



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Strutture reticolari prodotte mediante Additive
Manufacturing**

**Lattice structures produced by Additive
Manufacturing**

Relatore:

Prof. Cabibbo Marcello

Candidato:

Sorze Valentina

Correlatore:

Dott. Santoni Alberto

*A mia madre e mio padre,
per essere sempre al mio fianco.*

*A mia sorella e mio fratello,
per l'amore incondizionato che ci sarà sempre.*

Ai miei nonni, alla mia famiglia, agli amici di sempre.

Agli alti e bassi della vita.

Alla forza ed il coraggio di andare avanti.

Sommario

ELENCO FIGURE	4
ELENCO TABELLE	4
INTRODUZIONE	5
Capitolo 1.....	6
1. Additive Manufacturing	6
1.2 Tecniche di fabbricazione	6
1.2.1 Powder bed fusion (PBF)	6
1.2.1.1 Difetti nel processo di PBF	13
1.2.2 Binder Jetting	14
1.2.3 Material Extrusion	15
1.2.4 Directed Energy Deposition (DED)	17
1.3 Laser Polishing	18
Capitolo 2.....	20
2. Procedura sperimentale	20
2.1 Lega di ottone CuZn42	20
2.2 Preparazione dei campioni metallografici.....	23
2.2.1 Inglobatura	23
2.2.2 Lucidatura	24
2.2.3 Osservazione del campione al Microscopio Ottico	26
2.2.4 Caratterizzazione dei vuoti	27
Capitolo 3.....	29
3.RISULTATI E DISCUSSIONE	29
3.1 Inglobatura	29
3.2 Lucidatura.....	31
3.3 Osservazione al Microscopio Ottico.....	32
3.4 Caratterizzazione dei vuoti	33
Capitolo 4.....	44
4. CONCLUSIONI	44
BIBLIOGRAFIA.....	45
RINGRAZIAMENTI	47

ELENCO FIGURE

Figura 1: schema del processo di L-PBF.....	9
Figura 2: schema del processo di Electron Beam Melting.	10
Figura 3: schema del processo di Direct Metal Sintering.....	11
Figura 4: schema del processo di Selective Heat Sintering.	12
Figura 5: processo PBF.....	13
Figura 6: sistema Binder Jetting.....	15
Figura 7: processo estrusione del materiale.	16
Figura 8: sistema DED.	17
Figura 9: diagramma schematico del processo di lucidatura laser.	20
Figura 10: esempio campione lega di ottone.....	21
Figura 11: rappresentazione delle facce laterali del cubo trattate con il processo di laser polishing.	22
Figura 12: macchinario per lucidatura meccanica.	25
Figura 13: lappatrice.	25
Figura 14: microscopio ottico invertito.	27
Figura 15: set up del software ImageJ.	27
Figura 16: esempio di un'immagine dopo le funzioni di "Binary" e "Make Binary" in cui sono noti i vuoti... ..	28
Figura 17: pressa inglobatrice.	30
Figura 18: campione inglobato.	31
Figura 19: immagine del campione osservata al microscopio ottico sul piano XY.....	32
Figura 20: immagine del campione osservata al microscopio ottico sul pino YZ.	32
Figura 21: esempio di quello che si avrà dopo svolto le funzioni sul software.	33

ELENCO TABELLE

Tabella 1: parametri di stampa usati per la produzione dei campioni.	22
Tabella 2: parametri e trattamenti usati.	23
Tabella 3: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e delle percentuali dei vuoti sulla prima immagine XY.	35
Tabella 4: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti sulla seconda immagine XY.	36
Tabella 5: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti sulla terza immagine XY.	37
Tabella 6: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti sulla prima e sulla seconda immagine YZ.	38
Tabella 7: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti della terza immagine YZ.	39
Tabella 8: grafico a barre che mostra l'andamento della media % dei vuoti delle nostre immagini.....	39
Tabella 9: calcolo della media % dei vuoti e della Dev.standard.	40
Tabella 10: classe 1 dei vuoti con aria compresa tra 1 e 20 micron.	40
Tabella 11: classe 2 dei vuoti con area compresa tra 20 e 100 micron e classe 3 dei vuoti con area compresa tra 100 e 200 micron.....	41
Tabella 12: classe 4 dei vuoti con area compresa tra 200 e 1000 micron.	42
Tabella 13: classe 5 dei vuoti con area compresa tra 1000 e 5000 micron e classe 6 dei vuoti con area compresa tra 5000 e 15000 micron.....	43

INTRODUZIONE

La fabbricazione additiva (AM) negli ultimi decenni ha rivoluzionato notevolmente il panorama della produzione e del design, grazie alla sua capacità di produrre componenti con elevata precisione e con una varietà di materiali. Si tratta di una tecnologia innovativa caratterizzata dalla creazione di oggetti tridimensionali attraverso l'aggiunta di strati di materiale. La capacità di produrre componenti rapidi e funzionali ha reso la fabbricazione additiva un alleato importante per le aziende che mirano all'innovazione ed all'adattamento in base alle esigenze del mercato.

Un processo molto importante di questa tecnologia è la "Laser Powder Bed Fusion" (LPBF), una tecnica che si basa sull'utilizzo di un laser per la fusione e la stratificazione delle polveri metalliche. La stampabilità delle leghe di ottone nella LPBF offre vantaggi significativi, richiede però un'attenta considerazione delle proprietà meccaniche e dei parametri di processo, quali la potenza laser, la velocità di scansione, lo spessore dello strato, il tipo di polvere ed altri ancora. Una variazione o una scelta sbagliata dei parametri di processo può portare la formazione di difetti, come vuoti e porosità. A questa tecnica può seguire il Laser Polishing, ossia un processo di finitura superficiale utilizzato per migliorare la qualità superficiale del campione, andando a ridurre rugosità ed imperfezioni.

In questo elaborato prenderemo in considerazione l'analisi metallografica di una lega di ottone, la quale gioca un ruolo cruciale in applicazioni relative al settore elettronico, idraulico, meccanico, aerospaziale e dell'automotive. Si tratta di una lega che conferisce duttilità, una buona lavorabilità, una buona finitura superficiale e una riduzione dell'usura.

Inoltre, metteremo in evidenza i vari step dell'analisi metallografica e la loro importanza per comprendere le proprietà microstrutturali della lega, valutando come queste proprietà influenzano le prestazioni del materiale; arriveremo a fare una distinzione in classi dei vuoti dividendoli in base alle aree in modo da studiarne, in maniera più accurata, la media e la deviazione standard.

Ecco come sarà organizzato il seguente elaborato:

- Nel primo capitolo tratteremo l'Additive Manufacturing nella sua generalità, esponendo le varie tecniche principali.

- Nel secondo capitolo svilupperemo uno studio sulla lega di ottone e sulla procedura sperimentale da eseguire, quindi l'analisi metallografica del campione.
- Nel terzo capitolo elaboreremo una discussione dei risultati ottenuti.
- Infine, nel quarto capitolo riporteremo le conclusioni del nostro elaborato.

Capitolo 1

1. Additive Manufacturing

La produzione additiva (AM) è conosciuta anche come stampa 3D, si tratta di una tecnologia innovativa considerata parte della quarta rivoluzione industriale. Si parla di un processo che consiste nell'aggiunta progressiva di materiale, consente infatti di unire materiali mediante deposizione ripetuta di strati partendo da polvere metallica.

Il processo inizia con la creazione di un modello digitale 3D dell'oggetto da produrre utilizzando software di progettazione assistita da computer (CAD) o mediante scansione 3D di un oggetto esistente; il modello viene poi suddiviso in sottili strati ed ogni strato è creato sequenzialmente depositando o solidificando materiale; può includere plastica, metalli, ceramiche o materiali compositi a seconda della tecnologia specifica utilizzata.

Questo metodo consente la realizzazione di geometrie complesse dei vari componenti del metallo, inoltre è un metodo che presenta numerosi vantaggi, tra cui libertà di design, prototipazione rapida e, anche, riduzione di scarti di materiale [1].

1.2 Tecniche di fabbricazione

Per quanto riguarda lo sviluppo di componenti metallici, dalle norme ASTM F42 ed ISO TC261, le tecniche considerate sono quattro: Powder Bed Fusion, Binder Jetting, Material Extrusion e Directed Energy Deposition.

1.2.1 Powder bed fusion (PBF)

La tecnologia Powder Bed Fusion è una delle tecniche di fabbricazione additiva più utilizzate, soprattutto per la produzione di parti metalliche complesse e di alta qualità. Questa tecnica coinvolge diversi processi, tra cui la Laser Powder Bed Fusion (L-PBF),

la Electron Beam Melting (EBM), la Direct Metal Laser Sintering (DMLS) e la Selective Heat Sintering (SHS), che si basano tutte sullo stesso principio di base.

- Laser Powder Bed Fusion: nota anche come Selective Laser Melting è una tecnica di fabbricazione additiva utilizzata per creare parti tridimensionali partendo da polveri metalliche. È un processo essenziale per comprendere la relazione tra i parametri operativi e le proprietà del pezzo finale. Nella L-PBF si usa un sottile strato di polvere metallica che viene uniformemente distribuito su un piano di lavoro all'interno di una camera di fabbricazione, alcune regioni predeterminate sono esposte a energia laser ad alta intensità, in questo modo le polveri possono essere fuse strato per strato in conformità con il disegno preparato nel software CAD. Successivamente, un raggio laser o un fascio elettronico viene utilizzato per fondere selettivamente il materiale in polvere secondo il modello 3D della parte da produrre. Il movimento e la messa a fuoco del fascio laser ad alta intensità sono monitorati da un sistema di deflessione del fascio che comprende specchi Galvano e lenti di messa a fuoco a campo piatto. Si forma un letto di polvere facendo rotolare la polvere metallica dal letto di alimentazione del metallo sulla piattaforma di stampa creando strati di polvere compattate tra 20 e 60 μm . Per poter avviare il processo di stampa, la stampante 3D riempie la camera con un gas riscaldandola alla temperatura di stampa ottimale, in modo da ridurre al minimo l'ossidazione superficiale; in seguito, un sottile strato di polvere viene applicato sul piatto in base allo spessore dello strato precedentemente definito dal software. Il laser effettua la scansione della sezione trasversale del pezzo, fondendo tra loro le particelle di metallo. Una volta completato lo strato, il piatto si sposta in basso consentendo l'aggiunta di un ulteriore strato di polvere. Il processo viene ripetuto fino all'ottenimento del pezzo finale. Dopo aver fatto ciò bisogna far raffreddare la stampante 3D e rimuovere la polvere non fusa in modo da vedere il pezzo stampato. I pezzi possono essere trattati a caldo per ridurre lo stress residuo e migliorare le proprietà meccaniche. Un'ulteriore post-elaborazione può implicare fasi di lavorazione a macchina CNC e processi di lucidatura in modo da avere maggiore qualità della superficie [1] [2]. L'obiettivo principale di questo metodo è quello di fabbricare parti completamente dense. Tra tutti i metodi AM che creano metalli, questo è quello che ha il tasso di costruzione più lento, nonostante le camere di alimentazione siano intercambiabili, la gestione della polvere di controllo a circuito chiuso, la setacciatura automatizzata delle polveri e la stampa simultanea multistrato. Per accelerare la procedura ci sono nuovi miglioramenti riguardanti il trasferimento del tempo e l'utilizzo di laser veloci. Un ulteriore progresso vede l'utilizzo di laser di diametro inferiore, un

flusso uniforme di gas inerte, sistemi di posizionamento precisi, sistemi e sensori ad alto vuoto e un nuovo design per fornire un flusso di gas inerte uniforme e costante, che si traduce in una maggiore stabilità di fusione. Inoltre, il flusso costante di gas riduce le variazioni dimensionali, in questo modo si ottengono prodotti con tolleranze più strette. In questo processo è molto importante la scelta dei parametri di processo, questi infatti consentono la fusione completa della polvere e la completa fusione con lo stato precedente; una selezione inappropriata di questi parametri può portare effetti indesiderati come crepe termiche, balling e porosità. I parametri considerati sono: potenza laser (10W-110W), frequenza dell'impulso (20-30μm), velocità di scansione (100-600mm/s), le dimensioni delle particelle (15-50μm), la forma delle particelle, la granulometria, lo spessore dello strato (20-100μm), la densità del letto di polvere, le proprietà meccaniche del materiale, la temperatura del letto di polvere e la temperatura dell'alimentazione di polvere. La LPBF impiega polveri di metallo per creare parti più o meno complesse. Metalli e leghe come acciaio inossidabile, cromo cobalto, alluminio, titanio e inconel sono i materiali utilizzati più spesso. Alcuni metalli preziosi (oro, platino, argento) sono talvolta utilizzati, ma quasi esclusivamente nel settore della gioielleria. I settori aerospaziale, automobilistico e medico (soprattutto dentale) traggono un gran vantaggio da questa tecnologia, in quanto offre una complessità geometrica impossibile da ottenere utilizzando metodi di manifattura convenzionali riducendo il peso finale e il numero di componenti da assemblare utilizzando tecniche come l'ottimizzazione topologica [2] [3].

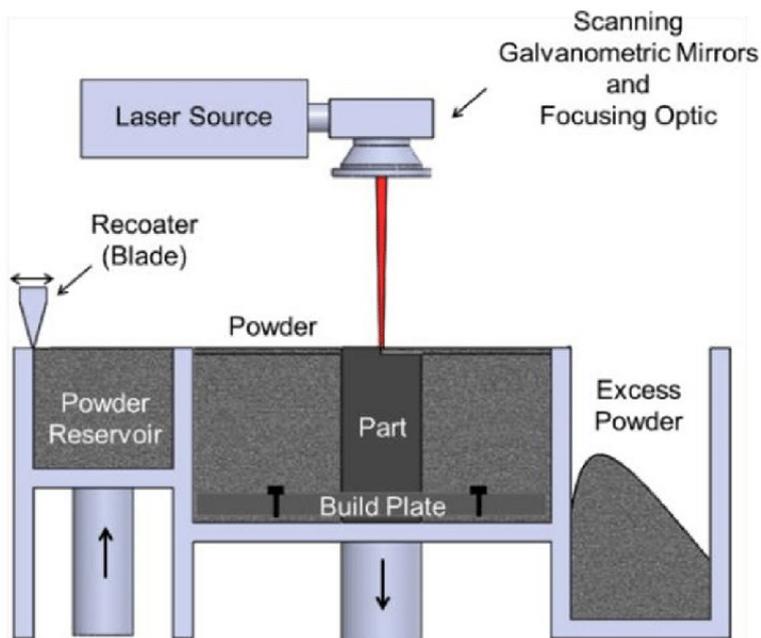


Figura 1: schema del processo di L-PBF.

- **Electron Beam Melting:** questa tecnica utilizza un fascio di elettroni, prodotto da un cannone elettronico, per fondere le particelle di metallo e creare, strato dopo strato, il pezzo desiderato. Il cannone elettronico estrae gli elettroni da un filamento di tungsteno sottovuoto e li proietta in maniera accelerata sullo strato di polvere metallica depositata sul piatto di stampa della stampante 3D. Questi elettroni saranno in grado di fondere selettivamente la polvere producendo così il pezzo. Al termine del processo di produzione gran parte della polvere fusa può essere riutilizzata quasi direttamente. Poiché il processo si basa sul principio delle cariche elettriche, i materiali impiegati devono essere conduttivi. In caso contrario, non ci sarà alcuna interazione tra il fascio di elettroni e la polvere [4].

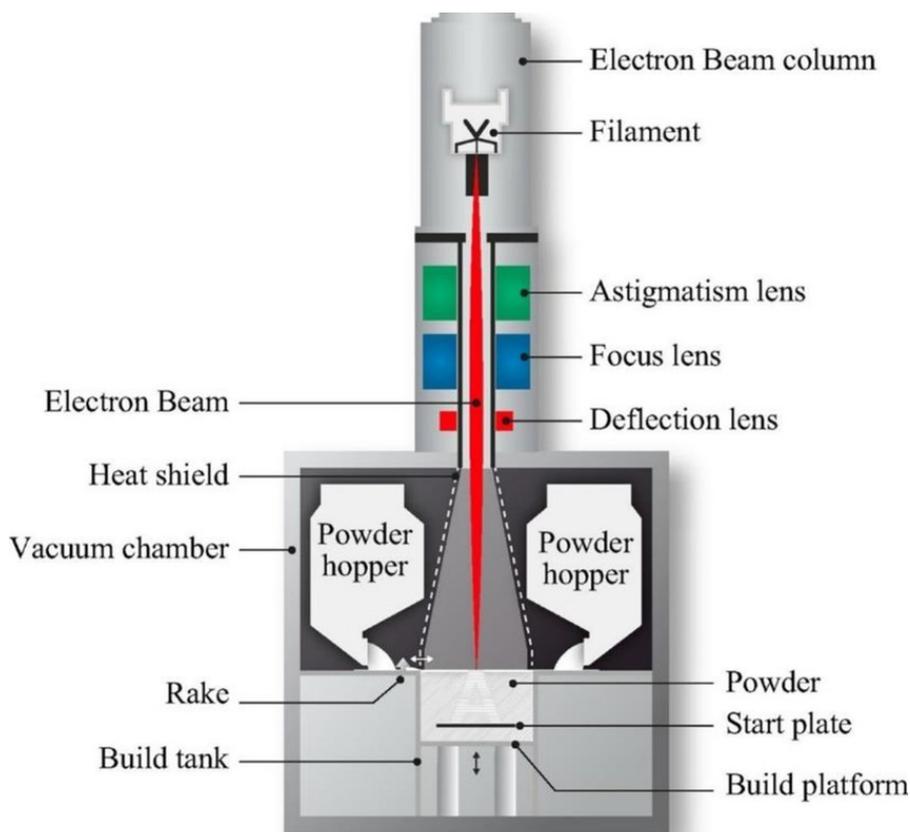


Figura 2: schema del processo di Electron Beam Melting.

- Direct Metal Laser Sintering: si tratta di una tecnologia nota come “utensile diretto” in quanto implementa nella lavorazione attraverso utensili duri diretti. In questo processo il metallo in polvere, privo di leganti o agenti fondenti, viene sinterizzato mediante la scansione di un raggio laser ad alta potenza a strati di 20 o 40 μm , con l’opzione di bronzo, acciaio, titanio. Successivamente, il braccio di riverniciatura passa un nuovo strato di polvere, consentendo di sinterizzare un nuovo strato su quello già costruito. I pezzi sono prodotti con una densità pari a circa il 95% per cui, i pezzi finali non richiedono alcuna successiva sinterizzazione. Sebbene gli strati siano sinterizzati, sono necessarie strutture di supporto. Le parti possono richiedere una varietà di post-processi, tra cui il trattamento termico, la rimozione del supporto, la pallinatura e altro ancora. Questa tecnica è in grado di produrre caratteristiche fini e pareti sottili, con buona precisione, risoluzione e buone proprietà meccaniche delle parti finite [5].

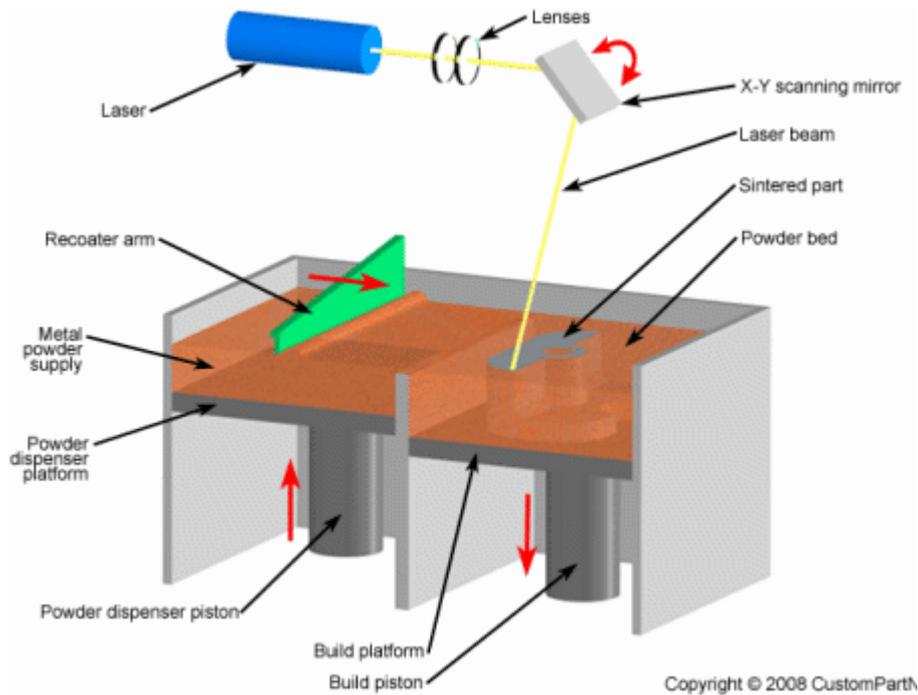


Figura 3: schema del processo di Direct Metal Sintering.

- **Selective Heat Sintering:** in questo processo si usa una testina di stampa termica per poter sinterizzare la polvere termoplastica. Inizialmente la stampante stende un sottile strato di polvere termoplastica nella sua camera di stampa, dove la polvere è mantenuta ad una temperatura leggermente elevata. Successivamente la testina di stampa termica inizia a muoversi avanti e indietro attraverso la camera di stampa, in questo modo fonde le sezioni trasversali della polvere in uno strato di plastica solida. Una volta completato il livello, la stampante ripete questo processo in modo da costruire un oggetto 3D strato per strato. Il modello finito può essere estratto a mano dalla camera di stampa e la polvere termoplastica inutilizzata, se presente, può essere riutilizzata. Tra i vantaggi più grandi, soprattutto per ingegneri e progettisti, è che questo tipo di processo costruisce un oggetto senza necessitare di strutture di supporto, questo permette di poter stampare parti e modelli in quasi tutte le forme di nostro piacimento. Inoltre, la polvere termoplastica utilizzata, quando viene stampata, è molto simile al nylon per cui le parti sono durevoli e robuste [6].

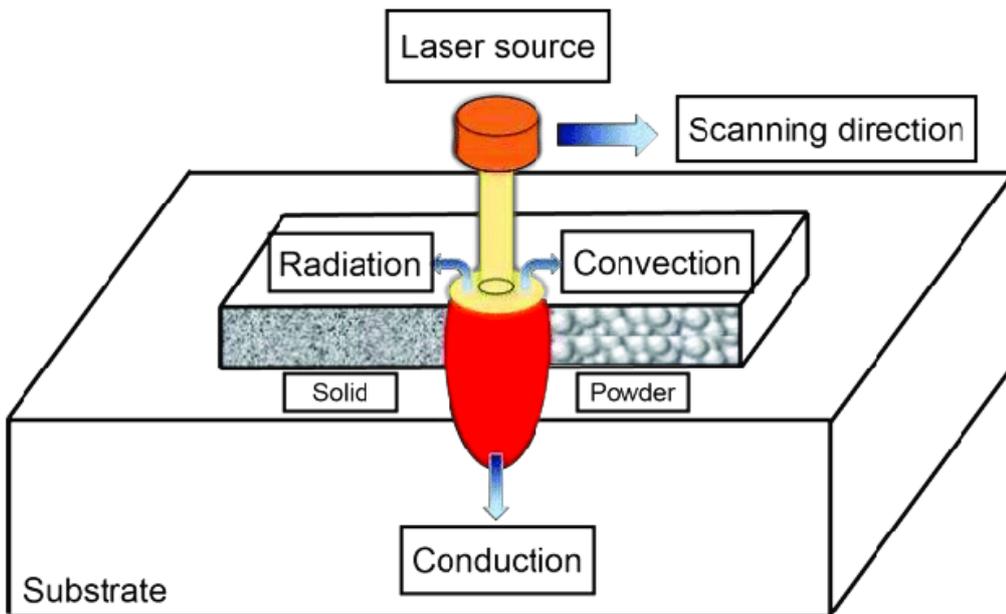


Figura 4: schema del processo di Selective Heat Sintering.

I componenti di base di un sistema PBF contengono: una camera chiusa con una fonte di calore, scanner, letto di polvere, letto di alimentazione metallico, braccio di rivestimento ed una fornitura di gas inerte.

La tecnologia Power Bed Fusion offre diversi vantaggi, tra cui la possibilità di produrre parti con geometrie complesse, una buona densità e integrità strutturale, nonché la capacità di lavorare con una vasta gamma di materiali metallici, inclusi acciaio, alluminio, titanio e leghe speciali. Tuttavia, è importante notare che la PBF richiede un ambiente controllato e accurati parametri di processo per ottenere risultati ottimali, e il post-trattamento delle parti fabbricate può essere necessario per raggiungere le specifiche richieste.

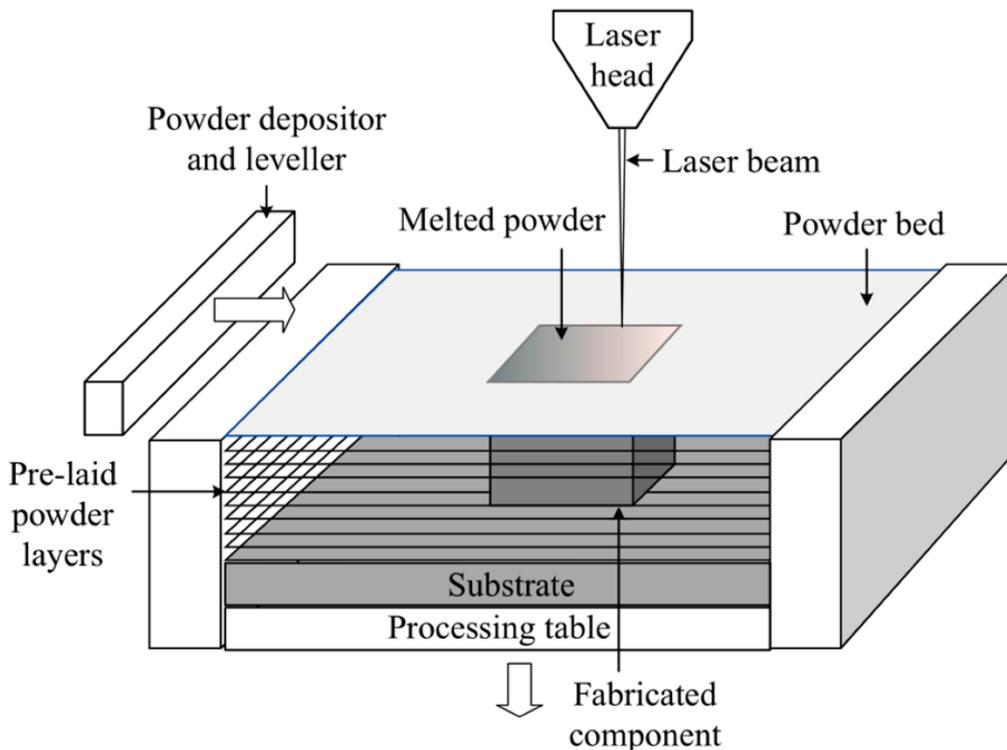


Figura 5: processo PBF.

1.2.1.1 Difetti nel processo di PBF

Il processo di Powder Bed Fusion può presentare difetti, i quali influenzano le proprietà e la qualità dei pezzi stampati. Alcuni dei difetti più comuni sono:

- **Porosità:** sono piccole cavità (o bolle d'aria) presenti all'interno del materiale, derivano principalmente da una scorretta fusione della polvere o da un'eccessiva evaporazione dei leganti.
- **Ritiro:** si verifica durante il raffreddamento, quando il materiale può contrarsi e causare deformazioni o tensioni interne.
- **Fessurazioni termiche:** sono generate dalle variazioni di temperatura durante il processo di stampa.
- **Difetti di adesione tra strati:** una scorretta adesione tra strati successivi può compromettere la resistenza meccanica del pezzo, in questo modo si ha riduzione della qualità finale.
- **Deformazioni:** si verificano specialmente a seguito di variazioni nella temperatura di fusione e raffreddamento.
- **Problemi di granulometria:** la dimensione e la distribuzione della polvere influisce la qualità della fusione.
- **Contaminazione della polvere:** le impurità possono influenzare negativamente le proprietà del materiale.

- Problemi di sinterizzazione: si possono verificare difetti come la porosità o una bassa densità del materiale.
- Difetti di superficie: si possono avere rugosità o striature, dovute da un controllo non ottimale dei parametri di processo.
- Problemi di supporto e overhang: si possono avere problemi di deformazione o crolli di strutture sospese.

Considerando nello specifico uno di questi difetti come ad esempio la porosità, essa è definita come il rapporto tra il volume dei vuoti ed il volume totale del materiale considerato. La durabilità dei materiali e la resistenza meccanica dipendono dalla porosità, in quanto essa influenza le velocità delle onde sismiche che attraversano il materiale. La porosità può essere intergranulare (nei materiali policristallini) o intercristallina (nei materiali monocristallini) [7]. La porosità da ritiro del materiale fuso si verifica principalmente durante la fase di solidificazione, in cui il materiale tende a ritirarsi dal momento che la densità allo stato solido è leggermente maggiore di quella che si riscontra allo stato liquido. Si tratta di un difetto che, nella maggior parte dei casi, è minimo e impercettibile alla vista ma non al microscopio. È un difetto che può essere corretto utilizzando un fascio di luce laser, questo permette di andare ad agire sulla porzione di superficie in cui si riscontra la difettosità [8]. Una conseguenza della porosità è la formazione dei cosiddetti “vuoti”, ossia spazi o cavità all’interno del materiale che possono essere riempiti da aria, acqua o altri fluidi.

1.2.2 Binder Jetting

Si tratta di una tecnologia di stampa 3D che consiste nello spruzzare un legante liquido su un letto di polveri generando poi una solidificazione trasversale del pezzo.

Il primo passo è quello di progettare l’oggetto nel software CAD, questo avviene prima di tagliarlo ed inviarlo alla stampante 3D binder jetting. Questo tipo di stampante è composta da due serbatoi ed un piatto di stampa, inizialmente uno dei serbatoi è vuoto mentre il secondo contiene il materiale di stampa in polvere. È presente un rullo livellante che distribuisce un primo strato di polvere sul piatto, mentre la testina di stampa spruzza l’agente legante sotto forma di goccioline di 80µm; come conseguenza a ciò si ha l’assemblamento della polvere portando alla formazione del pezzo, strato per strato.

Questa tecnologia permette di stampare a colori; nel caso della ceramica, per esempio, il colore è aggiunto contemporaneamente al legante.

Una volta completata la stampa è necessario polimerizzare i pezzi in modo da aumentarne la resistenza e ravvivare i colori. Inoltre, in caso di Binder Jetting di metallo i pezzi devono essere sinterizzati con un metallo dalla bassa temperatura di fusione, ad esempio il bronzo; in caso, invece, di pezzi in ceramica colorata è necessario coprirli aggiungendo acrilico in modo da migliorarne la resistenza meccanica [9].

Uno svantaggio di questo processo è la bassa densità che il sistema è in grado di ottenere, in alcuni casi solo il 50-60%.

La dimensione delle particelle è fondamentale per garantire una qualità ottimale; infatti, le particelle di grandi dimensioni sono essenziali per lo spargimento della polvere mentre le particelle fini sono critiche per la sinterizzabilità, la risoluzione e la qualità della superficie.

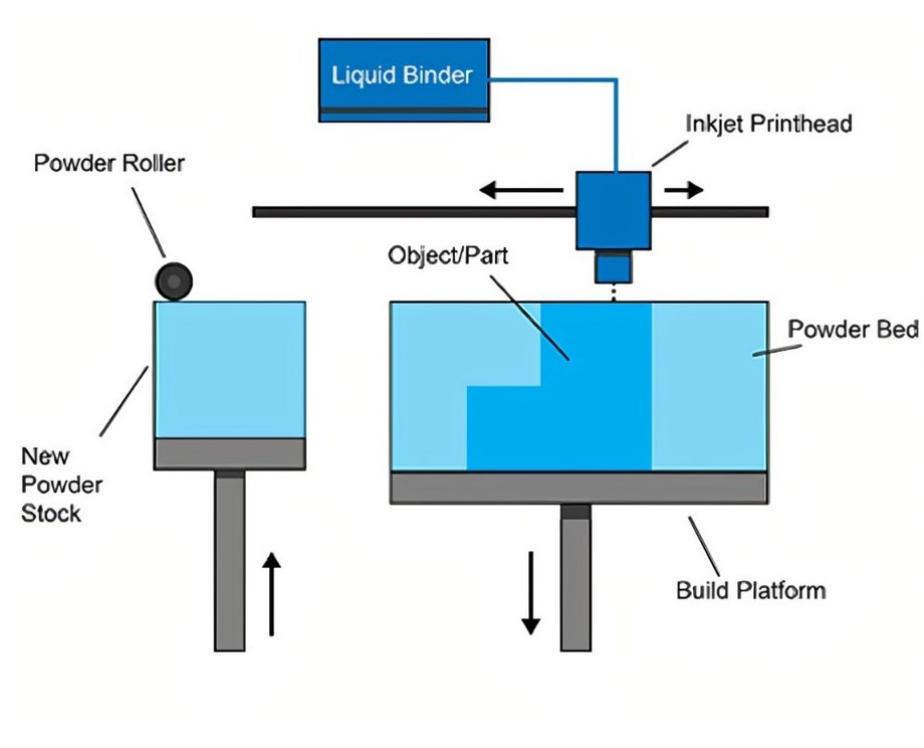


Figura 6: sistema Binder Jetting

1.2.3 Material Extrusion

L'estrusione di materiale è una tecnica di produzione additiva che utilizza filamenti continui di materiale termoplastico o composito per costruire parti 3D. Il filamento di plastica viene alimentato attraverso un ugello di estrusione, che riscalda il materiale allo stato fuso e poi lo deposita strato dopo strato sulla piattaforma di costruzione per creare una parte 3D.

Le stampanti per questo tipo di processo hanno in genere una piattaforma di stampa ed un portale della testa dell'ugello di stampa sviluppato su tre assi; il portale si muove in X e Y mentre la piattaforma si muove sull'asse Z.

Il filamento viene alimentato da una bobina attraverso una testa di estrusione riscaldata in movimento, il materiale fuso viene spinto fuori dall'ugello dell'estrusore e depositato su una piattaforma di stampa 3D, riscaldata per una maggiore adesione. Una volta completato il primo strato, la fase successiva consiste nell'allontanarsi dall'estrusore e dalla piattaforma, per poi depositare direttamente il secondo strato sul pezzo in crescita.

Sebbene una varietà di materiali possa essere utilizzata nell'estrusione di materiali, i termoplastici come l'acrilonitrile butadiene stirene (ABS), le poliammidi alifatiche (PA, noto anche come nylon), il polistirene ad alto impatto (HIPS), l'acido polilattico (PLA) e il poliuretano termoplastico sono i più popolari.

Tra i vantaggi di questo processo abbiamo: ampia scelta di materiale di stampa, metodo semplice ed intuitivo, bassi costi iniziali e di esercizio e tempi di stampa rapidi.

Per quanto riguarda gli svantaggi invece abbiamo: materiali di stampa tossici, scarsa resistenza delle parti lungo l'asse Z, risoluzione più fine e la testa di estrusione che deve continuare a muoversi per evitare l'urto del materiale verso l'alto [10] [11].

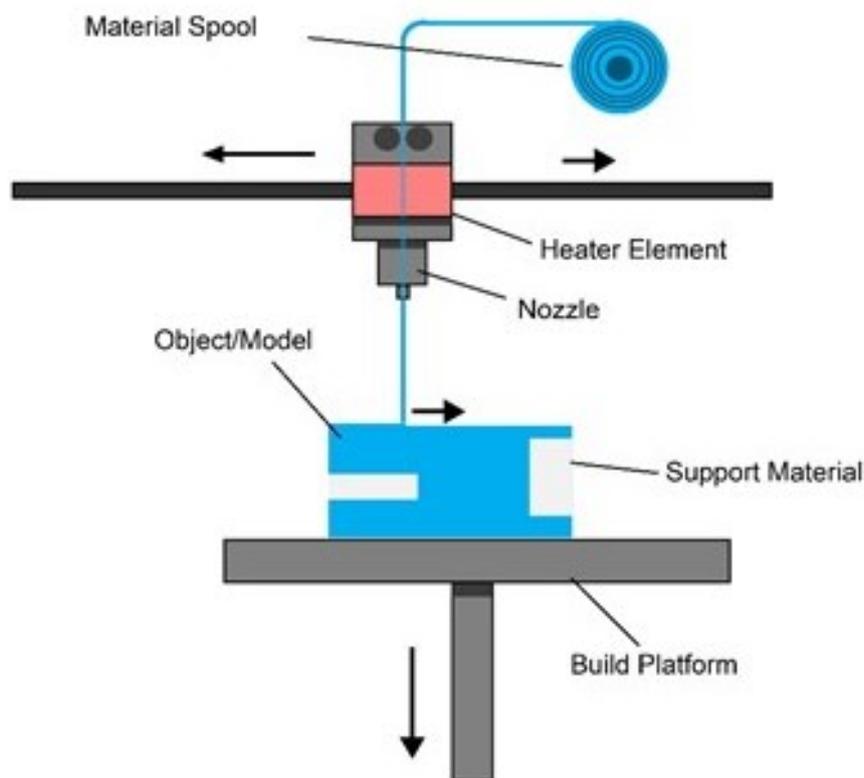


Figura 7: processo estrusione del materiale.

1.2.4 Directed Energy Deposition (DED)

Questo tipo di processo riesce ad aggiungere contemporaneamente materiale insieme all'apporto di calore, quest'ultimo può essere un laser, un fascio di elettroni o un arco al plasma. La materia prima è polvere metallica o un filo; le polveri, però, comportano un'efficienza di deposizione inferiore rispetto ai fili metallici, questo perché solo una parte della polvere totale verrebbe fusa e legata al substrato. Il materiale è depositato selettivamente solo dove è necessario, si distingue infatti dai processi a letto di polvere in cui si ha sempre eccesso di materiale.

In questo tipo di sistema è necessario il vuoto in modo da evitare problemi di ossidazione.

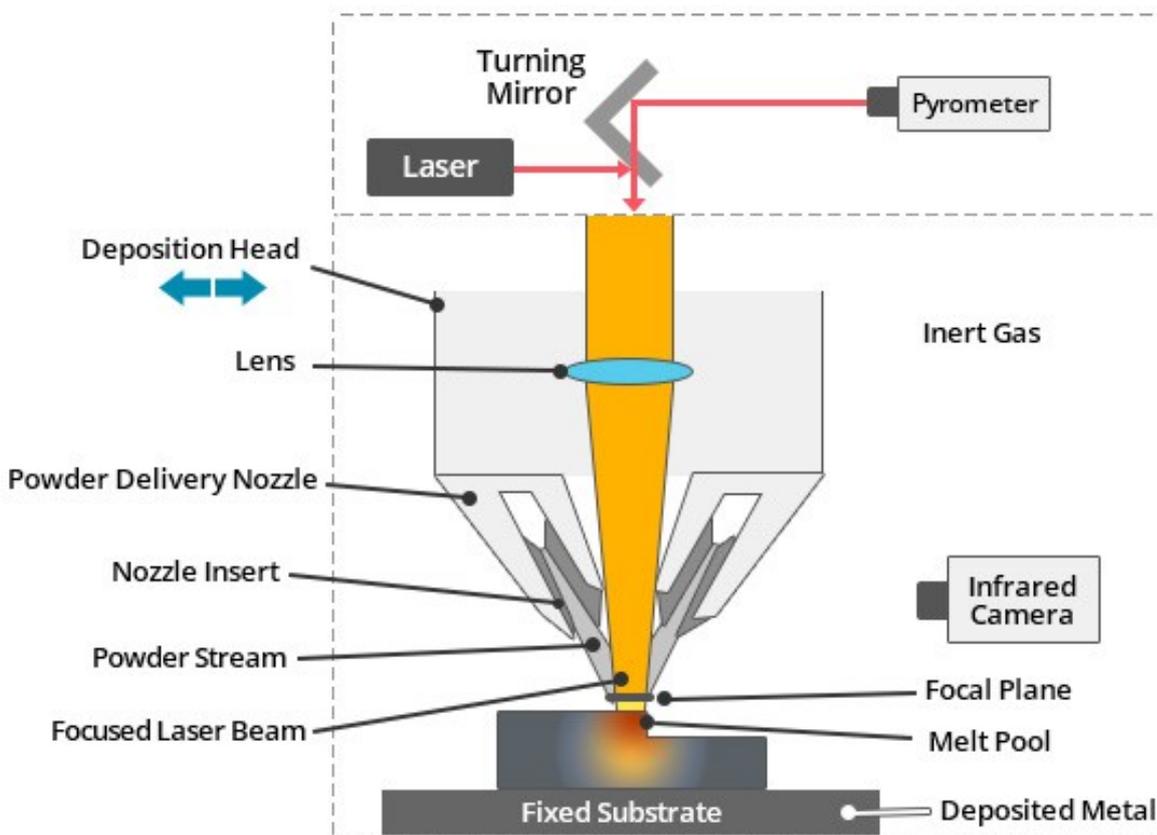


Figura 8: sistema DED.

Il centro del sistema è la testa dell'ugello, costituita dalla fonte di energia e dagli ugelli di erogazione della polvere, questi convergono nel punto di deposito dove viene localizzato il raggio laser. La testa dell'ugello e la piattaforma vengono spostate attraverso le informazioni geometriche CAD in modo da creare le figure desiderate; in seguito, il raggio laser fonde la superficie creando un piccolo bagno fuso del materiale sul substrato, ciò avviene nel punto iniziale del percorso di costruzione; successivamente la polvere viene alimentata attraverso alimentatori e inizia lo

spostamento della testa dell'ugello e del basamento lungo il percorso di costruzione [12].

La qualità del prodotto, in termini di risoluzione, dipende in modo particolare dall'intensità del fascio di elettroni; la velocità di deposizione, invece, dipende dalla velocità di fabbricazione del processo.

Le macchine per questo tipo di processo hanno spesso gas inerte che è soffiato insieme alla polvere dagli ugelli, in questo modo rivestono la regione fusa e riducono il tasso di ossidazione. Gli ugelli utilizzati possono essere singoli o multipli, quest'ultimi consentono di miscelare materiali diversi per ottenere materiali graduati.

Le polveri che vengono utilizzate in questo processo hanno dimensioni elevate e, pertanto, richiedono una densità di energia elevata, in questo modo anche la velocità di costruzione è più elevata. Una conseguenza a ciò è una ridotta qualità superficiale che potrebbe richiedere lavorazioni aggiuntive.

Inoltre, in questo tipo di processo le strutture di supporto sono usate raramente, questo perché sono spesso utilizzate piattaforme girevoli a più assi che permettono di ruotare la piattaforma di stampa in modo da ottenere le diverse caratteristiche.

Questi sistemi possono eseguire riparazioni o stampe su parti esistenti [13].

1.3 Laser Polishing

La lucidatura laser è un processo di microfusione utilizzato per migliorare la qualità superficiale dei materiali, non comportando una rimozione di materiale dalla superficie del pezzo.

Si tratta di un processo in cui il laser incide sul pezzo in lavorazione per fondere la superficie fino ad una certa profondità, in questo modo si ha il miglioramento dei parametri superficiali dato che il materiale fuso solidifica ulteriormente.

Lo scopo di questo processo, quindi, consiste nel fondere un sottile strato superficiale del pezzo in modo da ridurre l'altezza media dei picchi presenti sulle asperità superficiali. La profondità di fusione è limitata perché è necessario evitare cambiamenti microstrutturali in profondità nel materiale. Per questo motivo importanti sono il tipo di radiazione laser (radiazione pulsata o radiazione continua) ed i parametri del laser, ossia: potenza del laser, velocità di scansione, diametro del raggio laser e la distanza tra la sorgente e la superficie del pezzo.

Per questo processo si considerano due meccanismi generali:

- Shallow Surface Melt (SSM): si basa sul comportamento dinamico del liquido metallico ad alta temperatura, questo liquido è forzato in micro-asperità che riempiono le valli superficiali. In questa tecnica la profondità del materiale fuso è, in genere, inferiore alla distanza picco-valle.
- Surface Over Melt (SOM): questo processo genera un aumento della densità di energia, ciò porta ad un cambiamento del comportamento del materiale fuso. In questo modo aumenterà lo spessore del bagno di fusione fino a superare la distanza picco-valle, di conseguenza l'intera superficie metallica si convertirà in un bagno di fusione.

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche legate al processo di lucidatura laser dato che la superficie del pezzo è esposta a temperature elevate, si sviluppa un elevato gradiente termico lungo la sezione trasversale, generando così cambiamenti microstrutturali.

La superficie lucidata presenta un miglioramento in termini di rugosità superficiale, questo può essere spiegato grazie alla distribuzione uniforme del bagno di fusione durante la solidificazione rapida dovuto alla pressione del laser, gravità e tensione superficiale.

Si avrà una divisione dello strato trattato in tre zone: strato rifuso, zona termicamente alterata ed il materiale originale. Nella prima zona (strato rifuso) sono presenti grani più fini rispetto al resto del materiale, questo perché la velocità di raffreddamento è elevata. Una conseguenza a ciò è la formazione del "pinning del bordo di grano" che si sviluppa grazie alla presenza di precipitati nel materiale fuso. Nella zona termicamente alterata, ossia non esposta al raggio laser, i grani sono più grossolani rispetto allo strato superficiale rifuso, ma non arrivano ad essere grandi come le granulometrie originali. Scendendo più in basso lungo il materiale abbiamo la terza zona, ossia il materiale originale.

Oltre a miglioramenti in termini di rugosità superficiale, un ulteriore vantaggio è un aumento della resistenza a trazione, anche se l'allungamento totale diminuisce. Questa diminuzione è il risultato della migliore adesione tra i materiali.

La lucidatura laser è ideale per la finitura di piccoli componenti con geometrie complesse, dato che è una tecnica che può essere automatizzata, si crea un alto livello di ripetibilità per le applicazioni industriali [14].

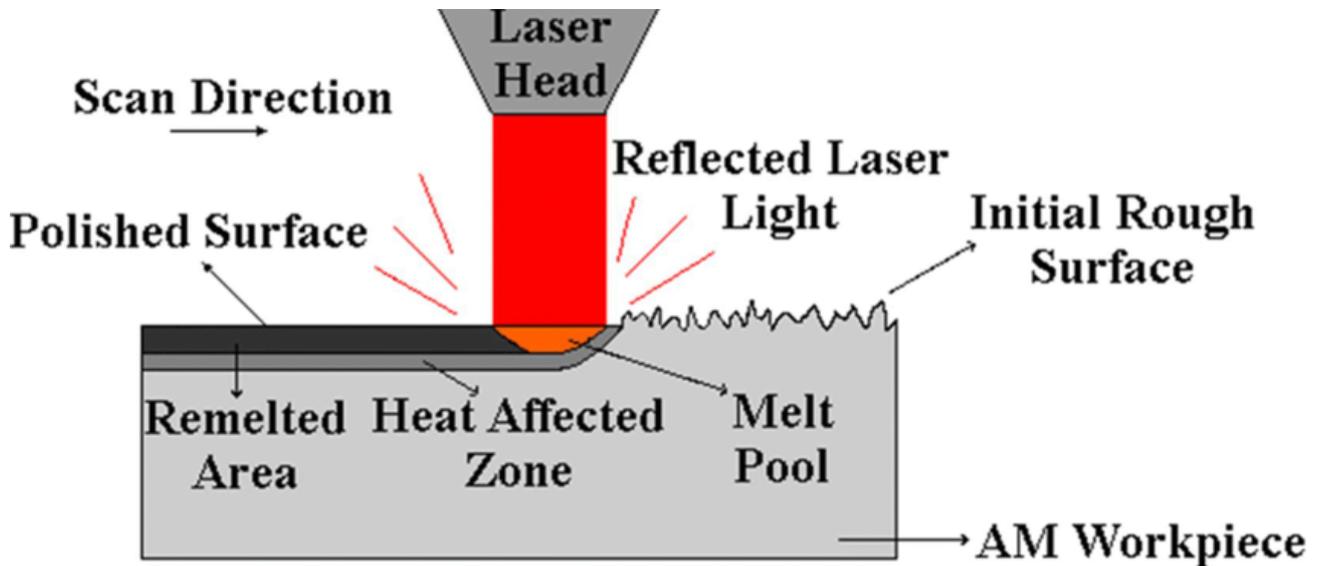


Figura 9: diagramma schematico del processo di lucidatura laser.

Capitolo 2

2. Procedura sperimentale

2.1 Lega di ottone CuZn42

L'ottone è una lega metallica composta principalmente da rame e zinco, può contenere in quantità minori elementi come piombo, nichel ed alluminio. Si presenta come un metallo brillante e lucido, dal colore dorato o giallo-marrone per via della fusione di rame e zinco e della loro proporzione all'interno della lega. Infatti, questa proporzione, determina le caratteristiche specifiche dell'ottone.

Le leghe di ottone si distinguono in ottoni comuni, con una percentuale di zinco che oscilla tra 45-50%, ed ottoni speciali, questi presentano percentuali compositive variabili. Generalmente, gli ottoni con una percentuale di zinco maggiore del 36% sono lavorati a freddo; se invece la percentuale di zinco è compresa tra il 36 e 45% sono

lavorati a caldo; infine, se la percentuale di zinco supera il 45% allora queste leghe non hanno utilizzo pratico. In queste leghe sono presenti delle “fasi” che si riferiscono alle diverse strutture cristalline che si formano quando il materiale solidifica; le due fasi principali sono la fase alfa (α) e la fase beta (β); la fase α è ricca di rame, si forma quando la lega raffredda a temperature più basse e conferisce maggiore lavorazione e duttilità; la fase β è ricca di zinco e si forma quando la lega raffredda a temperature più elevate.

Per migliorare le proprietà dell’ottone si possono aggiungere altri elementi alla lega originaria di rame e zinco, tra cui:

- Piombo: migliora la lavorabilità dell’ottone, riduce l’usura ed il surriscaldamento degli utensili durante la lavorazione, permettendo di ottenere lavorazioni di alta qualità in tempi più brevi.
- Ferro: aumenta il carico di rottura dell’ottone.
- Nichel: migliora le proprietà meccaniche e la resistenza alla corrosione.

L’ottone presenta numerosi vantaggi che lo rendono un materiale estremamente versatile, tra questi vantaggi abbiamo: resistenza, durabilità, lavorabilità, applicabilità, sostenibilità ambientale, conducibilità, rapporto costi-benefici, proprietà estetiche ed antibatteriche [15].



Figura 10: esempio campione lega di ottone.

Nel nostro studio prendiamo in esame la lega CuZn42, la quale presenta una composizione di rame che varia tra 58-62% e di zinco che oscilla tra 37-40%. Verrà analizzato un campione prodotto tramite L-PBW, si tratta di un cubo avente dimensioni 12x12x12 mm³.

Il campione è stato sottoposto ad un trattamento superficiale di laser polishing in cui ognuna delle facce laterali del cubo, escludendo up-skin e down-skin, rappresenta una diversa condizione. Nella tabella 1 riportiamo i parametri di stampa usati per la produzione dei campioni.

Sample short name	Sample long name	P [W]	v [mm/s]	h [mm]	t [mm]	E _s [J/mm ²]
#1	P190V200	190	200	0.1	0.05	9.5

Tabella 1: parametri di stampa usati per la produzione dei campioni.

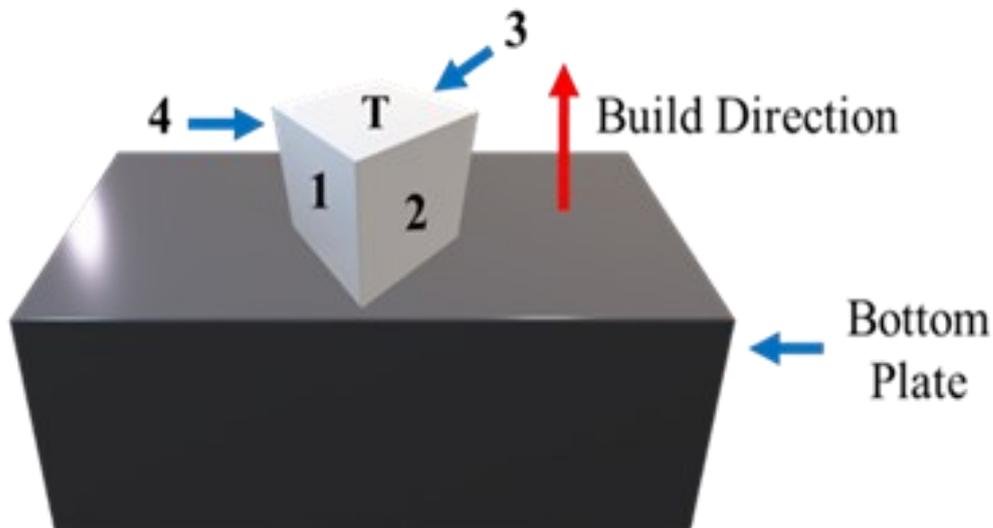


Figura 11: rappresentazione delle facce laterali del cubo trattate con il processo di laser polishing.

Nella tabella 2 sono, invece, riportati i trattamenti ed i parametri usati durante il laser polishing.

Treatment name	Faccia Trattata (Rif. Figure 1)	Frequenza (kHz)		P (W)	t _p (ms)	λ (nm)	E _p (mJ)
		Step 1	Step 2				
AM	1	-	-	-	-	-	-
SS	2	55	-	47	218	1060 - 1085	1
DS75	3	55	75				
DS100	4	55	100				

Tabella 2: parametri e trattamenti usati.

2.2 Preparazione dei campioni metallografici

Dopo la stampa, avvenuta tramite il processo di L-PBF, si procede ad un'accurata preparazione prima di poter studiare ed analizzare i campioni; si esegue, infatti un'analisi metallografica che ha come obiettivi la valutazione degli effetti dei vari trattamenti eseguiti sulla microstruttura, l'individuazione dei difetti e la correlazione fra la microstruttura e le specifiche funzionali e operative di un materiale.

2.2.1 Inglobatura

Si tratta di una tecnica utilizzata per produrre componenti metallici con caratteristiche specifiche attraverso la fusione di materiali base. Dopo aver preparato il materiale, questo viene riscaldato a temperature elevate fino a raggiungere lo stato liquido, ciò avviene solitamente in un forno ad alta temperatura o in un forno a induzione. Successivamente il metallo fuso è versato nello stampo o nella matrice, dove assume la forma desiderata; questo processo può avvenire tramite pressione, gravità o sottovuoto a seconda delle caratteristiche del pezzo finale. Una volta colato, il metallo fuso inizia a raffreddarsi e solidificarsi nella forma dello stampo, questo può richiedere tempo a seconda della dimensione e della geometria del pezzo. Una volta solidificato si prosegue con la rimozione del pezzo dallo stampo.

Il processo di inglobatura offre vantaggi, quali la capacità di produrre pezzi complessi con tolleranze strette e proprietà specifiche del materiale.

2.2.2 Lucidatura

È un processo che avviene in seguito all'inglobatura, è eseguito per migliorare l'aspetto estetico e le proprietà superficiali delle parti metalliche, in questo modo sarà possibile osservare la microstruttura ed i difetti in maniera chiara.

Alcuni metodi di lucidatura sono:

- Lucidatura manuale: questo metodo coinvolge l'utilizzo di strumenti manuali come carta vetrata, spugne abrasive, lucidatrici e composti per lucidatura per rimuovere le imperfezioni superficiali e ottenere una finitura uniforme.
- Lucidatura meccanica: in questo caso, vengono impiegati macchinari specializzati come levigatrici, lucidatrici a tamburo o a nastro, che utilizzano abrasivi rotanti o oscillanti per levigare la superficie dell'oggetto.
- Elettro-pulitura: questa tecnica sfrutta il passaggio di una corrente elettrica attraverso una soluzione elettrolitica per rimuovere lo strato superficiale del metallo.
- Processi chimici di lucidatura: si utilizzano soluzioni chimiche specializzate per rimuovere lo strato superficiale del metallo e ottenere una superficie liscia e brillante.
- Lucidatura laser: si usa un raggio laser per fondere superficialmente lo strato superiore del metallo, creando una superficie più uniforme e riducendo l'aspetto delle linee di scansione.

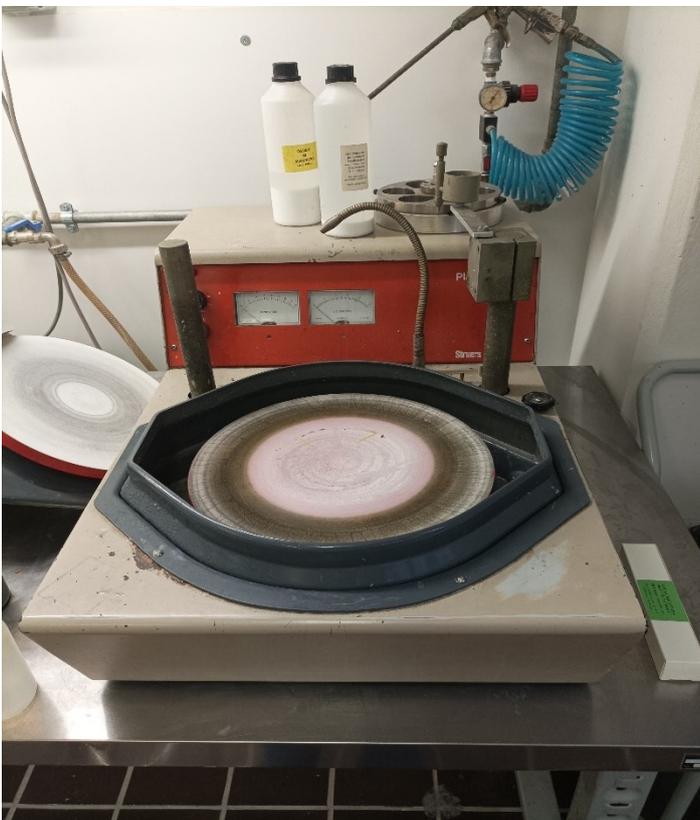
La lucidatura è un processo molto importante per le osservazioni al microscopio ottico; infatti, consente di ottenere superfici metalliche pronte per essere sottoposte all'attacco chimico, quindi superfici che dovrebbero essere esenti da imperfezioni.

Per lo studio dei nostri campioni effettueremo una lucidatura meccanica utilizzando una carta abrasiva di carburi di silicio a granulometria variabile. Solitamente, per ottenere un risultato migliore si parte con una granulometria P 180, si prosegue poi per stadi passando alla P 320, P 600, P 1200, P 2400 e per finire la P 4000. Cambiando granulometria si eliminano i graffi generati dalla granulometria precedente, per questo motivo bisogna ruotare di 45° ogni volta che si cambia granulometria, in modo da ottenere una superficie liscia, priva di graffi e lucidata. Nel caso in cui continuano ad esserci delle imperfezioni si può usare una lappatrice, questa è formata da un panno messo in rotazione e, su di esso, è applicata una pasta diamantata, il tutto lubrificato da un olio in modo da raggiungere livelli di precisione più elevati.



Figura 12: macchinario per lucidatura meccanica.

Figura 13: lappatrice.



2.2.3 Osservazione del campione al Microscopio Ottico

Dopo aver completato il processo di lucidatura, si passa all'osservazione del campione attraverso il microscopio ottico invertito, dotato di un tavolino su cui al di sopra sarà appoggiato il campione, mentre al di sotto sono presenti gli obiettivi. Questo tipo di microscopio, infatti, è dotato di un fascio di luce che parte dal basso verso l'alto colpendo la superficie del campione e mandando l'immagine ad un computer. Sono presenti anche meccanismi per regolare la posizione del tavolo ed ottenere un'immagine più nitida; i filtri, invece, sono utilizzati per migliorare il contrasto o l'illuminazione.

L'osservazione viene effettuata principalmente nelle zone in cui il campione presenta dei difetti, come vuoti e porosità. Si parte con una lente di ingrandimento 2,5x10, e poi si possono effettuare osservazioni con un ingrandimento maggiore, 10x10 o 20x10, in modo da vedere ancora più nel dettaglio la superficie.

Rispetto al classico microscopio dritto, quello invertito offre maggiore libertà in quanto, dato che il campione si trova al di sopra dell'obiettivo, si hanno spazi di lavoro maggiori. Inoltre, il rischio di urtare l'obiettivo sul campione è molto basso.

La misurazione della porosità si basa sulla frazione di vuoto rispetto al volume totale del materiale.

Per procedere all'analisi dei vuoti seguiamo alcuni passaggi.

- Una volta aperta l'immagine che vogliamo analizzare, bisogna impostare la scala utilizzando il comando "Straight" e sviluppando una linea dritta lunga quanto il marker, impostando "um" su "Unit of Length" e inserendo il valore indicato dal marker su "Know Distance"; in questo modo le dimensioni riportate dalle immagini saranno espresse in micrometri.
- Disegniamo poi un rettangolo la cui area non contenga il marker e, attraverso la funzione "Crop", ritagliamo l'area della figura precedentemente selezionata.
- Successivamente attraverso le funzioni "Binary" e "Make Binary" possiamo evidenziare tutti i vuoti presenti, si ottiene l'immagine in bianco e nero per notare i vuoti.

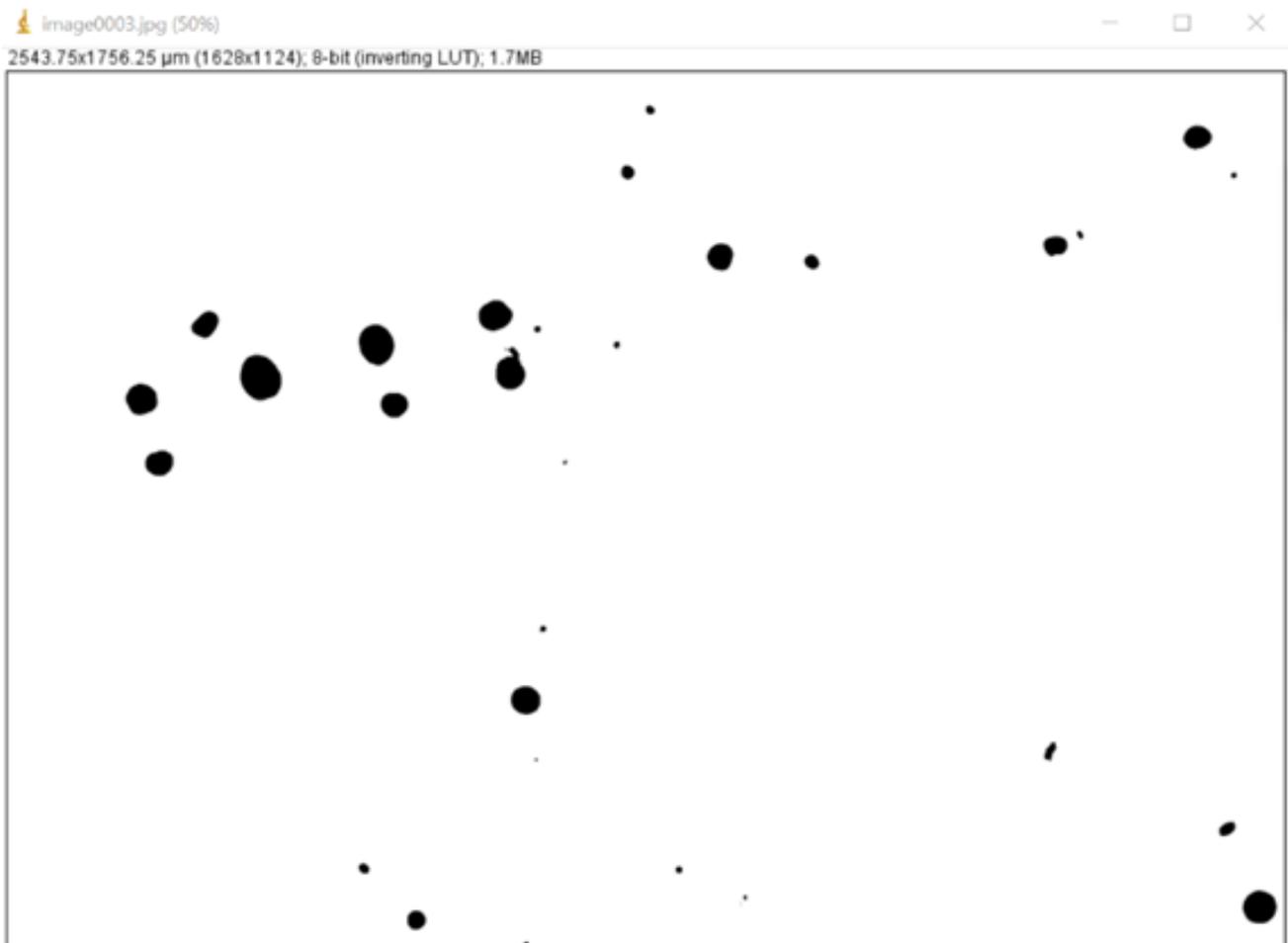


Figura 16: esempio di un'immagine dopo le funzioni di "Binary" e "Make Binary" in cui sono noti i vuoti.

- Procediamo con le funzioni "Analyze" e "Analyze Particles" e, dal menu a tendina che uscirà, nella voce "Show" selezioniamo "Outlines"; così facendo si

aprirà una finestra tipo Excel dove nella prima colonna è riportato il numero identificativo di ogni vuoto, mentre nella seconda appare l'area dei vuoti.

Capitolo 3

3.RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Inglobatura

Nel nostro caso useremo una pressa inglobatrice raffreddata ad acqua a cui viene aggiunta resina fenolica, questa conferisce: elevata resistenza termica, buona adesione, rigidità e durezza.



Figura 17: pressa inglobatrice.

Dopo esser stato preparato, il composto di resina viene caricato nella pressa, quest'ultima viene chiusa e vengono applicati pressione e calore; è importante raggiungere una temperatura ottimale per attivare il processo di polimerizzazione della resina, in modo che possa iniziare a diffondersi nei materiali circostanti e che possa iniziare ad indurirsi creando un materiale rigido e resistente.

Prima di rimuovere il campione facciamo raffreddare la pressa, infine otteniamo il nostro campione inglobato.

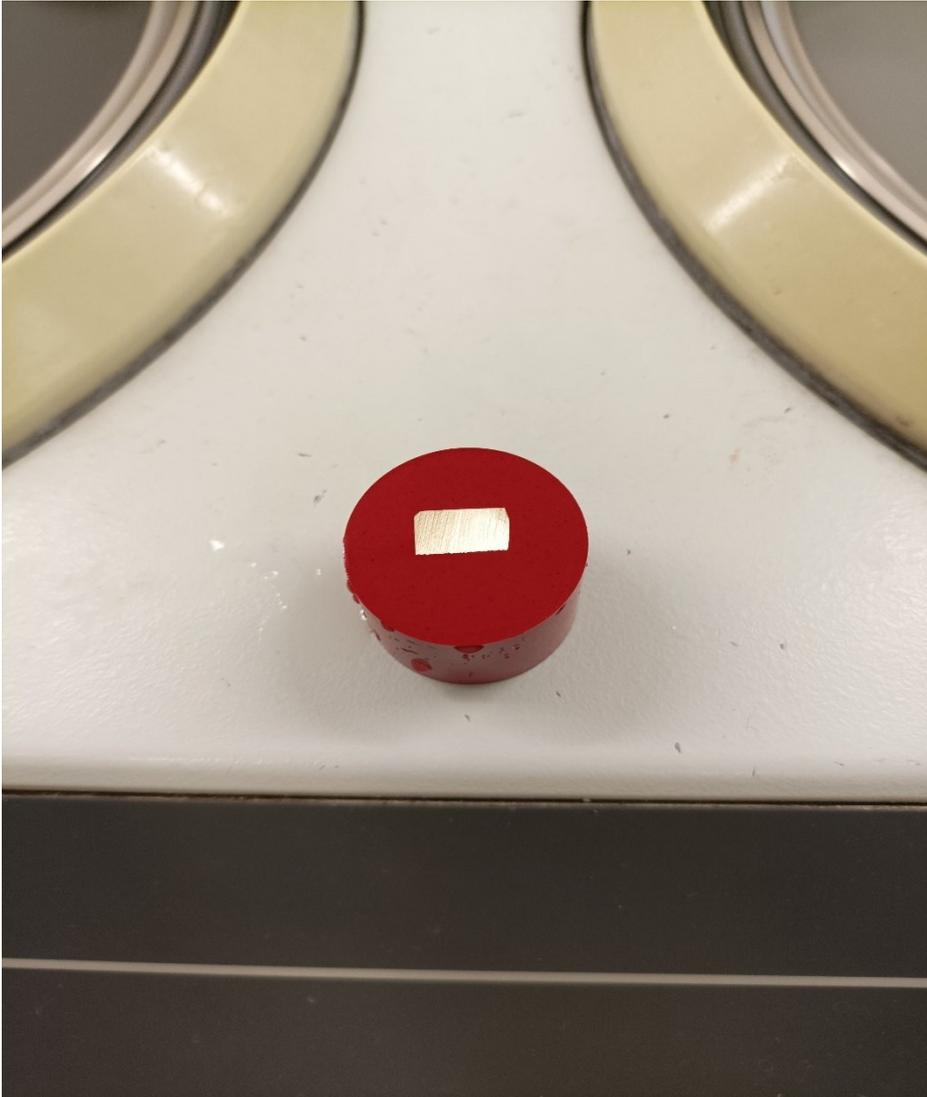


Figura 18: campione inglobato.

3.2 Lucidatura

Nel caso del nostro campione D17 le granulometrie utilizzate sono P 320, P 1200, P2400 e P 4000; pestando sempre attenzione a ruotare di 45° il campione ogni volta che si cambiava la granulometria.

Abbiamo effettuato un'asportazione progressiva di materiale fino a portare il nostro campione ad uno spessore di 6,5mm, questo per cercare di eliminare più possibile vuoti e difetti. Per quanto riguarda la lappatrice, invece, abbiamo utilizzato un panno di acciaio 0,25 ed una pasta diamantata di 3 micron.

Il processo dovrà essere ripetuto sia per il piano XY che per il piano YZ.

3.3 Osservazione al Microscopio Ottico

Utilizzando il microscopio ottico invertito con ingrandimento $2,5 \times 10$ siamo riusciti ad eseguire un'attenta osservazione di vuoti e porosità, come si può vedere dalle immagini qui sotto riportate andando a distinguerle a seconda del piano XY o YZ.

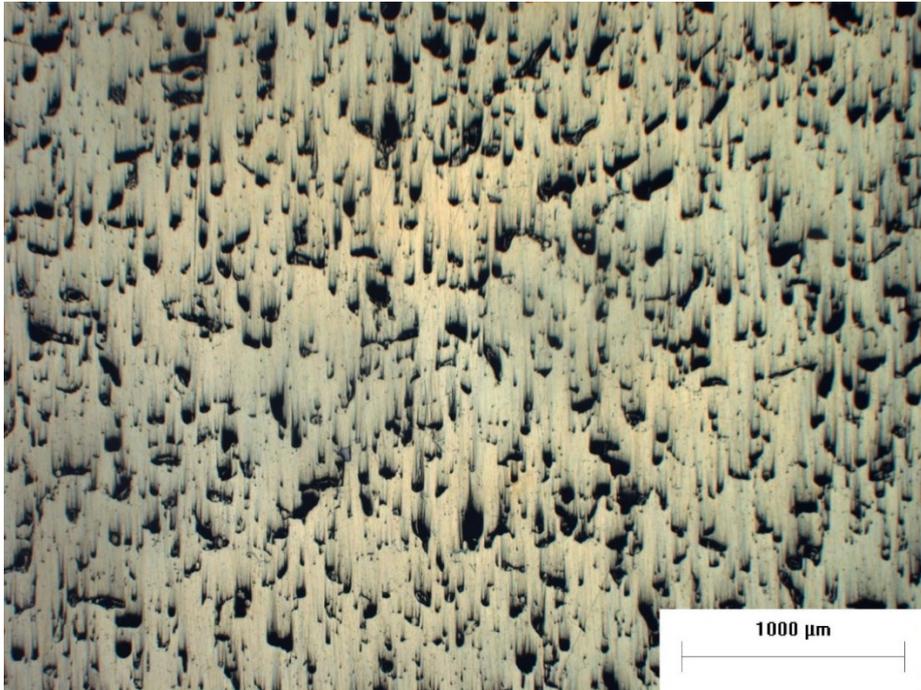


Figura 19: immagine del campione osservata al microscopio ottico sul piano XY.

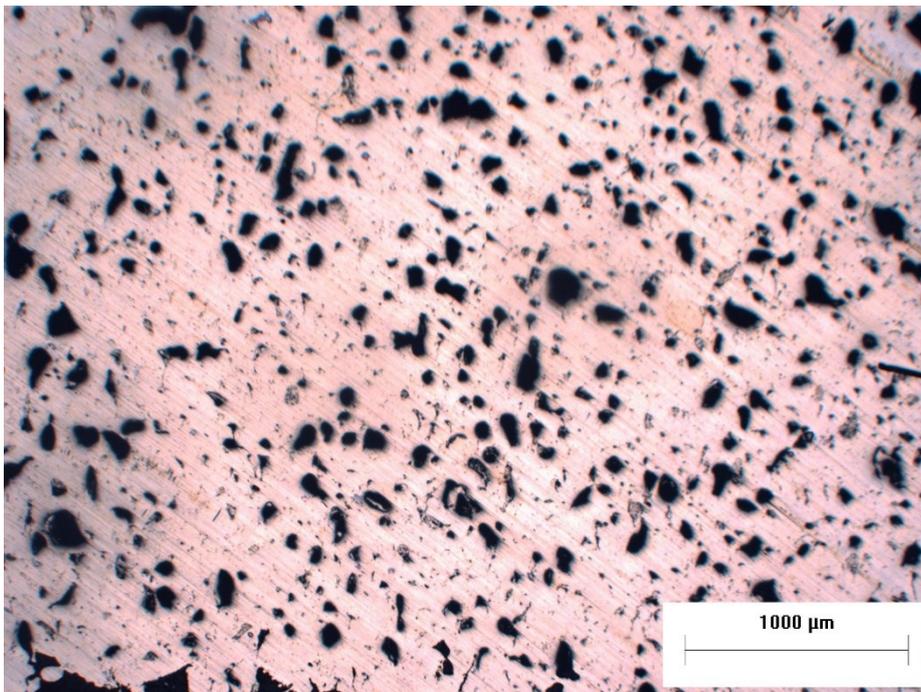


Figura 20: immagine del campione osservata al microscopio ottico sul pino YZ.

Nel nostro caso di studio andremo a considerare 3 immagini per il piano XY e 3 immagini per il piano YZ.

3.4 Caratterizzazione dei vuoti

Dopo aver visionato le immagini al microscopio ottico, utilizziamo il software ImageJ per effettuare la caratterizzazione dei vuoti.

Nella figura sottostante riportiamo uno schema di ciò che abbiamo una volta completato lo studio con il software.

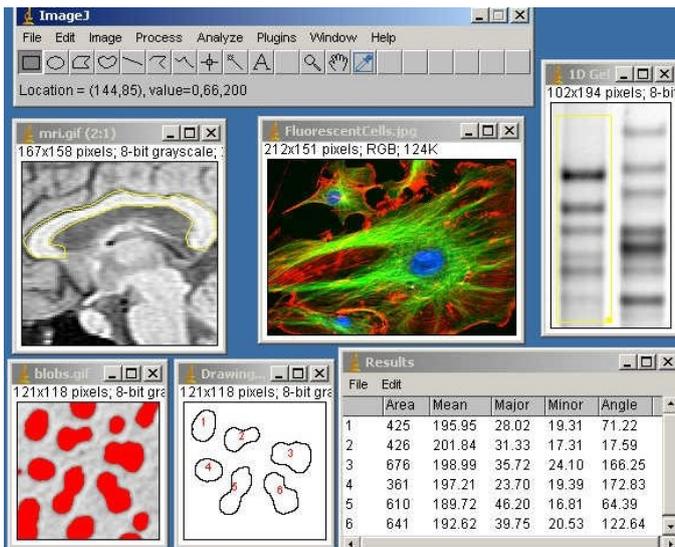


Figura 21: esempio di quello che si avrà dopo svolto le funzioni sul software.

Nel nostro file Excel riporteremo i dati relativi al numero dei vuoti e l'area dei vuoti per poi calcolare: la somma delle aree di ogni vuoto, l'area dell'immagine, la percentuale dei vuoti sull'area, la media e la deviazione standard.

Sapendo che:

- $\% \text{aree vuoti} = \frac{\sum \text{aree vuoti}}{\text{area immagine}} \times 100$

- $\text{Dev. standard}(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$

Dove μ è la media, x_i sono gli elementi della distribuzione e n è il numero di elementi della distribuzione.

La deviazione standard è intesa come una misura statistica della dispersione; un valore basso indica che i dati sono meno dispersi rispetto alla media, al contrario, un valore alto indica maggiore dispersione dei dati rispetto alla media.

Per le nostre immagini otteniamo le seguenti tabelle:

IMMAGINE N° 1 XY 2,5x10	
n°vuoti	area vuoti (um)
1	5279.424
2	4712.108
3	855.207
4	948.349
5	3031.329
6	4.234
7	292.125
8	8.467
9	5563.082
10	12.701
11	50.804
12	762.066
13	38.103
14	76.207
15	508.044
16	46.571
17	1295.512
18	1096.528
19	97.375
20	241.321
21	1045.724
22	9386.113
23	12.701
24	29.636
25	4047.417
26	2252.329
27	4.234
28	12.701
29	491.109
30	872.142
31	21.169
32	702.794
33	1138.865
somma dei vuoti(um)	44936.491
area immagine(um)	254122.6485
% vuoti	17.68299334

Tabella 3: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e delle percentuali dei vuoti sulla prima immagine XY.

IMMAGINE N°2 XY 2,5x10	
n° vuoti	area vuoti(um)
1	11211.501
2	293.751
3	1660.139
4	6515.934
5	44.508
6	226.989
7	9150.792
8	53.409
9	22.254
10	4.451
11	672.067
12	22.254
13	17.803
14	40.057
15	173.58
16	489.585
17	102.368
18	102.368
somma dei vuoti(um)	30803.81
area immagine(um)	189104.4498
% vuoti	16.28930997

Tabella 4: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti sulla seconda immagine XY.

IMMAGINE N°3 XY 2,5x10	
n°vuoti	area vuoti(um)
1	855.222
2	7696.997
3	258.26
4	4.234
5	5186.371
6	21.169
7	8.468
8	296.364
9	182.052
10	1837.457
11	381.039
12	101.611
13	249.793
14	152.416
15	613.897
16	67.74
17	110.078
18	715.507
19	4.234
20	224.39
21	110.078
22	97.377
23	3615.641
24	694.339
25	14094.227
26	127.013
27	186.286
28	1033.04
29	1951.769
30	1625.768
31	1071.144
32	4331.149
33	241.325
34	279.429
35	228.624
36	21.169
37	16.935
somma dei vuoti(um)	48692.612
area immagine(um)	257071.293
% vuoti	18.94128723

Tabella 5: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti sulla terza immagine XY.

IMMAGINE N°1 YZ 2,5x10		IMMAGINE N°2 YZ 2.5x10	
n° vuoti	area vuoti (um)	n° vuoti	area vuoti(um)
1	8.68	1	607.615
2	290.778	2	3068.457
3	26.04	3	17.36
4	13.02	4	2365.359
5	4062.218	5	186.625
6	17.36	6	2712.568
7	954.795	7	772.539
8	8.68	8	34.721
9	17.36	9	3897.417
10	73.78	10	39.061
11	690.056	11	199.645
12	8.68	12	4.34
13	151.899	13	143.224
14	664.016	14	108.503
15	199.639	15	3467.746
16	34.72	16	4.34
17	2573.606	17	533.833
18	733.456	18	95.482
19	282.098	19	1111.068
20	4.34	20	78.122
21	1197.833	21	151.904
22	30.38	22	468.732
23	164.919	23	190.965
24	69.44	24	481.752
25	277.758	25	1966.069
26	390.598	26	2725.588
27	1011.214	27	4483.332
28	30.38	28	2994.675
29	169.259	29	8.68
30	403.618	30	147.564
31	2096.209	31	390.61
32	104.159	32	1449.596
33	69.44	33	17.36
34	4.34	34	963.504
35	2977.224	35	82.462
36	125.859	36	1006.905
37	867.995	37	1406.195
38	876.675	38	99.822
39	8.68	39	34.721
40	460.037	40	8.68
somma dei vuoti(um)	22151.238	somma dei vuoti(um)	38527.141
area immagine(um)	227642.6252	area immagine(um)	253120.5
% vuoti	9.730707498	% vuoti	15.22086951

Tabella 6: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti sulla prima e sulla seconda immagine YZ.

IMMAGINE N°3 YZ 2,5x10	
n° vuoti	area vuotoit(um)
1	615.148
2	99.962
3	788.158
4	257.593
5	280.661
6	69.204
7	157.632
8	73.049
9	749.712
10	980.392
11	34.602
12	103.806
13	15.379
14	215.302
15	7.689
16	1141.869
17	30.757
18	130.719
19	965.013
20	111.496
21	34.602
22	3437.14
23	1841.599
24	38.447
25	15.379
somma dei vuoti(um)	12195.31
area immagine(um)	316402.3218
% vuoti	3.85436805

Tabella 7: calcolo della somma dei vuoti, dell'area dell'immagine e della percentuale dei vuoti della terza immagine YZ.

Per evidenziare al meglio l'andamento delle medie percentuale dei vuoti, possiamo riportare su un grafico a barre i valori ottenuti per le nostre immagini.

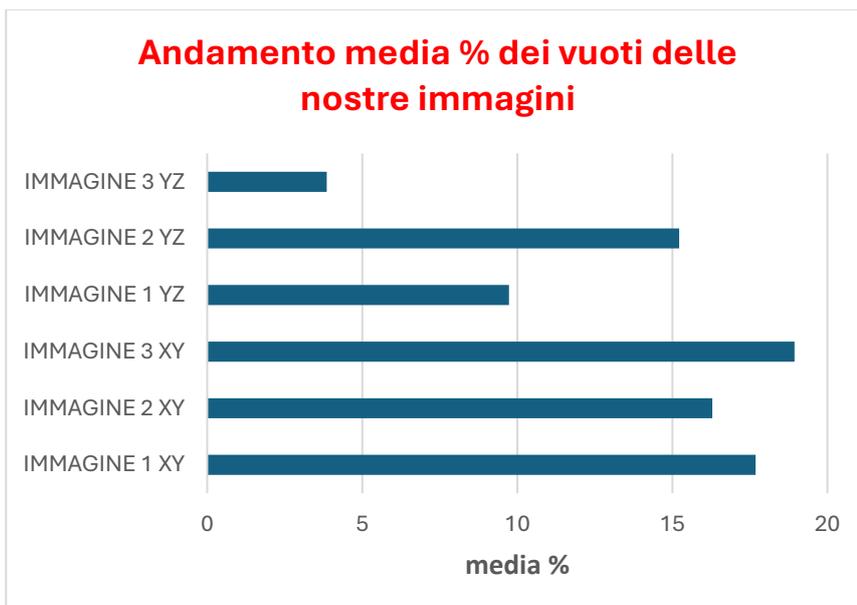


Tabella 8: grafico a barre che mostra l'andamento della media % dei vuoti delle nostre immagini.

Basandoci su questi dati calcoliamo la media delle percentuali dei vuoti e la deviazione standard.

MEDIA % VUOTI	11.67421937
dev.standard della media % dei vuoti	7.34856153

Tabella 9: calcolo della media % dei vuoti e della Dev.standard.

Nel nostro caso di studio effettueremo una divisione in classi, in modo da studiare la media dei vuoti e la deviazione standard per delle classi specifiche di area in modo da ottenere dei dati più confrontabili tra di loro. Per eseguire ciò in maniera corretta possiamo ordinare le tabelle sopra citate dal valore più piccolo al valore più grande, successivamente creare altre tabelle inerenti alla divisione in classi.

Otteniamo quindi:

CLASSE 1 VUOTI 1-20µm	
n ° vuoti	area vuoti(um)
1	4.234
2	4.234
3	4.234
4	4.234
5	4.34
6	4.34
7	4.34
8	4.34
9	4.451
10	7.689
11	8.467
12	8.468
13	8.68
14	8.68
15	8.68
16	8.68
17	8.68
19	8.68
19	12.701
20	12.701
21	12.701
22	13.02
23	15.379
24	15.379
25	16.935
26	17.36
27	17.36
28	17.36
29	17.36
30	17.803
media	10.05033333
dev.standard	5.006445413

Tabella 10: classe 1 dei vuoti con aria compresa tra 1 e 20 micron.

CLASSE 2 VUOTI 20-100 μm	
n° vuoti	area vuoti(μm)
1	21.169
2	21.169
3	21.169
4	22.254
5	22.254
6	26.04
7	29.636
8	30.38
9	30.38
10	30.757
11	34.602
12	34.602
13	34.72
14	34.721
15	34.721
16	38.103
17	38.447
18	39.061
19	40.057
20	44.508
21	46.571
22	50.804
23	53.409
24	67.74
25	69.204
26	69.44
27	69.44
28	73.049
29	73.78
30	76.207
31	78.122
32	82.462
33	95.482
34	97.375
35	97.377
36	99.822
37	99.962
media	52.13502703
dev. Standard	25.99117198

CLASSE 3 VUOTI 100-200 μm	
n° vuoti	area vuoti(μm)
1	101.611
2	102.368
3	102.368
4	103.806
5	104.159
6	108.503
7	110.078
8	110.078
9	111.496
10	125.859
11	127.013
12	130.719
13	143.224
14	147.564
15	151.899
16	151.904
17	152.416
18	157.632
19	164.919
20	169.259
21	173.58
22	182.052
23	186.286
24	186.625
25	190.965
26	199.639
27	199.645
media	144.283963
dev.standard	33.78216818

Tabella 11: classe 2 dei vuoti con area compresa tra 20 e 100 micron e classe 3 dei vuoti con area compresa tra 100 e 200 micron.

CLASSE 4 VUOTI 200-1000µm	
n° vuoti	area vuoti(um)
1	215.302
2	215.302
3	226.989
4	241.321
5	257.593
6	257.593
7	277.758
8	280.661
9	280.661
10	282.098
11	290.778
12	292.125
13	293.751
14	390.598
15	390.61
16	403.618
17	460.037
18	468.732
19	481.752
20	489.585
21	491.109
22	508.044
23	533.833
24	607.615
25	615.148
26	615.148
27	664.016
28	672.067
29	690.056
30	702.794
31	733.456
32	749.712
33	749.712
34	762.066
35	772.539
36	788.158
37	788.158
38	855.207
39	867.995
40	872.142
41	876.675
42	948.349
43	954.795
44	963.504
45	965.013
46	965.013
47	980.392
48	980.392
media	586.8744167
dev.standard	258.3803201

Tabella 12: classe 4 dei vuoti con area compresa tra 200 e 1000 micron.

Tabella 13: classe 5 dei vuoti con area compresa tra 1000 e 5000 micron e classe 6 dei vuoti con area compresa tra 5000 e 15000 micron.

CLASSE 6 VUOTI 5000-15000µm	
n° vuoti	area vuoti(um)
1	5186.371
2	5279.424
3	5563.082
4	6515.934
5	7696.997
6	9150.792
7	9386.113
8	11211.501
9	14094.227
media	8231.604556
dev.standard	3036.591033

CLASSE 5 VUOTI 1000-5000µm	
n° vuoti	area vuoti(um)
1	1006.905
2	1011.214
3	1045.724
4	1096.528
5	1111.068
6	1138.865
7	1141.869
8	1197.833
9	1295.512
10	1406.195
11	1449.596
12	1660.139
13	1841.599
14	1966.069
15	2096.209
16	2252.329
17	2365.359
18	2573.606
19	2712.568
20	2725.588
21	2977.224
22	2994.675
23	3031.329
24	3068.457
25	3437.14
26	3467.746
27	3897.417
28	4047.417
29	4062.218
30	4483.332
31	4712.108
media	2363.672194
dev.standard	1144.585717

Dopo aver eseguito ciò riportiamo su un grafico a barre l'andamento della media dei vuoti per ogni singola classe; in questo modo sarà più facile studiare la dimensione dei vuoti in una fascia di area più ristretta.

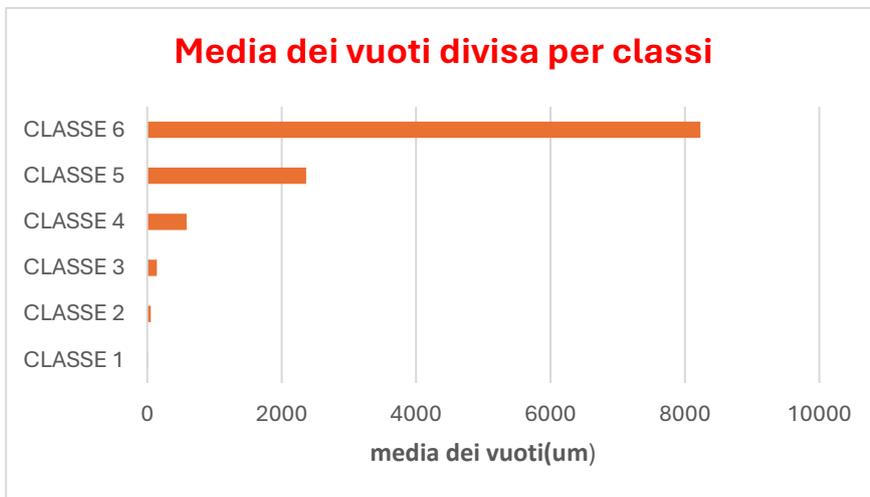


Tabella 14: grafico a barre che riporta l'andamento della media dei vuoti delle singole classi.

Capitolo 4

4. CONCLUSIONI

Il seguente lavoro di tesi ha proposto lo studio di una lega di ottone CuZn42 prodotta tramite LPBF e sottoposta a Laser Polishing, prestando particolare attenzione all'analisi metallografica di un campione cubico.

Si è prestata particolare attenzione sulla formazione e sullo studio dei difetti, tramite la caratterizzazione dei vuoti; la formazione di questi dipende soprattutto dalla variazione dei parametri di processo. Questi parametri hanno un ruolo importante per definire la qualità del processo di produzione; infatti, ottimizzando parametri come la potenza laser, la velocità di scansione, la densità di energia è possibile ottenere un controllo più preciso sulla densità del materiale, che porterà ad una minimizzazione delle porosità.

Per quanto riguarda la parte sperimentale, è stata effettuata l'analisi di un provino cubico prima nel piano XY e poi nel piano YZ, prodotto attraverso dei parametri di processo e, successivamente, sottoposto a preparazione metallografica. Una volta terminata la procedura metallografica, la quale comprende le fasi di inglobatura e

lucidatura, il campione è stato osservato al microscopio ottico invertito principalmente con l'ingrandimento 10x e, tramite il software ImageJ, abbiamo estratto immagini riguardanti la microstruttura del campione; riportando i dati su Excel siamo stati in grado di calcolare la percentuale media dei vuoti sulla superficie del campione. Successivamente abbiamo sviluppato una divisione in classi per studiare i vuoti in delle specifiche dimensioni delle aree, calcolando poi la media delle aree dei vuoti e la deviazione standard; in questo modo abbiamo visto come varia la media dei vuoti nelle varie classi di aree prese in considerazione.

Dopo aver analizzato i nostri dati, possiamo affermare quanto sia importante eseguire degli studi più approfonditi riguardo i parametri di processo scelti in modo da eliminare/ridurre la formazione dei vuoti; alcune strategie sono per eseguire ciò sono il controllo delle materie prime, l'evacuazione dell'aria, il controllo di temperatura e pressione o, ancora, un controllo dell'umidità ed una progettazione adeguata.

BIBLIOGRAFIA

- [1] «Cooke, S., Ahmadi, K., Willerth, S., & Herring, R. (2020). Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 978-1003.».
- [2] «Laser Powder Bed Fusion: tutto quello che c'è da sapere – 3Dnatives».
- [3] «Fusione laser a letto di polvere: una revisione dello stato dell'arte della tecnologia, dei materiali, delle proprietà e dei difetti e della modellazione numerica - ScienceDirect».
- [4] «Fusione a fascio di elettroni (EBM): la guida completa – 3Dnatives».
- [5] «Pérez, M., Carou, D., Rubio, E. M., & Teti, R. (2020). Current advances in additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 88, 439-444.».

- [6] «Sher, D., & Marinoni, D. (2015). Stampa 3D: Tutto quello che c'e'da sapere sull'unica rivoluzione possibile. HOEPLI EDITORE.».
- [7] «Porosità - Wikipedia».
- [8] «Difetti di fusione e porosità: ecco come la tecnologia laser permette di correggere le imperfezioni (elettrolaser.com)».
- [9] «Tuazon, B. J., Custodio, N. A. V., Basuel, R. B., Delos Reyes, L. A., & Dizon, J. R. C. (2022). 3D printing technology and materials for automotive application: a mini-review. Key Engineering Materials, 913, 3-16.».
- [10] «Estrusione di materiali, cos'è e come funziona? | Dassault Systèmes® (3ds.com)».
- [11] «Estrusione di materiali - Tipi, vantaggi e svantaggi (engineeringproductdesign.com)».
- [12] «Cos'è la deposizione diretta di energia, i suoi tipi e i pro e i contro (engineeringproductdesign.com)».
- [13] «Wang, D., Ling, D., Lin, W., Wang, K., Feng, Y., Liu, L., ... & Jiang, G. (2024). Potential and Challenges of 3D Printing Technology in Membrane-Based Water Treatment Research. ACS ES&T Water, 4(9), 3619-3622.».
- [14] «Lucidatura laser - Wikipedia».
- [15] «] Ottone (lega): composizione e proprietà (prontuarionline.it)».

RINGRAZIAMENTI

Credevo che almeno la parte dei ringraziamenti fosse più facile, ma invece si è rivelata più difficile della tesi stessa; non nego di avere un po' gli occhi lucidi mentre scrivo, un po' per la raggiunta di quest'obiettivo, un po' perché penso al percorso fatto, alle persone incontrate, a tutte le emozioni che mi hanno travolto in questi anni, e un po' forse per la sensibilità che negli ultimi mesi mi sta giocando brutti scherzi.

Sono tante le persone che vorrei ringraziare, ma i primi ovviamente non possono che non essere i miei genitori, sempre pronti a supportarmi e sempre lì a fare il tifo per me. Ringrazio mio padre, per avermi donato la forza e la pazienza nell'affrontare le cose, per non averci mai fatto mancare niente anche quando le cose erano più difficili, per insegnarmi sempre qualcosa e, anche, per lasciarmi sbagliare. Ringrazio mia madre, per avermi dato il coraggio, per avermi insegnato a non mollare anche quando tutto sembra difficile, per avermi insegnato che non tutti può andare secondo i piani e che c'è sempre una soluzione a tutto, per ascoltarmi sempre e per trasmettermi tutto l'amore che una mamma può trasmettere. Vi ringrazio perché, in ogni mio passo, ce ne sono altrettanti vostri a non lasciarmi mai sola.

Ringrazio mia sorella e mio fratello, per l'amore incondizionato che ci sarà sempre, per avermi sostenuto e spronato, per essere il dono più preziosa che i miei genitori mi hanno donato. Sapete che vi voglio bene, anche se non ve lo dico e ogni tanto scappo dai vostri abbracci.

Ringrazio la mia famiglia, i miei zii, i miei nonni e i miei cugini per tutti i momenti passati insieme e per tutti quelli che verranno.

A mia zia Stefania, per essere sempre presente e per non avermi lasciata mai sola in questo percorso esultando con me dopo ogni esame fatto; so che, sarai sempre lì ad osservarmi e a tendermi la mano se mai ne avessi bisogno. Grazie per avermi trattato sempre come una figlia, sei per me come una seconda mamma.

A nonna Dina e nonno Sandro, per insegnarmi cos'è l'amore, per aspettarmi sempre con le braccia aperte. Porterò sempre nel cuore tutti i momenti passati insieme e la

felicità che provo ogni volta che si va “a casa di nonna”, la felicità di quando da piccola rimanevo a dormire e mi mettevo nel lettone tra di voi, si dormiva un po’ scomodi, ma io così ero felicissima. Ringrazio loro, perché l’amore dei nonni è il più bello che si possa ricevere, ed è un onore continuare a viverlo.

Agli amici di sempre, alle serate, ai pomeriggi davanti ad un caffè, alla distanza e agli abbracci dopo mesi senza vederci.

A Francesco, al suo saperti ascoltare, alla sua sincerità ed alla sua sensibilità, al suo modo di prenderti e farti sentire a tuo agio in pochissimo tempo, alla sua bellezza e al suo coraggio. A Martina, alla forte del gruppo, tanto diverse ma anche tanto simili, lei serata disco e gin, io Netflix e lettino, ma alla fine si riesce sempre a trovare un accordo; alla sua passione e determinazione, ai suoi consigli, alla sua pazzia ed alla sua risata così contagiosa. A Irene, la vecchia del gruppo (forse anche più di me, ma si fa per scherzare!), al suo essere Amica con la A maiuscola, al suo esserci sempre e comunque, alle litigate ma anche a tutte le volte che ci siamo chieste “scusa”; a quella foto al parchetto di quando avevamo due anni, la prima foto di oltre venti anni di amicizia, al crescere insieme ed essere orgogliose l’una dell’altra. Ti considero una sorella, ma questo credo tu lo sappia.

All’Erasmus, forse l’esperienza più bella e significativa fatta fino ad ora; agli amici incontrati lì, per aver reso l’esperienza più bella e importante, per avermi aperto mondi, per avermi fatto divertire come non facevo da un po’, per avermi dato più consapevolezza di me stessa, per non avermi mai fatto sentire da sola, per le serate che ogni tanto ritornano in cui c’è sempre un ricordo passato da ricondividere.

Agli amici di Bartolo (che poi io nemmeno sono di Bartolo) per le serate, le risate, le chiacchiere, l’incoraggiamento reciproco, per le tavolate in mensa in cui ogni giorno sembra festa.

A Isa, Kiara, Sara e Linda per esser state le mie prime amiche ad Ancona e per esserlo ancora, per ascoltarmi sempre, senza farmi sentire sbagliata o giudicata.

A Tania, per spronarmi sempre a dare il massimo, per asciugare le mie lacrime e per condividere le risate. Per avermi ascoltato ripetere per pomeriggi Analisi 2, e per avermi consolato ogni volta che non sapevo un teorema, per ascoltarmi ogni volta che mi lamentavo di tutto e per portarmi cioccolata ogni volta che sono triste. Per avermi fatto scoprire la bellezza di Ancona e delle piccole cose; alla sua pazienza e alla sua risata, così piccola ma così importante.

Alla Valentina di qualche anno fa, che vedeva lontano questo traguardo. Più volte ho pensato di lasciar perdere, di cambiare strada perché avevo difficoltà ad andare

avanti, pensando fosse la soluzione più facile. Con il tempo e con le persone, ho capito che poi le cose arrivano, con i tempi di cui una persona ha bisogno, perché ognuno di noi ha bisogno di un tempo diverso per raggiungere lo stesso obiettivo di un altro e questa forse è la cosa più difficile da capire ed accettare.

Nessuno ti spiega come fare l'Università, come affrontare la vita, i momenti belli e quelli più difficili ma, se accanto a te hai le persone giuste, tutto sembrerà più facile.

Ringrazio tutte le persone qui presenti, tutti coloro che ho incontrato in questi anni e, di nuovo, tutta la mia famiglia ed i miei amici perché questo traguardo non l'ho raggiunto da sola, ma ognuno di voi mi ha dato qualcosa che porterò sempre con me.

Alla vita, alle piccole cose, al mare, ai tramonti estivi, ai sorrisi veri e agli abbracci sinceri.

Grazie.

Valentina