, profondità, aspect ratio (AR), e roundness (R), nel tentativo di individuare un criterio che permettesse di identificare una forma ottimale. I risultati di tali analisi vengono riportati in Tabella 5.1.

Sono stati considerati ottimali quei melt pool caratterizzati da $1.8 \leq AR \leq 2.6$ e $0.38 \leq R \leq 0.56$. Infatti, per tali valori dei fattori di forma sono stati osservati melt pool aventi una forma ellittica consona alla produzione di componenti massivi, con adeguati valori di crescita e profondità. Viceversa, quando $AR < 1.8$ e $R > 0.56$, si osservano melt pool con accentuati ingobbimenti, tendenti ad una forma circolare, contraddistinti da elevata crescita e bassa profondità, stante ad indicare una limitata fusione della parte sottostante. Infine, quando $AR > 2.6$ e $R < 0.38$, si osservano melt pool ellittici ma con elevata eccentricità, caratterizzati da bassa crescita e profondità.

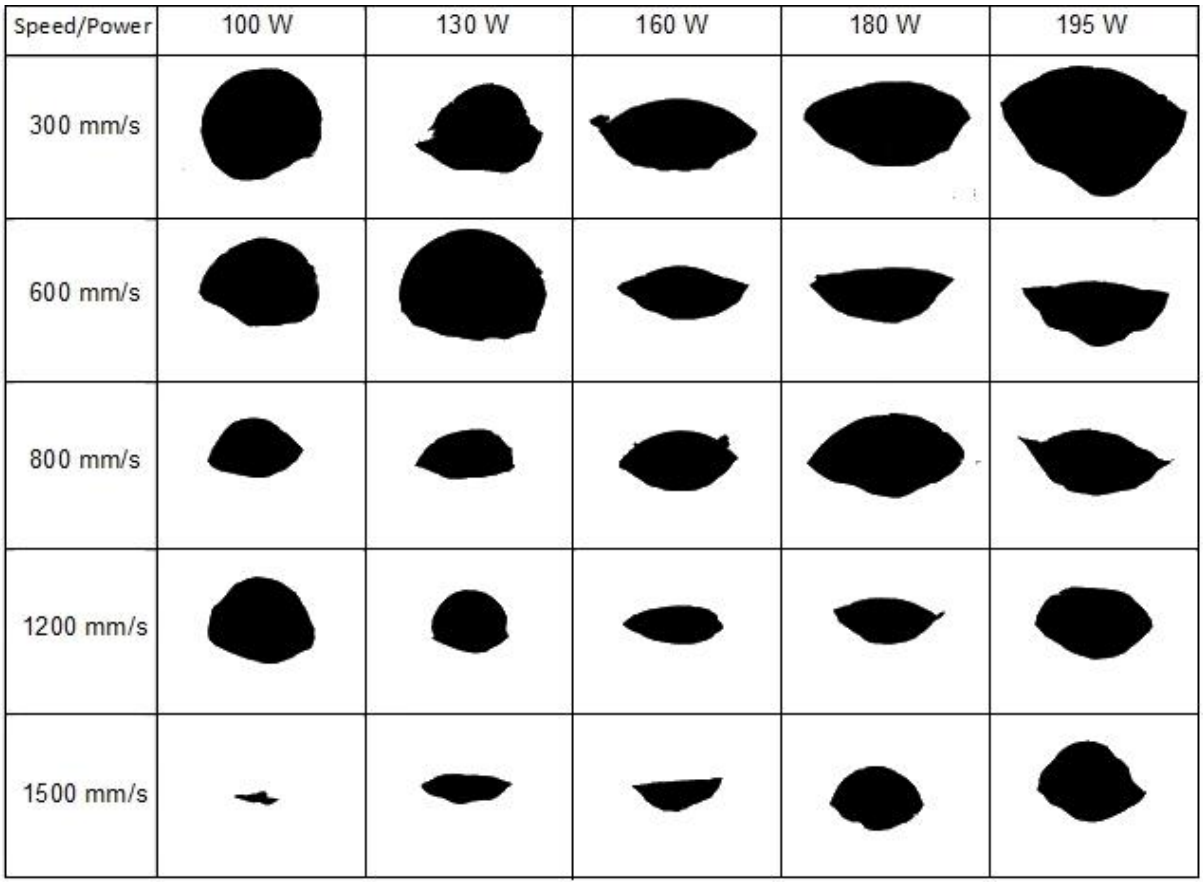

Figura 5.8 Melt pool del primo lotto di produzione

Tabella 5.1 Parametri geometrici dei melt pool

Potenza [W]	Velocità [mm/s]	LED [J/mm]	Larghezza [µm]	Altezza [µm]	Crescita [µm]	Profondità [µm]	AR	R
100	300	0.33	142.58	91.99	70.26	22.30	1.55	0.64
100	600	0.17	119.62	89.27	64.45	26.51	1.34	0.75
100	800	0.13	92.55	60.89	37.94	23.51	1.52	0.66
100	1200	0.08	109.48	87.58	67.55	19.80	1.25	0.80
100	1500	0.07	50.16	13.52	6.10	7.33	3.71	0.27
130	300	0.43	116.10	90.70	54.65	37.28	1.28	0.78
130	600	0.22	150.24	112.96	84.23	29.21	1.33	0.75
130	800	0.16	96.77	50.14	37.09	13.24	1.93	0.52
130	1200	0.11	77.80	63.77	47.29	16.00	1.22	0.82
130	1500	0.09	93.01	31.21	12.21	18.91	2.98	0.34
160	300	0.53	153.50	73.80	33.52	40.76	2.08	0.48
160	600	0.27	127.65	54.55	21.50	33.52	2.34	0.43
160	800	0.20	114.57	60.94	32.12	30.24	1.88	0.53
160	1200	0.13	93.61	54.74	29.77	24.98	1.71	0.58
160	1500	0.11	96.29	35.27	8.18	27.84	2.73	0.37
180	300	0.60	162.45	87.81	39.72	48.38	1.85	0.54
180	600	0.30	136.66	57.18	13.05	44.03	2.39	0.42
180	800	0.23	156.07	83.91	44.77	39.15	1.86	0.54
180	1200	0.15	102.12	46.63	15.23	31.58	2.19	0.46
180	1500	0.12	102.33	50.16	28.70	21.55	2.04	0.49
195	300	0.65	189.59	131.66	41.15	90.29	1.44	0.69
195	600	0.33	147.74	66.85	13.90	53.24	2.21	0.45
195	800	0.24	140.01	66.67	19.39	47.20	2.10	0.48
195	1200	0.16	115.62	72.26	38.55	34.81	1.60	0.63
195	1500	0.13	105.25	81.59	50.77	31.38	1.29	0.77

Analizzando i diagrammi in Figura 5.9 è possibile notare che la larghezza e la profondità dei melt pool sono direttamente proporzionali alla potenza del laser e inversamente proporzionali alla velocità di scansione. Come osservato da Nie et al. [9], ciò è legato al fatto che variando tali parametri cambia il quantitativo di energia fornito al letto di polvere e, di conseguenza, la temperatura raggiunta e la quantità di metallo fuso.

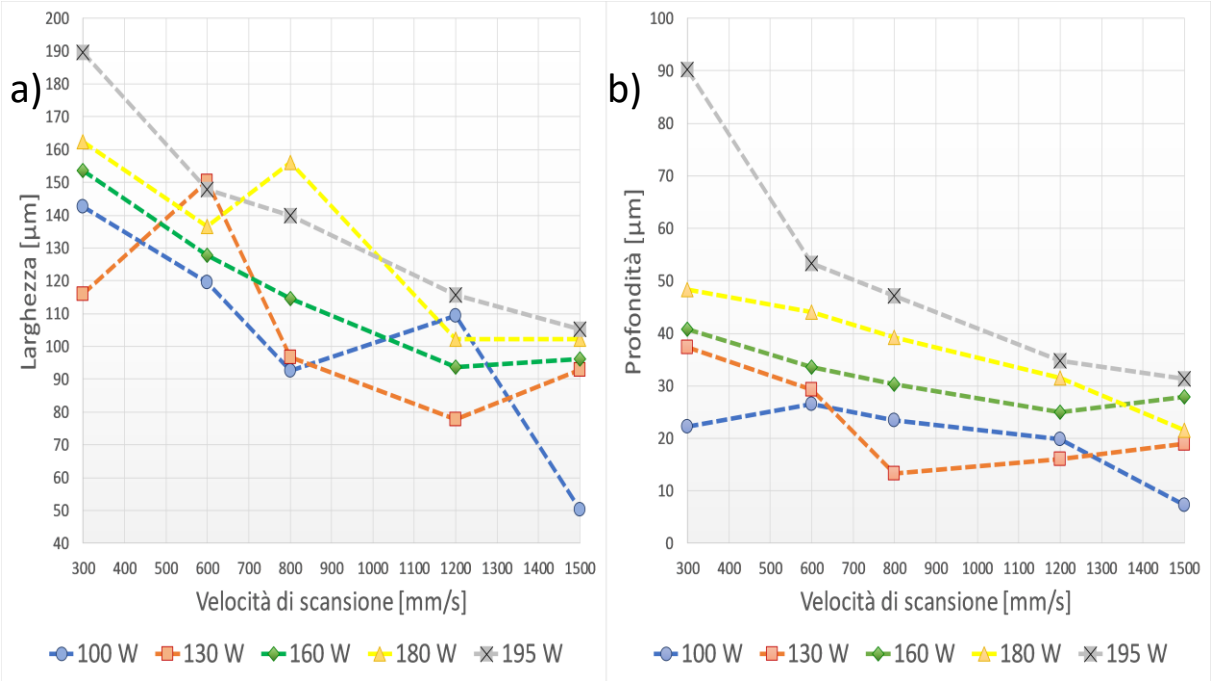

Figura 5.9 Caratteristiche geometriche dei melt pool in funzione della potenza e della velocità di scansione: (a) larghezza, (b) profondità

Integrando i risultati delle analisi on top e dei melt pool, si è cercato di individuare la zona in cui affinare la ricerca dei parametri ottimali; a tale scopo sono stati considerati i seguenti quattro punti:

1. continuità e stabilità dimensionale del single scan
2. profondità del melt pool sufficiente a garantire una buona adesione con il layer precedente
3. crescita del melt pool consona ad una produzione rapida
4. forma del melt pool in grado di garantire accuratezza dimensionale ed alta densità in vista di una produzione di componenti massivi

In accordo a tali criteri, si è scelto di affinare la finestra di processo attorno a 160 e 180 W di potenza del laser e 800 mm/s di velocità di scansione, poiché tali parametri si trovano al centro di una zona della finestra di processo caratterizzata da una buona stabilità.

5.2.2 Secondo lotto di produzione

Basandosi sull'analisi precedente, nel secondo lotto di produzione è stata esaminata una finestra di processo costituita da dodici single scan, realizzati con tre livelli di potenza del laser (160, 170 e 180 W) e quattro livelli di velocità di scansione (700, 800, 900 e 1000 mm/s).

In Figura 5.10 le immagini on top delle scansioni sono ordinate nella finestra di processo analizzata, mettendo in evidenza il LED con cui sono stati realizzati i single scan e utilizzando i medesimi colori già introdotti per il primo lotto di produzione. Si ricorda che per ogni accoppiata potenza-velocità sono stati prodotti ed analizzati due single scan e di conseguenza ogni valore di larghezza e deviazione standard è stato ricavato dalla media di due risultati. Sono stati contornati in verde quei single scan che presentavano scansioni regolari almeno in uno dei due campioni analizzati.

Come si può osservare in Figura 5.10, gran parte delle scansioni sono regolari, a conferma dell'elevata stabilità dei single scan conseguibile con i parametri individuati come ottimali nella prima analisi.

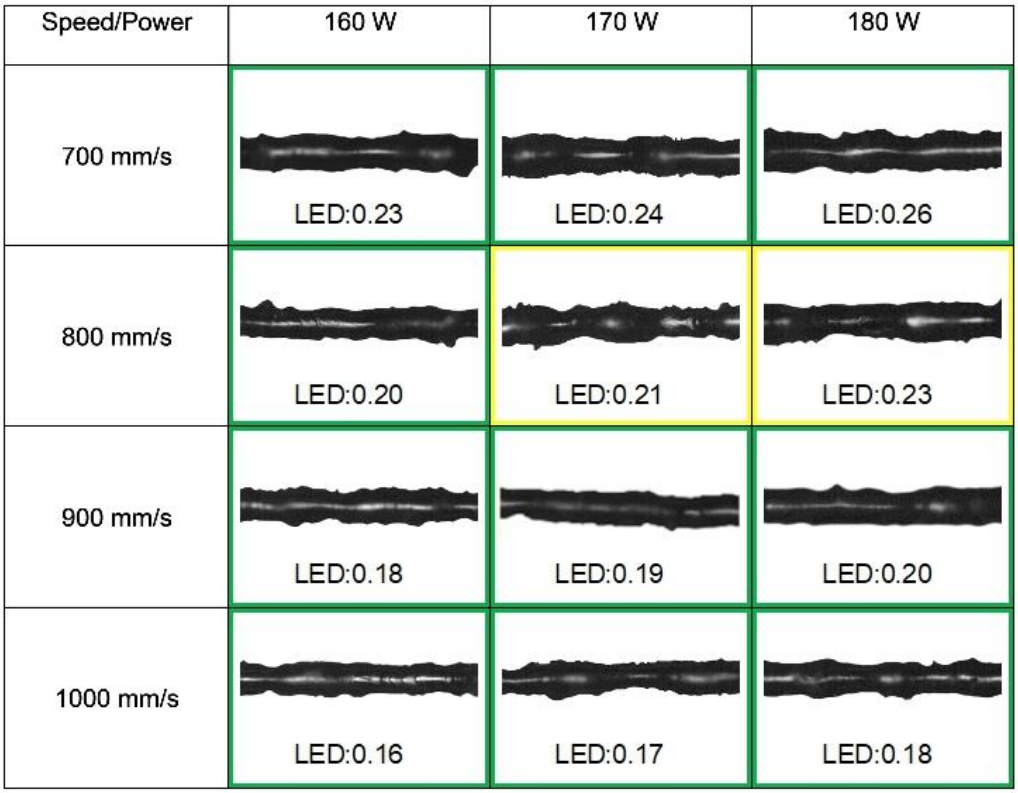

Figura 5.10 Finestra di processo analizzata nel secondo lotto di produzione (i colori indicano la morfologia della scansione)

Come per il primo lotto di produzione, anche in questo caso sono stati analizzati i melt pool.

In Figura 5.11 si possono osservare le immagini binarie dei melt pool ordinate secondo i parametri potenza-velocità utilizzati. Si nota che, specie operando con velocità di scansione pari a 800 mm/s, vi sono melt pool con ingobbimenti accentuati; mentre per le altre classi di velocità di scansione, si osservano melt pool aventi una forma ellittica consona alla produzione di componenti massivi.

I risultati ottenuti dalle analisi effettuate sono riportati in Tabella 5.2. Si ricorda che per ogni accoppiata potenza-velocità sono stati analizzati due melt pool e di conseguenza ogni valore in tabella è stato ricavato dalla media di due risultati.

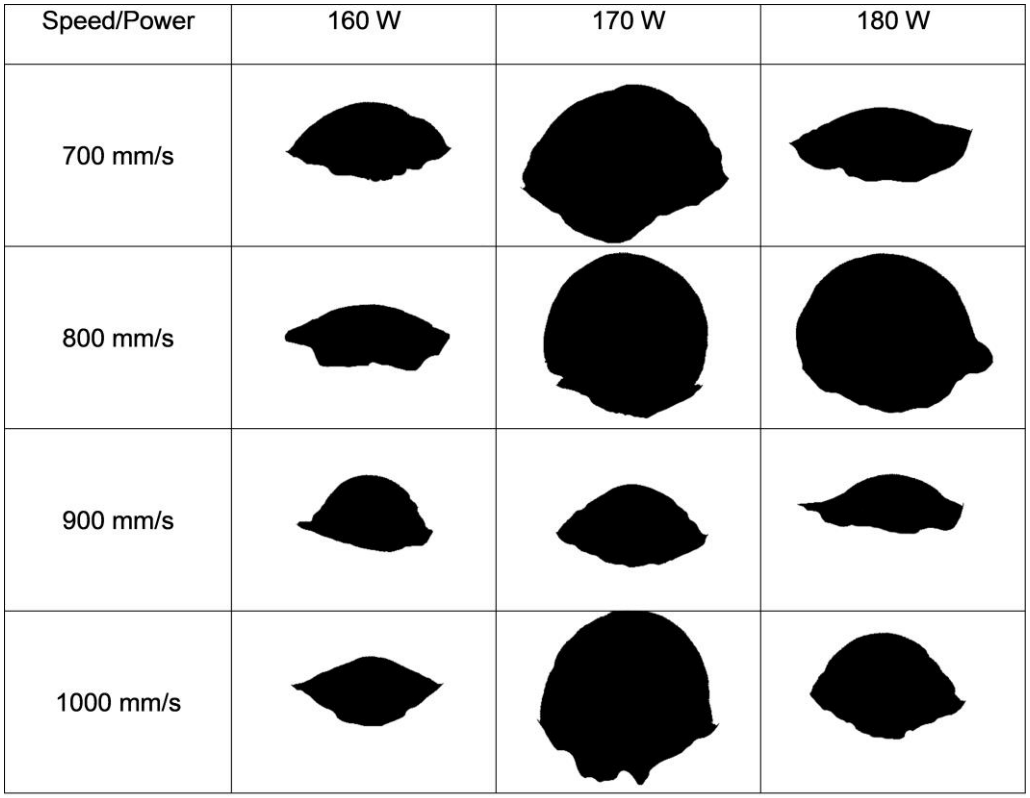

Figura 5.11 Melt pool del secondo lotto di produzione

Tabella 5.2 Risultati ottenuti dall'analisi della geometria dei melt pool

Potenza [W]	Velocità [mm/s]	LED [J/mm]	Larghezza [µm]	Altezza [µm]	Crescita [µm]	Profondità [µm]	AR	R
160	700	0.23	129.86	62.12	38.99	22.77	2.09	0.48
160	800	0.20	130.60	52.35	23.41	28.85	2.46	0.41
160	900	0.18	107.10	60.74	40.55	19.82	1.57	0.64
160	1000	0.16	119.63	54.93	25.62	28.85	1.94	0.52
170	700	0.24	155.16	103.89	62.69	40.50	1.43	0.70
170	800	0.21	141.21	118.04	89.93	27.45	1.21	0.84
170	900	0.19	125.32	65.33	36.37	28.89	1.83	0.55
170	1000	0.17	170.07	143.36	112.15	30.95	1.17	0.86
180	700	0.26	143.96	59.08	27.47	31.34	2.40	0.42
180	800	0.23	140.16	118.15	67.37	50.07	1.20	0.84
180	900	0.20	124.23	87.17	45.04	41.46	2.03	0.61
180	1000	0.18	131.08	117.39	74.87	42.89	1.36	0.74

Dall'analisi dei single scan realizzati nel secondo lotto di produzione, non è stato possibili eliminare alcun parametro dalla finestra di processo poiché non sono stati osservati difetti tali da compromettere la realizzazione di componenti massivi. Pertanto, è stata validata la scelta dei parametri individuati come ottimali nella prima fase dell'analisi ed è stato possibile osservare che, operando con valori di LED compresi tra 0.16 J/mm e 0.26 J/mm, si ottengono scansioni continue e con superfici regolari.

5.2.2.1 Analisi ANOVA

Al fine di determinare l'influenza di potenza e velocità sulla larghezza delle scansioni e sulla profondità e crescita dei melt pool, si è scelto di eseguire un test ANOVA a due fattori.

Per la velocità di scansione sono stati considerati quattro livelli: 700 mm/s, 800 mm/s, 900 mm/s, 1000 mm/s, mentre per la potenza tre: 160 W, 170 W, 180 W; di conseguenza sono stati esaminati dodici trattamenti.

Il test è stato eseguito utilizzando la funzione *anova2* del software Matlab. Tale funzione richiede in input le medie delle grandezze considerate, dando in output i risultati riportati in Tabella 5.3.

Tabella 5.3 Risultati ANOVA sui single scan

Source	SS	Df	MS	F	P-value
ANOVA per la larghezza del single scan					
Potenza [W]	623.716	2	311.858	22.35	0.0017
Velocità [mm/s]	252.159	3	84.053	6.02	0.0305
Error	83.726	6	13.954		
Total	959.601	11			
ANOVA per la crescita del melt pool					
Potenza [W]	3722.32	2	1861.16	3.7	0.0897
Velocità [mm/s]	1864.69	3	621.56	1.24	0.3759
Error	3016.46	6	502.74		
Total	8603.46	11			
ANOVA per la profondità del melt pool					
Potenza [W]	540.656	2	270.328	5.61	0.0423
Velocità [mm/s]	54.747	3	18.249	0.38	0.7721
Error	289.064	6	48.177		
Total	884.466	11			

Tale test ha permesso di stabilire che la potenza è il parametro che ha maggiore influenza sulla larghezza della scansione, poiché il p-value è molto piccolo, con un valore pari a 0.0017, di conseguenza, tale fattore è estremamente significativo. Viceversa, si osserva che la velocità di scansione ha un'influenza inferiore (ma comunque significativa), poiché il p-value è più elevato.

È possibile osservare che la velocità di scansione ha una bassa influenza sulla profondità dei melt pool, poiché presenta valori di p-value molto elevati, ben superiori alla soglia di

significatività di 0.05. Viceversa, si osserva che la potenza del laser ha maggiore influenza, poiché presenta p-value pari a 0.0423.

Si nota che nessuno dei due fattori analizzati sembra influenzare la crescita dei melt pool. Ciò accade a causa di alcuni melt pool che presentano un ingobbimento accentuato sulla superficie (Figura 5.11) che non permettono di eseguire un'analisi affidabile.

I risultati ottenuti dall'analisi ANOVA rispecchiano quanto osservato da Yadroitsev et al. [12] analizzando l'influenza dei parametri di processo sulla morfologia dei single scan.

5.3 Analisi dei componenti massivi

Sono stati realizzati due lotti di piastrine: nel primo la strategia di scansione è stata mantenuta costante; nel secondo la strategia è stata ruotata di 67° tra due layer consecutivi. Per entrambi i lotti prodotti la porosità è stata calcolata utilizzando due tecniche: il metodo di Archimede e l'analisi di immagine.

5.3.1 Primo lotto di produzione: strategia di scansione 0°

I risultati ottenuti per le piastrine del primo lotto di produzione sono illustrati in Tabella 5.4: la porosità misurata per analisi di immagine è indicata da (1), quella misurata con il metodo di Archimede da (2).

L'overlap (φ) è un indicatore che permette di comprendere se due scansioni affiancate si sovrappongono, ed è definito come:

$$\varphi = w - h_d \ [\mu m] \tag{5.1}$$

dove w è la larghezza del single scan e h_d l'hatching distance.

Tabella 5.4 Porosità delle piastrine del primo lotto di produzione

Potenza [W]	Velocità di scansione [mm/s]	HD [mm]	VED [J/mm^3]	Overlap [µm]	Porosità (1) [%]	Porosità (2) [%]
160	700	0.08	95.24	51.24	4.03	2.48
160	800	0.08	83.33	51.29	3.02	2.21
160	900	0.08	74.07	51.92	2.68	3.33
160	1000	0.08	66.67	46.98	3.17	1.86
160	700	0.12	63.49	11.24	2.92	1.31
160	800	0.12	55.56	11.29	3.31	1.30
160	900	0.12	49.38	11.92	2.18	1.36
160	1000	0.12	44.44	6.98	7.23	4.19
160	700	0.14	54.42	-8.76	2.49	1.52
160	800	0.14	47.62	-8.71	2.88	1.85
160	900	0.14	42.33	-8.08	4.46	2.07
160	1000	0.14	38.10	-13.02	2.45	2.71
170	700	0.08	101.19	63.37	4.28	2.61
170	800	0.08	88.54	56.15	2.62	2.84
170	900	0.08	78.70	51.36	2.06	3.34
170	1000	0.08	70.83	47.26	2.36	2.95
170	700	0.12	67.46	23.37	0.93	1.01
170	800	0.12	59.03	16.15	0.87	1.33
170	900	0.12	52.47	11.36	0.71	0.73
170	1000	0.12	47.22	7.26	1.00	1.88
170	700	0.14	57.82	3.37	0.89	1.08
170	800	0.14	50.60	-3.85	1.81	0.79
170	900	0.14	44.97	-8.64	1.57	1.59
170	1000	0.14	40.48	-12.74	1.44	1.43
180	700	0.08	107.14	72.63	2.30	1.72
180	800	0.08	93.75	72.94	1.01	1.94
180	900	0.08	83.33	67.14	1.82	2.44
180	1000	0.08	75.00	56.51	1.68	2.09
180	700	0.12	71.43	32.63	2.58	2.37
180	800	0.12	62.50	32.94	1.14	1.08
180	900	0.12	55.56	27.14	0.98	0.54
180	1000	0.12	50.00	16.51	1.68	0.99
180	700	0.14	61.22	12.63	1.62	0.89
180	800	0.14	53.57	12.94	0.69	0.54
180	900	0.14	47.62	7.14	0.68	0.98
180	1000	0.14	42.86	-3.49	1.23	1.10

Osservando i risultati in Tabella 5.4, si nota che i valori di porosità ottenuti con analisi di immagine differiscono da quelli misurati con il metodo di Archimede, tuttavia gli andamenti sono pressoché analoghi. Inoltre, è possibile osservare che, nonostante l'elevata stabilità dei single scan, la classe di potenza 160 W si è rivelata essere quella avente porosità maggiore nella produzione di componenti massivi, con valori (misurati con il metodo di Archimede) sempre superiori a 1.3%, a prescindere dal VED utilizzato in fase di produzione.

In Figura 5.12 viene mostrata la porosità delle piastrine misurata con il metodo di Archimede, riportata in funzione del VED. Da tale immagine si osserva che è possibile distinguere tre regioni:

- $VED < 40\, J/mm^3$
    - In questa regione si osserva che la porosità è molto elevata, probabilmente a causa del basso quantitativo di energia incidente il letto di polvere e di conseguenza dell'incapacità del laser di fondere correttamente le polveri metalliche [15], [40].
- $40\, J/mm^3 < VED < 70\, J/mm^3$
    - Si osserva che tutte le piastrine delle serie 170 W e 180 W prodotte con valori di VED compresi tra questi estremi presentano bassi valori di porosità. Viceversa, la serie 160 W continua ad avere valori di porosità elevati (>1%) anche in questa fascia.
- $VED > 70\, J/mm^3$
    - In questa regione si hanno elevati valori di porosità, sempre superiori a 1.5%. L'elevata porosità riscontrata è probabilmente legata all'eccessivo quantitativo di energia incidente le polveri metalliche, che potrebbe originare degli schizzi di metallo dal bagno fuso. Tale fenomeno viene detto spattering e comporta una riduzione delle polveri disponibili attorno alla scansione con un conseguente aumento di porosità nella parte realizzata [11], [40]. Inoltre, l'elevata energia fornita potrebbe causare l'evaporazione di alcuni elementi, comportando un ulteriore aumento di porosità nel componente [11].

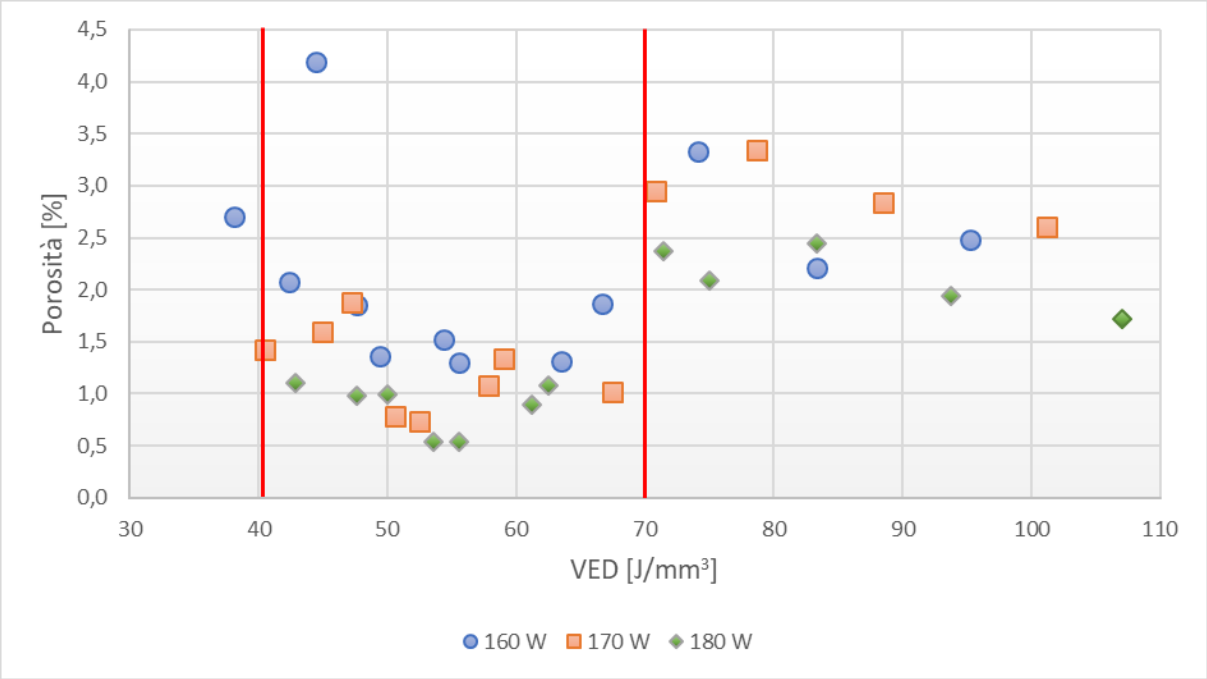

Figura 5.12 Diagramma rappresentativo della porosità in funzione del VED

Nel diagramma in Figura 5.13 si osserva come varia la porosità in funzione dell'overlap tra i single scan. È possibile individuare tre regioni:

- $\varphi < 0\ \mu m$
  - Bassi overlap tra le scansioni, possono comportare la formazione di porosità incolonnate, come mostrato in Figura 5.14. Tali porosità sono dovute alla mancata sovrapposizione di single scan adiacenti che, di conseguenza, non possono essere fusi correttamente e non permettono il conseguimento di elevate densità nel componente realizzato [9], [15].
- $0\ \mu m < \varphi < 30\ \mu m$
  - Utilizzando giusti valori di hatching distance si riesce ad ottenere la corretta fusione dei single scan adiacenti e ciò permette di avere basse porosità residue ed una buona superficie su cui il successivo strato di polvere può essere steso in modo uniforme [9]. Si osserva che tutte le piastrine delle serie 170 W e 180 W prodotte con overlap compreso tra questi estremi presentano bassi valori di porosità. Viceversa, la serie 160 W continua ad avere valori di porosità elevati (>1%) anche in questa regione.

- $\varphi > 30\ \mu m$
    - Si osservano single scan che si sovrappongono in modo eccessivo, per gran parte della larghezza delle scansioni, creando quindi una superficie poco adatta al corretto spargimento della polvere con conseguenti elevate porosità che si formano tra layer successivi. Come suggerito da Nie et al. [9], è possibile che elevati overlap possano comportare un aumento della quantità di energia ricevuta dai single scan, causando la formazione di melt pool di dimensioni eccessive e di conseguenza il fenomeno del balling, che ovviamente compromette il conseguimento di componenti densi. Siccome in questa regione sono presenti tutte le scansioni prodotte con hatching distance pari a 0.08 mm, è possibile concludere che tale valore non permette di ottenere valori di densità accettabili, e può di conseguenza essere escluso dal set di parametri ottimali.

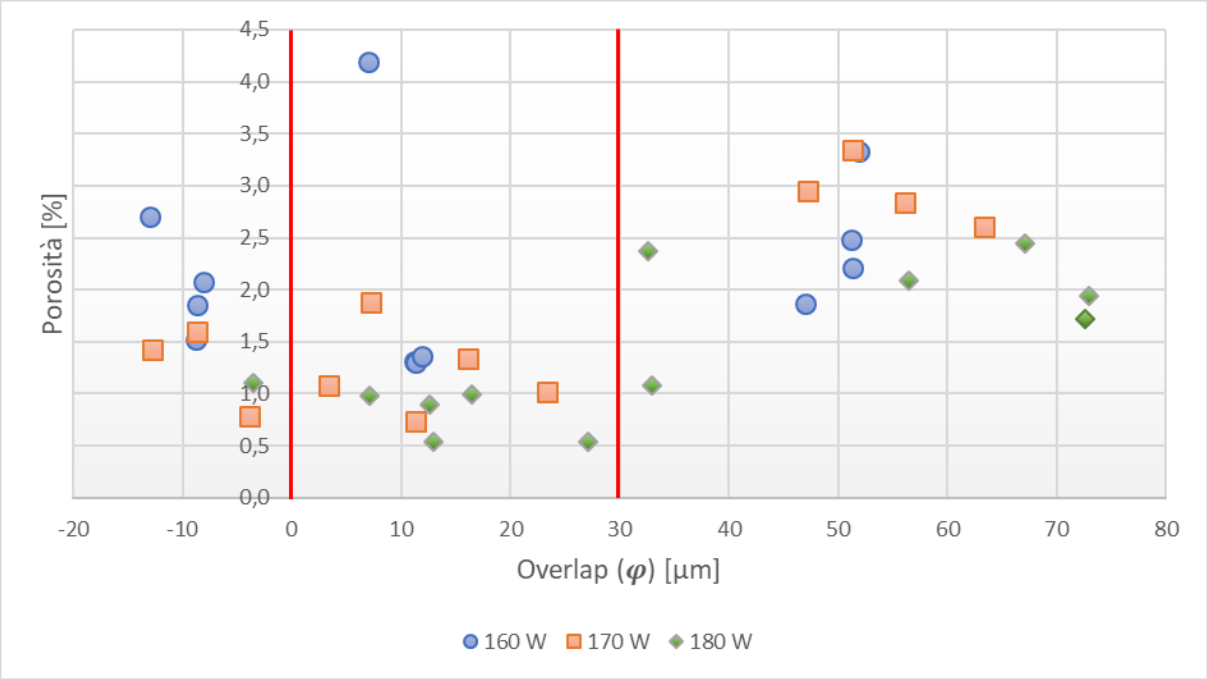

Figura 5.13 Diagramma rappresentativo della porosità in funzione dell'overlap

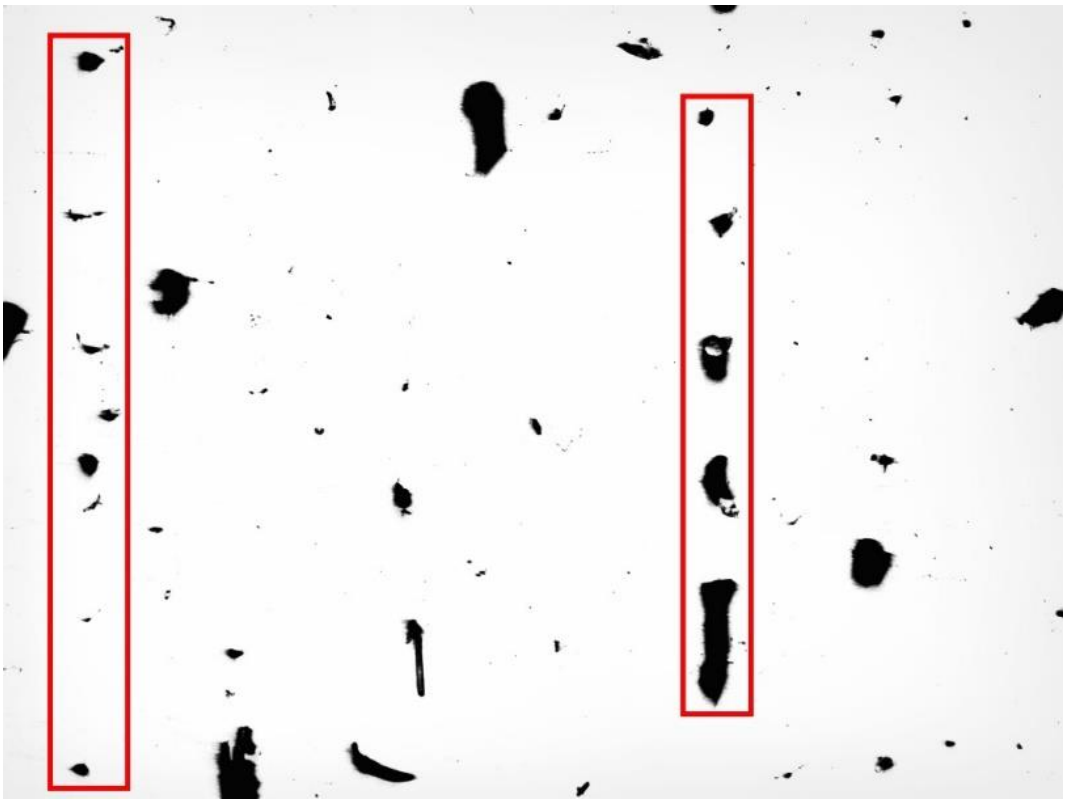

Figura 5.14 Sezione della piastrina 160-1000-0.14 in cui si osservano le porosità incolonnate

Dalle analisi svolte sia mediante analisi di immagine, sia con il metodo di Archimede è possibile concludere che i migliori risultati in termini di densità sono ottenuti lavorando con VED compreso tra 40 e 62.5 J/mm^3 e overlap tra 0 e 30 µm. È pertanto possibile escludere la classe di potenza 160 W e l'hatching distance 0.08 mm dalla finestra di processo, poiché è stato dimostrato che per tali valori non si ottengono componenti della densità desiderata.

5.3.1.1 Analisi ANOVA

Al fine di determinare l'influenza dei parametri di processo sulla porosità del pezzo si è scelto di eseguire un test ANOVA, considerando tre fattori: potenza, velocità e hatching distance. La potenza ha tre livelli: 160 W, 170 W, 180 W, mentre la velocità ne ha quattro: 700 mm/s, 800 mm/s, 900 mm/s, 1000 mm/s, infine, l'hatching distance ha 3 livelli: 0.08 mm, 0.12 mm, 0.14 mm. Di conseguenza sono stati esaminati trentasei possibili trattamenti.

Il test è stato eseguito utilizzando la funzione *anovan* del software Matlab, ottenendo i risultati esposti in Tabella 5.5.

Tabella 5.5 Risultati ANOVA sulle piastrine del primo lotto di produzione analizzate mediante Archimede

Source	SS	Df	MS	F	P-value
Potenza	3.757	2	1.8785	5.2	0.0236
Velocità	1.7503	3	0.58342	1.62	0.2376
HD	8.7616	2	4.38079	12.13	0.0013
Potenza*Velocità	1.7189	6	0.28649	0.79	0.5924
Potenza*HD	2.3425	4	0.58563	1.62	0.2322
Velocità*HD	3.9753	6	0.66256	1.84	0.1746
Error	4.3327	12	0.36106		
Total	26.6384	35			

Si nota che tutte le interazioni Potenza*HD, Potenza*Velocità, Velocità*HD presentano elevati valori di p-value, rispettivamente pari a 0.5924, 0.2322, 0.1746. Pertanto, è possibile concludere che non sembra esserci interazione tra i vari parametri e, di conseguenza, i fattori considerati singolarmente hanno maggiore influenza sul processo.

Il p-value dell'hatching distance è pari a 0.0013 e pertanto è estremamente significativo, indicando un'elevata influenza del fattore sulla densità del componente.

Il p-value osservato per la potenza è pari a 0.0326, indicando che la potenza è altamente significativa nel processo.

Infine, il p-value della velocità è pari a 0.2376, pertanto è possibile affermare che la velocità ha un'influenza decisamente inferiore rispetto agli altri fattori considerati.

5.3.1.2 Modello 3D

Per osservare gli andamenti della porosità all'interno della finestra di processo sono state realizzate mediante Matlab delle mappe 3D, interpolando con delle funzioni polinomiali i risultati ottenuti dall'analisi della porosità mediante Archimede. È stata utilizzata un'approssimazione quadratica sia per la potenza sia per la velocità di scansione. Le funzioni individuate sono date dalle seguenti equazioni:

$$f(x,y) = -187.1 + 2.18x + 0.015y - 0.007x^2 + 0.0001xy - 2.0 \cdot 10^{-5}y^2 \qquad (5.2)$$

$$f(x,y) = 58.33 - 0.84x + 0.04y + 0.004x^2 - 0.0007xy + 4.5 \cdot 10^{-5}\, y^2 \qquad (5.3)$$

$$f(x,y) = 63.24 - 0.75x + 0.01y + 0.002x^2 - 0.0001xy + 7.5 \cdot 10^{-6}y^2 \qquad (5.4)$$

dove:

$x = Potenza\ [W]$

$y = Velocità\ di\ scansione\ [mm/s]$

In Figura 5.15 vengono mostrate le funzioni nello spazio. Sull'asse x si ha la potenza, sull'asse y la velocità di scansione e sull'asse z la porosità misurata con il metodo di Archimede. L'analisi è stata effettuata mantenendo l'hatching distance ad un valore costate per ciascuno dei tre diagrammi mostrati:

- $HD = 0.08\ mm$ in Figura 5.15a;
- $HD = 0.12\ mm$ in Figura 5.15b;
- $HD = 0.14\ mm$ in Figura 5.15c.

In questo modo è stato possibile mettere in evidenza l'effetto dell'hatching distance sul processo analizzato. Infatti, in Figura 5.15 è possibile notare che, pur lavorando con le medesime potenze e velocità di scansione, al variare dell'hatching distance si assiste ad un notevole cambiamento nella forma delle funzioni, dimostrando l'importanza di tale parametro nel processo di DMLS.

I valori del coefficiente di determinazione R^2 ottenuti per hatching distance 0.08, 0.12, 0.14 mm sono stati rispettivamente 0.6938, 0.8821 e 0.9242.

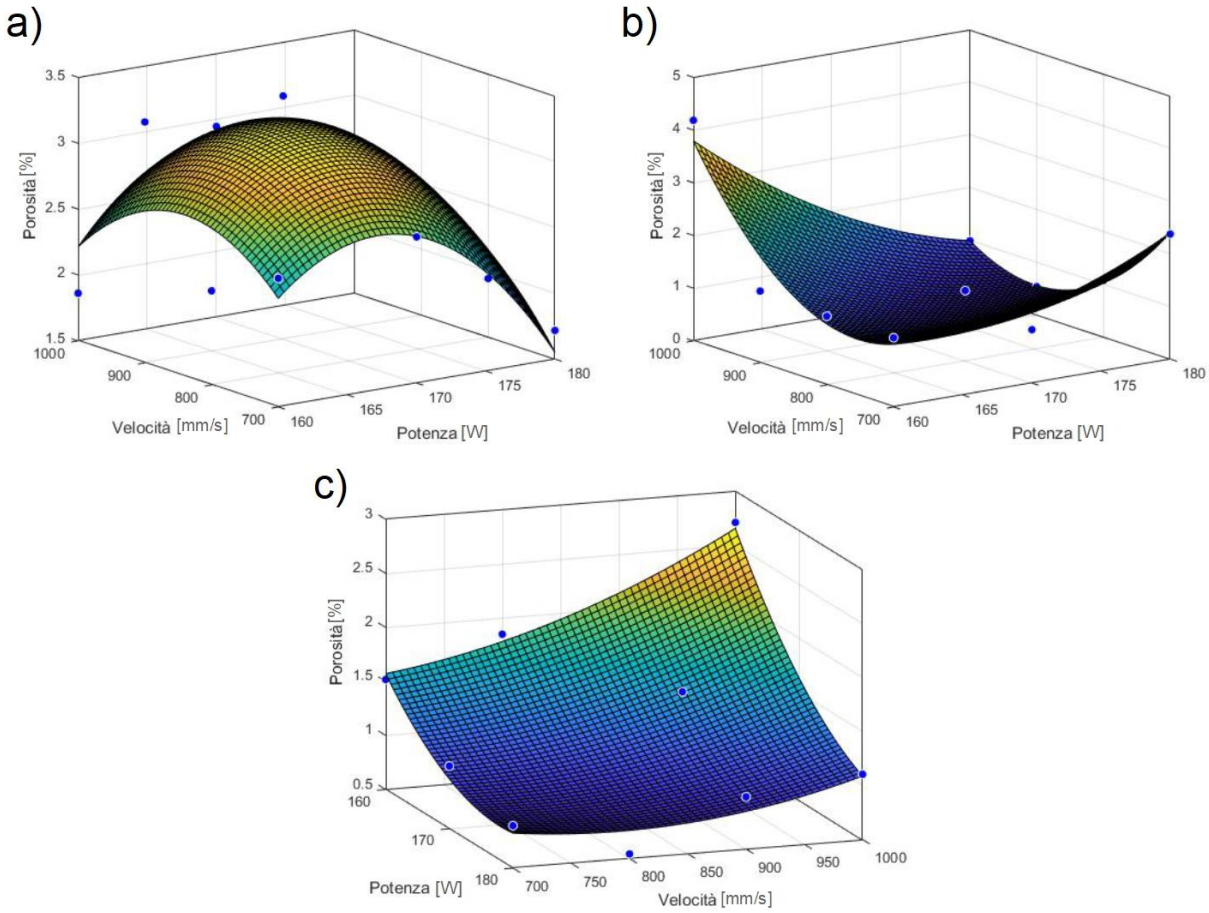

Figura 5.15 Mappa 3D della porosità all'interno della finestra di processo. a) hatching distance 0.08mm; b) hatching distance 0.12mm; c) hatching distance 0.14mm

5.3.2 Secondo lotto di produzione: strategia di scansione ruotata di 67°

Il nuovo lotto di produzione è stato realizzato ruotando la strategia di scansione di 67° tra due layer consecutivi. Tale rotazione è necessaria per avere maggiore isotropia ed evitare che tutte le tensioni residue siano allineate sullo stesso piano.

Dalle analisi effettuate sul primo lotto di produzione, si è scelto di non realizzare piastrine con potenza 160 W e hatching distance 0.08 mm.

Il calcolo della porosità delle piastrine è stato realizzato sia per analisi d'immagine sia con il metodo di Archimede. I risultati ottenuti sono illustrati in Tabella 5.6. Come per il primo lotto di produzione, la porosità misurata per analisi di immagine è indicata da (1), quella misurata con il metodo di Archimede da (2). È possibile notare che i valori di porosità misurati con i due metodi sono pressoché analoghi.

Tabella 5.6 Porosità delle piastrine del secondo lotto di produzione

Potenza [W]	Velocità [mm/s]	HD [mm]	VED [J/mm^3]	Overlap [µm]	Porosità (1) [%]	Porosità (2) [%]
170	700	0.12	67.46	23.37	1.87	1.13
170	800	0.12	59.03	16.15	1.80	1.14
170	900	0.12	52.47	11.36	1.49	1.08
170	1000	0.12	47.22	7.26	1.26	1.00
170	700	0.14	57.82	3.37	1.09	1.17
170	800	0.14	50.60	-3.85	1.16	1.22
170	900	0.14	44.97	-8.64	1.26	1.20
170	1000	0.14	40.48	-12.74	1.04	0.87
180	700	0.12	71.43	32.63	0.84	1.01
180	800	0.12	62.50	32.94	0.87	0.94
180	900	0.12	55.56	27.14	1.38	0.68
180	1000	0.12	50.00	16.51	0.83	0.81
180	700	0.14	61.22	12.63	0.85	0.81
180	800	0.14	53.57	12.94	1.26	1.21
180	900	0.14	47.62	7.14	1.02	1.22
180	1000	0.14	42.86	-3.49	0.97	0.90

In Figura 5.16 viene mostrata la porosità delle piastrine (misurata con il metodo di Archimede), riportata in funzione del VED. Osservando il diagramma è possibile notare che la potenza 180 W è quella che permette il conseguimento dei migliori risultati in termini di densità; viceversa, per potenza 170 W si hanno porosità generalmente superiori a 1%. La fascia di VED ottimale sembra essere quella compresa tra 50 J/mm^3 e 62.5 J/mm^3, in cui per potenza pari a 180 W vi sono valori di porosità inferiori a 0.9%.

Osservando l'andamento della porosità in funzione dell'overlap mostrato in Figura 5.17 è possibile notare che i migliori risultati in termini di densità vengono raggiunti per potenza pari a 180 W e operando con overlap compresi tra 10 µm e 30 µm. Come già accadeva con i campioni del primo lotto di produzione, tale intervallo permette il conseguimento di basse porosità residue e una buona superficie su cui lo strato di polvere successivo può essere steso in modo uniforme [9].

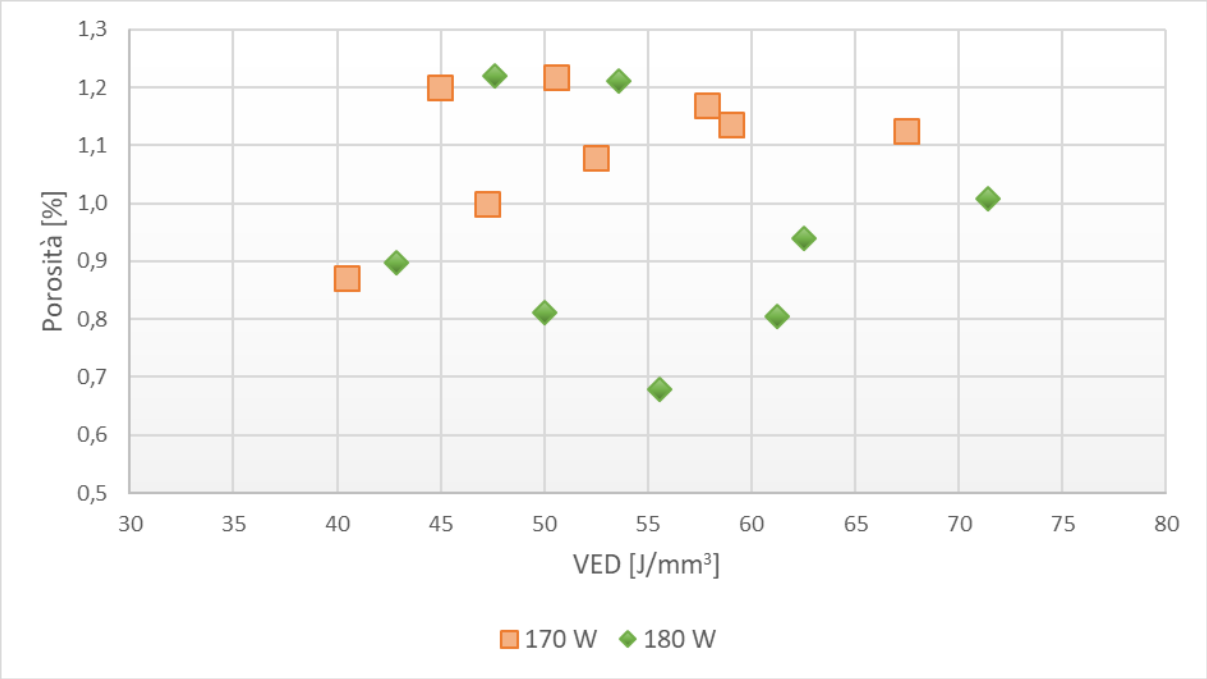

Figura 5.16 Diagramma rappresentativo delle porosità in funzione del VED

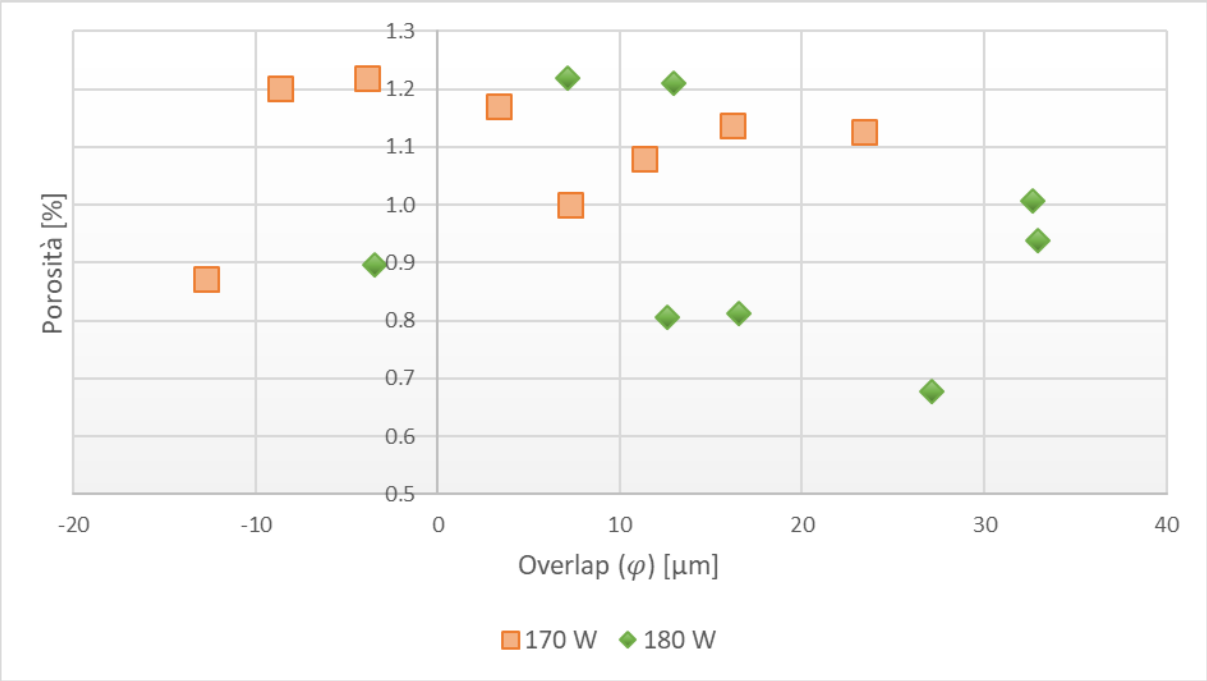

Figura 5.17 Diagramma rappresentativo della porosità in funzione dell'overlap

5.3.2.1 Modello 3D

Per osservare gli andamenti della porosità all'interno della finestra di processo sono state realizzate mediante Matlab delle mappe 3D, seguendo il medesimo procedimento spiegato nel Paragrafo 5.3.1.2. Siccome in questa fase sono stati considerati solamente due livelli di potenza, per approssimare tale parametro è stata utilizzata una funzione lineare anziché quadratica. Le funzioni individuate sono date dalle seguenti equazioni:

$$f(x,y) = 0.3389 + 0.0124x + 0.0042y - 4.1 \cdot 10^{-5}xy + 1.39 \cdot 10^{-6}\, y^2 \qquad (5.5)$$

$$f(x,y) = 10.68 - 0.1094x + 0.0022y + 0.0001xy - 1.38 \cdot 10^{-5}y^2 \qquad (5.6)$$

dove:

$x = Potenza\ [W]$

$y = Velocità\ di\ scansione\ [mm/s]$

In Figura 5.18 vengono mostrate le funzioni nello spazio. L'analisi è stata effettuata mantenendo l'hatching distance ad un valore costate:

- $HD = 0.12\ mm$ in Figura 5.18a;
- $HD = 0.14\ mm$ in Figura 5.18b.

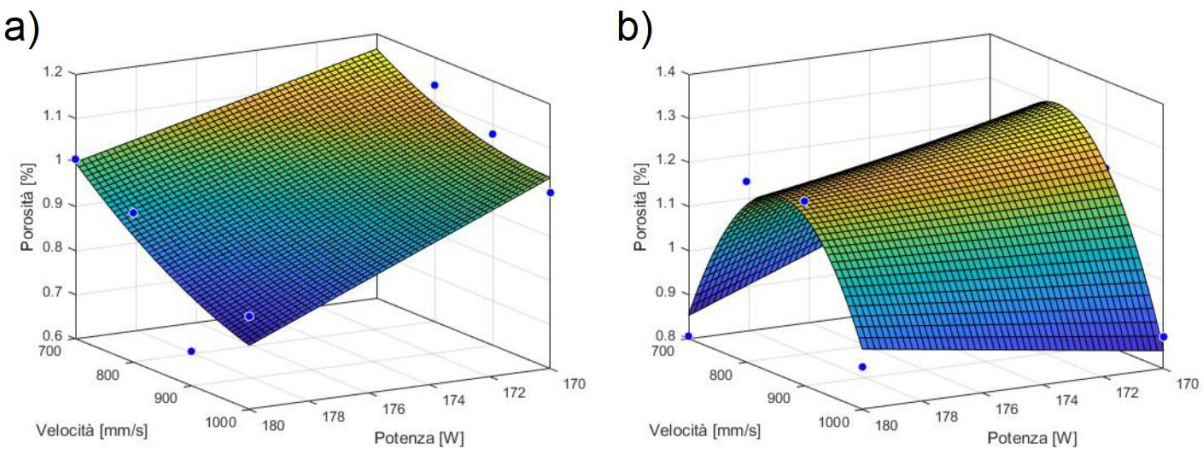

Figura 5.18 Mappa 3D della porosità all'interno della finestra di processo: a) hatching distance 0.12 mm;b) hatching distance 0.14mm

Come prima, è possibile notare l'importanza dell'hatching distance nel processo additivo.

I valori del coefficiente di determinazione R^2 ottenuti per hatching distance 0.12 mm e 0.14 mm sono stati rispettivamente 0.8496 e 0.9198.

Per evidenziare il comportamento della porosità in funzione dei principali parametri di processo, sono state realizzate mediante Matlab delle contour map, interpolando i risultati ottenuti dalle analisi di Archimede. In Figura 5.19a viene mostrata la mappa della porosità in funzione di velocità di scansione e potenza; in Figura 5.19b la porosità viene rapportata a hatching distance e potenza. Le mappe in Figura 5.19 suggeriscono che l'impiego di una potenza più elevata permette il conseguimento di componenti con porosità residua inferiore, confermando quanto osservato precedentemente. In Figura 5.19a è possibile notare che impiegando velocità di scansione pari a 800 mm/s non si raggiungono elevate densità nel componente. Infine, osservando la mappa in Figura 5.19b, è possibile concludere che operare con hatching distance pari a 0.14 mm comporta il conseguimento di componenti non sufficientemente densi.

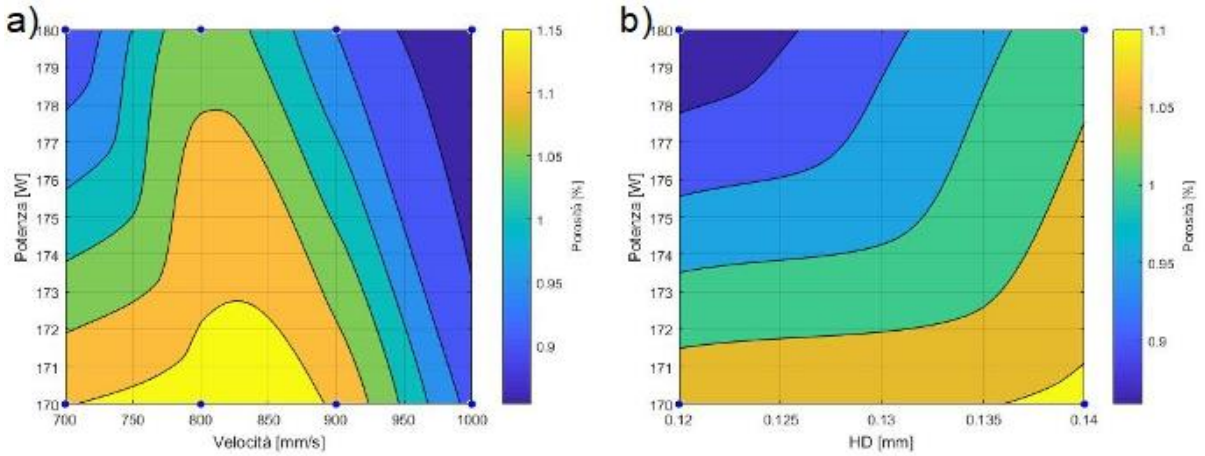

Figura 5.19 Contour map della porosità in funzione di velocità-potenza (a) e di hatching distance-potenza (b)

Dalle analisi effettuate è possibile concludere che i migliori risultati in termini di densità sono stati ottenuti lavorando con VED compreso tra 50 e 62.5 J/mm^3 e overlap tra 10 e 30 µm. È possibile limare ulteriormente la finestra di processo escludendo la classe di potenza 170 W, l'hatching distance 0.14 mm e le velocità di scansione 700 e 800 mm/s. Appare dunque

evidente che l'ulteriore perfezionamento della finestra deve essere cercato intorno alla potenza 180 W, hatching distance 0.12 mm e per velocità di scansione superiori a 900 mm/s.

5.4 Analisi microstrutturale

In Figura 5.20 viene mostrata la micrografia a due diversi ingrandimenti della piastrina del primo lotto di produzione realizzata con 180 W di potenza, 900 mm/s di velocità di scansione ed hatching distance pari a 0.12 mm. Le osservazioni sono state realizzate con il microscopio SEM, lungo la direzione di crescita del campione ad ingrandimenti 1000x (Figura 5.20a) e 3000x (Figura 5.20b).

È possibile notare i singoli melt pool che, sovrapponendosi gli uni agli altri, permettono di avere una buona adesione tra gli strati depositati. Si osservano disomogeneità composizionali: vi sono due zone ad elevata concentrazione di rame (cerchiate in rosso in Figura 5.20a). Gli elevati gradienti termici tipici del processo additivo portano alla formazione di una microstruttura estremamente fine, costituita da dendriti di α-Al primaria ed eutettico ai bordi delle celle, come è possibile osservare in Figura 5.21.

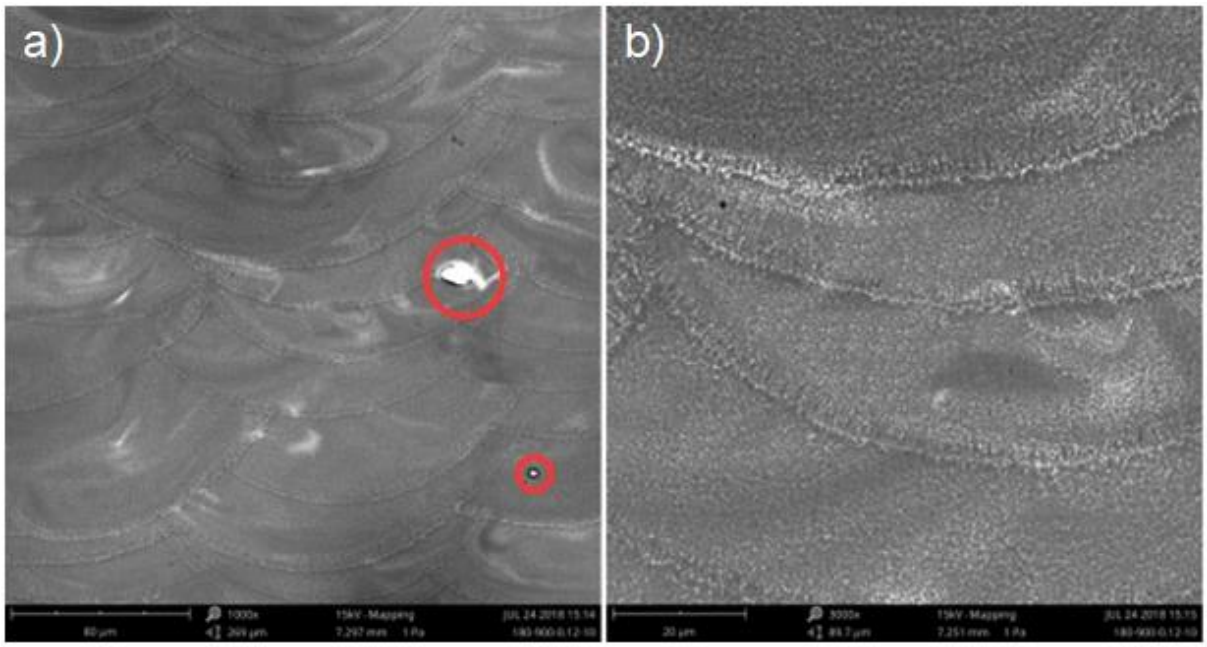

Figura 5.20 Micrografia al microscopio SEM sul campione 180-900-0.12 del primo lotto di produzione con ingrandimento 1000X (a) e 3000X (b)

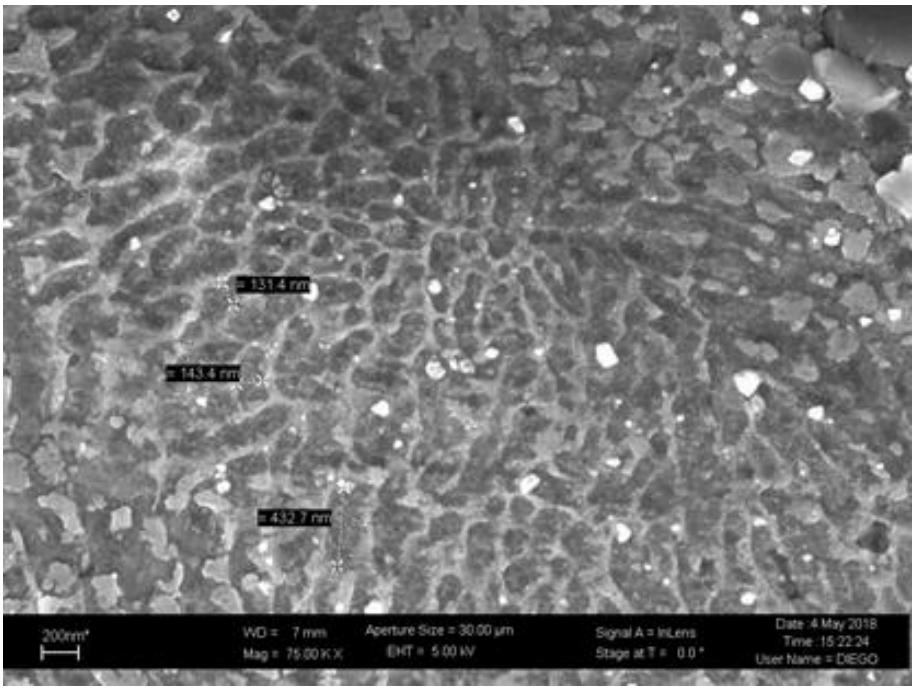

Figura 5.21 Micrografia al microscopio FESEM del melt pool 180-700 con ingrandimento 75000X

5.5 Microdurezza Vickers

Sui campioni con minore porosità del primo lotto di produzione sono state eseguite prove di microdurezza Vickers, i cui risultati sono riportati in Tabella 5.7.

Tabella 5.7 Risultati dell'analisi di microdurezza Vickers

Piastrina	Microdurezza media [HV]	Deviazione standard [HV]
170-900-0.12	148.9	10.3
180-900-0.12	157.0	11.4
180-900-0.14	149.1	8.7

Osservando le microindentazioni al SEM è stato possibile comprendere che la microdurezza varia in funzione del punto della traccia fusa in cui viene effettuata la misurazione. Come si osserva in Figura 5.22, i valori di microdurezza misurati in zone ad elevata presenza di eutettico (particelle più chiare nelle immagini) sono più elevati rispetto a dove è presente prevalentemente la matrice di α-Al, in cui invece si registrano valori simili a quelli tipicamente osservati per la lega AlSi10Mg.

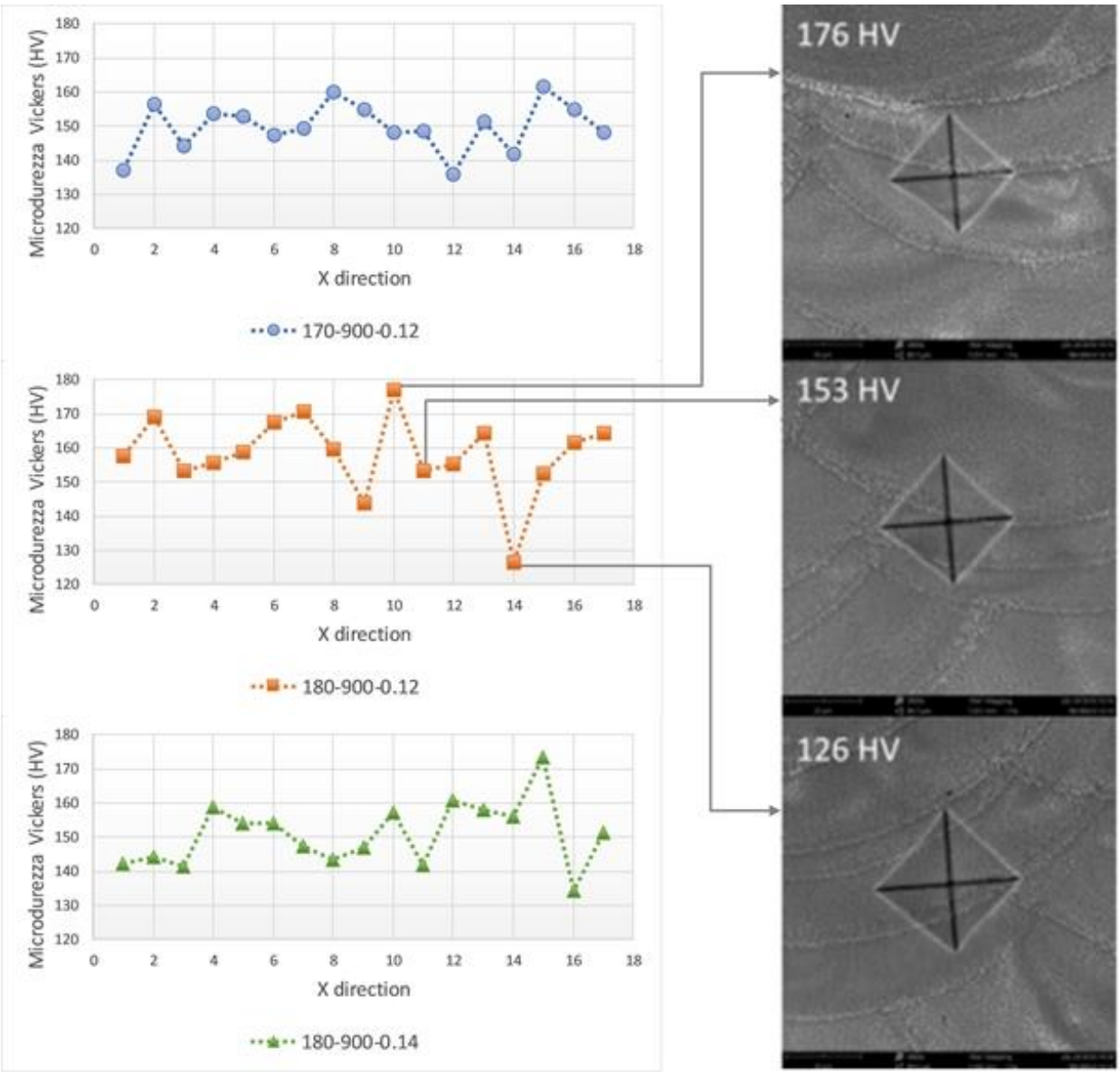

Figura 5.22 Microdurezza Vickers - correlazione con la presenza di eutettico

Pertanto, è possibile concludere che l'aggiunta di Cu nella lega comporta un notevole incremento di microdurezza rispetto all'AlSi10Mg as built, come si osserva nel diagramma in Figura 5.23. Questo incremento di durezza è legato alla formazione di intermetallici all'interno dei campioni che ne migliorano le proprietà meccaniche.

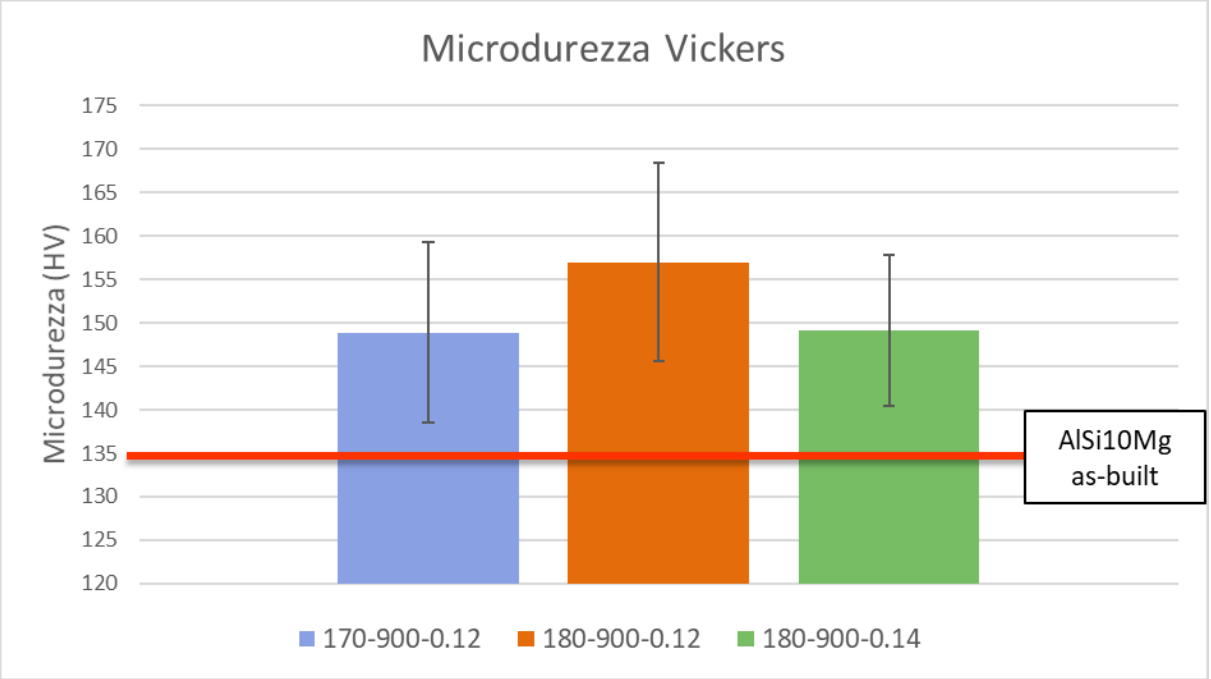

Figura 5.23 Confronto microdurezza AlSi10Mg+4%wtCu e AlSi10Mg as built

6. Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata studiata la processabilità della lega AlSi10Mg+4%Cu, ottimizzandone i parametri di lavorazione per la produzione attraverso tecniche di Laser Powder Bed Fusion. L'effetto dei parametri di processo è stato studiato partendo dai single scan fino alla produzione di componenti massivi. In tal modo è stata ricavata la finestra di processo ottimale della lega.

Le analisi svolte sulla formazione dei single scan al variare di potenza e velocità di scansione hanno permesso di distinguere quattro differenti morfologie della traccia fusa in funzione dei parametri di processo utilizzati. Dall'esame delle scansioni e dei melt pool del primo lotto di produzione si è scelto di affinare la ricerca dei parametri ottimali attorno a 160 e 180 W di potenza del laser e 800 mm/s di velocità di scansione, a causa della buona stabilità delle scansioni con tali parametri. Inoltre, è stato possibile osservare che la larghezza e la profondità dei single scan crescono aumentando la potenza del laser e decrescono all'aumentare della velocità.

Dall'analisi dei single scan realizzati nel secondo lotto di produzione, non è stato possibile eliminare alcun parametro dalla finestra di processo poiché non sono stati osservati difetti tali da compromettere la realizzazione di componenti massivi. Pertanto, è stata validata la scelta dei parametri individuati come ottimali nella prima fase dell'analisi ed è stato possibile osservare che, operando con valori di LED compresi tra 0.16 J/mm e 0.26 J/mm, si ottengono scansioni continue e con superfici regolari.

Dall'analisi ANOVA effettuata, si è visto che la potenza del laser è il fattore più influente nella definizione delle caratteristiche geometriche delle scansioni.

Dai risultati ottenuti da queste analisi iniziali è stata ricavata una prima finestra di processo della lega.

Dall'analisi della porosità delle piastrine realizzate con strategia di scansione mantenuta costante nel passaggio tra i layer, la finestra di processo è stata ulteriormente affinata,

eliminando la classe di potenza 160 W e l'hatching distance 0.08 mm. I migliori risultati in termini di densità del componente sono stati conseguiti operando con VED compreso tra 40-60 J/mm^3 ed overlap tra 0-30 µm.

Effettuando l'analisi ANOVA dei risultati è stato possibile concludere che l'hatching distance e la potenza del laser sono i fattori più influenti nella definizione della porosità delle piastrine.

Basandosi sulla finestra di processo individuata, sono state realizzate le piastrine ruotando di 67° la strategia di scansione tra due layer consecutivi. Dall'analisi della loro porosità si è visto che operando con potenza pari a 180 W sono stati ottenuti i migliori risultati in termini di densità dei componenti massivi. Conseguentemente, è stato possibile eliminare la classe di potenza 170 W dalla finestra di processo. Inoltre, i range di VED e overlap individuati precedentemente sono stati ulteriormente limati rispettivamente a 50-62.5 J/mm^3 e 10-30 µm.

Per affinare ulteriormente la finestra di processo della lega sono state realizzate delle contour map interpolando i risultati sperimentali. Dai risultati così ottenuti è stato possibile escludere l'hatching distance 0.14 mm e le velocità di scansione 700 e 800 mm/s. Pertanto, si è visto che per ottenere componenti densi è conveniente operare con 180 W di potenza, 0.12 mm di hatching distance e velocità di scansione superiore a 900 mm/s. In tal modo è stato possibile ottenere piastrine con una densità relativa pari al 99.32%.

La microstruttura ottenuta è costituita da dendriti di α-Al primaria ed eutettico ai bordi delle celle.

La microdurezza della lega AlSi10Mg+4%Cu ha valor medio pari a 150 HV, più elevato rispetto a quello della lega AlSi10Mg as-built.

È possibile concludere che la produzione e la caratterizzazione dei single scan può essere considerato un metodo veloce ed efficace per la determinazione delle migliori combinazioni di potenza e velocità nello studio di nuove leghe.

7. Bibliografia

[1] S. Lathabai, *Additive Manufacturing of Aluminium-Based Alloys and Composites*. 2018.

[2] I. G. R. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York Heidelberg Dordrecht London, 2015.

[3] L. Iuliano, "Tecniche di Additive Manufacturing per metalli (DMLS)." .

[4] T. Mitev, "Where Is the Missing Matter ? A Comment on ' The Essence ' of Additive Manufacturing," pp. 145–152.

[5] J. O. Milewski, *Springer Series in Materials Science 258 Additive Manufacturing of Metals*. .

[6] I. Yadroitsev and I. Smurov, "Selective laser melting technology : from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape," vol. 5, no. 2, pp. 551–560, 2010.

[7] E. O. Olakanmi, R. F. Cochrane, and K. W. Dalgarno, "Progress in Materials Science A review on selective laser sintering / melting (SLS / SLM) of aluminium alloy powders : Processing , microstructure , and properties," *J. Prog. Mater. Sci.*, vol. 74, pp. 401–477, 2015.

[8] C. J. S. EleftheriosLouvis, PeterFox, "Selective laser melting of aluminium components," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 2, pp. 275–284, 2011.

[9] X. Nie, H. Zhang, H. Zhu, Z. Hu, L. Ke, and X. Zeng, "Analysis of processing parameters and characteristics of selective laser melted high strength Al-Cu-Mg alloys : From single tracks to cubic samples," *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 256, no. August 2017, pp. 69–77, 2018.

[10] C. Y. Wang Di, Yang Yongqiang, Su Xubin, "Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 9–12, pp. 1189–1199, 2012.

[11] A. Aversa *et al.*, "Single scan track analyses on aluminium based powders," *J. Mater.*

Process. Tech., vol. 255, no. November 2017, pp. 17–25, 2018.

[12] I. Yadroitsev *et al.*, “Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks,” 2012.

[13] N. T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, and N. M. Everitt, “On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 230, pp. 88–98, 2016.

[14] I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava, and I. Smurov, “Journal of Materials Processing Technology Single track formation in selective laser melting of metal powders,” vol. 210, pp. 1624–1631, 2010.

[15] W. Pei *et al.*, “Applied Surface Science The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting : single track , densification , microstructure and mechanical behavior,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 408, pp. 38–50, 2017.

[16] L. Iuliano, “Fabbricazione Additiva / Additive Manufacturing.”

[17] L. Iuliano, “Dalla prototipazione rapida alla fabbricazione additiva (FA) Sviluppo dei sistemi e della tecnologia.” .

[18] L. Iuliano, “Tecniche di Additive Manufacturing per metalli (EBM).”

[19] Materialgeeza, “Selective laser melting system schematic,” 2016. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Selective_laser_melting_system_schematic.jpg.

[20] F. I. Azam, A. M. Abdul Rani, K. Altaf, T. V. V. L. N. Rao, and H. A. Zaharin, “An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 328, no. 1, 2018.

[21] L. Iuliano, “Tecniche di Additive Manufacturing per metalli (DED).”

[22] L. Iuliano, “Tecniche di Additive Manufacturing per metalli (EBAM).” .

[23] B. Graf, S. Ammer, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, “Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications,” *Procedia CIRP*, vol. 11, pp. 245–248, 2013.

[24] P. P. Minetola, “Integration of Additive Manufacturing technologies with conventional

processes for the finishing of metal components AM technologies for metal parts."

[25] T. Eli, "EOS Materials Metal," 2016. [Online]. Available: www.eos.info/material-m.

[26] E. Paola, M. In, and M. Issn, "POLITECNICO DI TORINO Repository ISTITUZIONALE," no. January 2019, 2017.

[27] M. V. Mergulhão, C. E. Podestá, and M. D. M. das Neves, "Perspective of Additive Manufacturing Selective Laser Melting in Co-Cr-Mo Alloy in the Consolidation of Dental Prosthesis," *Biomater. Regen. Med.*, 2018.

[28] Renishaw, "Design for metal AM - a beginner's guide," 2017. [Online]. Available: https://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--42652.

[29] M. B. Djurdjević, S. Manasijević, Z. Odanović, and N. Dolić, "Calculation of Liquidus Temperature for Aluminum and Magnesium Alloys Applying Method of Equivalency," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2013, no. September 2014, pp. 1–8, 2013.

[30] P. Wang *et al.*, "Materials Science & Engineering A Microstructure and mechanical properties of a heat-treatable Al-3 . 5Cu- 1 . 5Mg-1Si alloy produced by selective laser melting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 711, no. November 2017, pp. 562–570, 2018.

[31] EOS, "Material data sheet EOS Aluminium AlSi10Mg _ 200C Material data sheet Technical data," 2013. [Online]. Available: https://www.eos.info/material-m.

[32] "Area Web Polito." [Online]. Available: https://areeweb.polito.it/ricerca/carbongroup/fac_fesem.html.

[33] "EOSINT M270." [Online]. Available: https://dmlstechnology.com/dmls-machines.

[34] M. Eosint, "EOSINT M 270." [Online]. Available: https://dmlstechnology.com/images/pdf/EOSINT_M_270.pdf.

[35] I. Yadroitsev, P. Krakhmalev, and I. Yadroitsava, "Hierarchical design principles of selective laser melting for high quality metallic objects," *Addit. Manuf.*, vol. 7, pp. 45–56, 2015.

[36] "Leica Microsystems GmbH." [Online]. Available: https://www.leica-microsystems.com/it/prodotti/microscopi-ottici/dettagli/product/leica-dmi5000-m/.

[37] “SEGA CIRCOLARE / PER METALLI / AD ALTA VELOCITÀ / AUTOMATICA MECATOME T210.” [Online]. Available: http://www.directindustry.it/prod/presi/product-87039-1727194.html.

[38] “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Powder Metallurgy (PM),” pp. 12–17, 2018.

[39] “Clark CM-800 Vickers/Knoop Digital Hardness Tester.” [Online]. Available: https://willrich.com/product/clark-cm-800-vickersknoop-hardness-tester/.

[40] D. Wang *et al.*, “Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties,” *Mater. Des.*, vol. 117, pp. 121–130, 2017.