



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Caratterizzazione di componenti realizzati in lega
di alluminio tramite additive manufacturing**

**Characterization of components made of
aluminum alloy through additive manufacturing**

Tesi di laurea di:

JESSICA DONATELLI

Relatore:

Prof.ssa **ELEONORA SANTECCHIA**

Anno Accademico 2023-2024

Abstract

Questa tesi si concentra sull'analisi di due provini, 7772 e 7775 (lega AlSi), ottenuti tramite il processo di Molten Metal Deposition (MMD), una tecnica innovativa di Additive Manufacturing sviluppata dalla ValCUN.

L'obiettivo principale di questo studio è descrivere la nuova tecnologia MMD, evidenziando le sue caratteristiche distintive e i vantaggi rispetto ad altre tecniche di fabbricazione additiva.

Attraverso una serie di analisi metallurgiche e microscopiche, sono state esaminate le proprietà dei 2 campioni, focalizzandosi sulla loro porosità, microstruttura e durezza.

This thesis focuses on the analysis of two samples, 7772 and 7775 (AlSi alloy), obtained through the Molten Metal Deposition (MMD) process, an innovative Additive Manufacturing technique developed by ValCUN.

The main objective of this study is to describe the new MMD technology, highlighting its distinctive features and advantages over other additive manufacturing techniques.

Through a series of metallurgical and microscopic analyses, the properties of the two samples were examined, focusing on their porosity, microstructure, and hardness.

Indice

Indice	3
Introduzione	5
Capitolo 1: ValCUN e Molten Metal Deposition	6
1.1 ValCUN.....	6
1.1.1 Vantaggi.....	7
1.2 Molten Metal Deposition (MMD).....	9
Capitolo 2: Tecnologie per la fabbricazione di componenti di alluminio	10
2.1 Tecnologie tradizionali per la fabbricazione di componenti di alluminio.....	10
2.2 Additive manufacturing.....	13
2.2.1 Cenni storici AM	14
2.2.2 Vantaggi AM.....	15
2.3 Tipologie di processi di additive manufacturing.....	16
2.4 Tecnologie a base di polvere.....	19
2.4.1 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF).....	21
2.4.2 Direct Energy Deposition (DED).....	23
2.5 Tecnologie a filo metallico.....	26
2.5.1 Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).....	26

Capitolo 3: Alluminio e le sue leghe	28
3.1 Alluminio.....	28
3.2 Leghe di Alluminio.....	29
Capitolo 4: Procedure sperimentali	33
4.1 Troncatura.....	33
4.2 Microscopio digitale.....	34
4.3 Inglobatura.....	41
4.4 Assottigliamento meccanico.....	42
4.5 Lucidatura.....	43
4.5.1 Acquisizioni post-lucidatura.....	44
4.6 Prova di microdurezza.....	46
4.7 Attacco chimico.....	47
4.8 Microscopio elettronico a scansione (SEM).....	48
4.9 Analisi vuoti.....	49
Capitolo 5: Risultati e conclusioni	51
5.1 Risultati Waviness e Roughness.....	51
5.2 Risultati prova di microdurezza.....	53
5.3 Risultati caratterizzazione vuoti.....	55
5.4 Conclusioni.....	57
Bibliografia:	58

Introduzione

L'Additive Manufacturing, definito dall'ASTM come "il processo di unire tra loro materiali per la realizzazione di oggetti a partire da un modello 3D, solitamente strato dopo strato, al contrario delle tecniche di produzione sottrattive", ha rappresentato un punto di svolta per il settore industriale grazie alla sua capacità di produrre componenti complessi con estrema precisione.

Questa tesi si concentra su un tipo particolare di processo di Additive Manufacturing, *Molten Metal Deposition*, grazie all'analisi condotta su due campioni, 772 e 775.

I provini sono stati sottoposti al tradizionale Workflow della metallografia: inglobatura, assottigliamento meccanico, lucidatura e attacco chimico.

Ciò ha permesso di effettuare un'analisi dettagliata al SEM.

Il presente lavoro si articola in cinque capitoli:

- Nel primo capitolo si ha una descrizione della ValCUN e del suo ambito di operatività, evidenziando i principali vantaggi che offre nella produzione di componenti in metallo.
- Nel secondo capitolo vengono espone e analizzate le diverse tecniche di produzione di componenti di alluminio: vengono descritte sia le tecniche tradizionali che quelle di Additive Manufacturing.
- Il terzo capitolo mette in luce le caratteristiche dei principali elementi costitutivi della lega di interesse: alluminio e silicio.
- Il quarto capitolo descrive in dettaglio le procedure sperimentali adottate per l'analisi dei campioni.
- Il quinto capitolo espone criticamente i risultati ottenuti e li confronta per i due diversi campioni.

Capitolo 1

ValCUN e Molten Metal Deposition

1.1 ValCUN

La ValCUN [1] è un'azienda belga innovativa che ha sviluppato una nuova tecnologia di Additive Manufacturing, la *Molten Metal Deposition* (MMD).

Questa tecnica permette di superare le difficoltà legate allo studio dell'alluminio nella stampa 3D: infatti, nonostante l'alluminio sia il secondo materiale più utilizzato al mondo, è sempre stato difficile da utilizzare nell'Additive Manufacturing per via della difficile processabilità delle sue polveri e della loro reattività (spiccato rischio di esplosione).

Oltre alla produzione di componenti metallici per applicazioni generiche, la ValCUN si distingue per il suo lavoro in settori ad alta tecnologia: è adatta per la produzione di scambiatori di calore e dissipatori e per la realizzazione di componenti fondamentali per veicoli elettrici. Inoltre, questa azienda è specializzata nella realizzazione di paralumi complessi e sculture uniche (ad esempio come mostrato in figura 1), impossibili da produrre con altre tecnologie.

La ValCUN collabora con l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) al fine di utilizzare la sua tecnologia anche in applicazioni spaziali.

1.1.1 Vantaggi

La tecnologia utilizzata dalla ValCUN offre numerosi vantaggi, tra i principali si evidenziano i seguenti:

- Sostenibilità e riduzione dell'impatto ambientale: uno degli aspetti più importanti è il forte impegno verso l'ambiente e la salute dell'uomo. Questo processo è estremamente efficiente dal punto di vista energetico, con una riduzione di energia dell'80% e, inoltre, mira ad eliminare sostanze tossiche e ad utilizzare materiale 100% riciclabile.

- Produzione flessibile e rapida: la *Molten Metal Deposition* permette una produzione diretta su richiesta. Ciò porta ad una diminuzione dei tempi di attesa e dei costi associati alla produzione.
Inoltre, grazie alla piattaforma aperta, i parametri di stampa possono essere facilmente adattati alle esigenze specifiche del cliente, offrendo una grande flessibilità.

- Efficienza economica: il rapporto buy-to-fly superiore al 70% si traduce in una riduzione del materiale utilizzato e delle lavorazioni aggiuntive, riducendo i costi.

- Sicurezza e semplicità d'uso: a differenza di altre tecnologie di manifattura che utilizzano polveri di metallo, pericolose e difficili da maneggiare, la MMD impiega materiali in filo. Inoltre, il sistema dell'azienda ValCUN è progettato per essere facile da implementare.

- Innovazione nelle applicazioni specialistiche.

- Adattabilità per settori avanzati.



Figura 1: esempio di lampada realizzata dalla ValCUN

1.2 Molten Metal Deposition

La *Molten Metal Deposition* (MMD) [2] è la nuova tecnologia sviluppata dalla ValCUN e si distingue per la capacità di produrre parti metalliche senza la necessità di utilizzare materiali in polvere: viene usato un filo metallico, che viene fuso ed estruso direttamente nel componente finale.

Inizialmente il filo di alluminio viene fuso nella camera di riscaldamento e il software genera il percorso dello strumento e i parametri di stampa.

L'alluminio liquido viene estruso attraverso l'ugello e successivamente si fonde con il livello precedente, costruendo la parte.

Le parti sono terminate quando vengono staccate dal substrato a rilascio rapido. Questo procedimento è visibile nella figura 2.

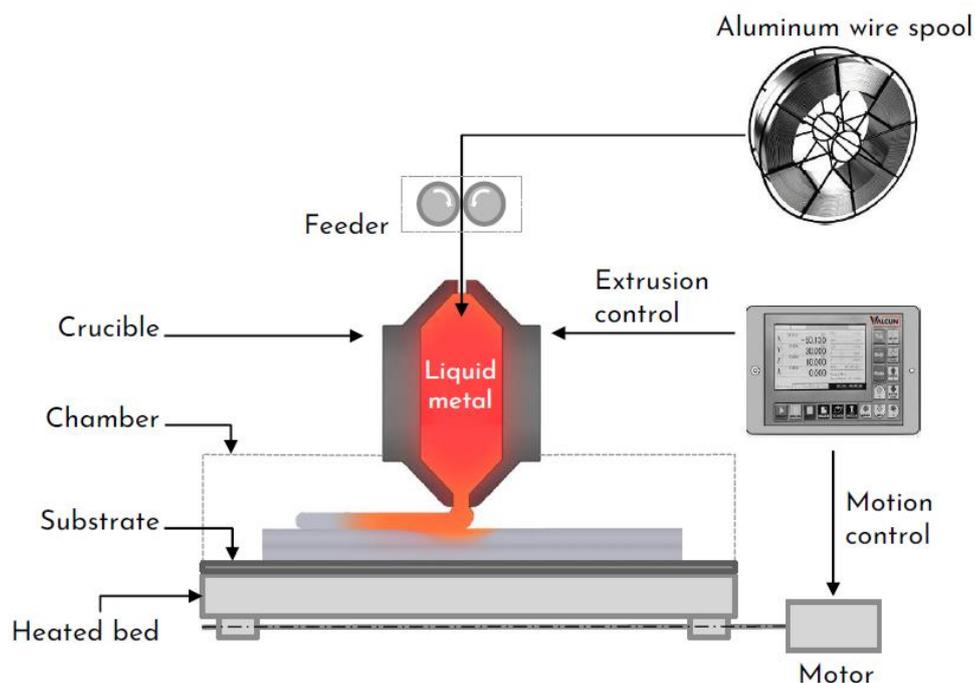


Figura 2 Schema di funzionamento della Molten Metal Deposition

Capitolo 2

Tecnologie per la fabbricazione di componenti di alluminio

2.1 Tecniche tradizionali per la fabbricazione di componenti di alluminio

Le tecnologie [3] per la fabbricazione di componenti di alluminio sono molteplici e si dividono in:

- Colata continua e semicontinua: in riferimento alla figura 3, è una tecnica in cui l'alluminio fuso viene trasformato in lingotti attraverso un processo di colata. In modo particolare la colata continua viene utilizzata per elevati volumi di produzione, mentre quella semicontinua per le produzioni diversificate.

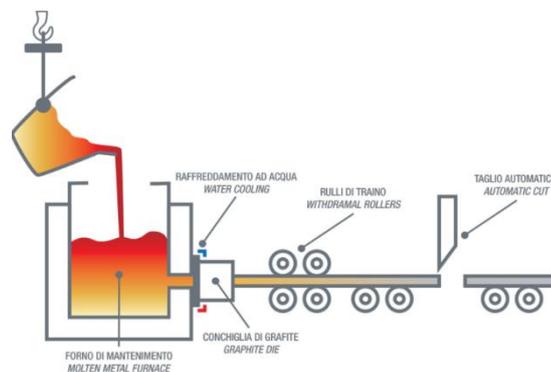


Figura 3 Schema di funzionamento di colata continua [4]

- Laminazione: questo processo consiste nella riduzione dello spessore dell'alluminio e può essere effettuato a caldo o a freddo. Nel primo caso un lingotto pre-riscaldato passa attraverso dei rulli subendo ad ogni passaggio una riduzione dello spessore e un aumento di lunghezza, mentre nel secondo viene restituita la durezza e si ottiene lo spessore desiderato. Se questi due processi vengono combinati, si possono ottenere fogli di alluminio sottilissimi, di 0.004 mm (normalmente i fogli di alluminio hanno uno spessore variabile compreso fra 0.2 e 3 mm). Degli esempi di prodotti in alluminio con la tecnica di laminazione sono mostrati in figura 4.



Figura 4 Laminati in alluminio [5]

- Estrusione: un processo (illustrato in figura 5) in cui una billetta di alluminio pre-riscaldata passa attraverso una matrice in acciaio trasformando il suo volume originale in quello di un lungo profilato a sezione costante. L'estrusione è impiegata per produrre componenti come profili per finestre, porte, rivestimenti, tubi e strutture per veicoli come rimorchi, treni, aerei e navi.

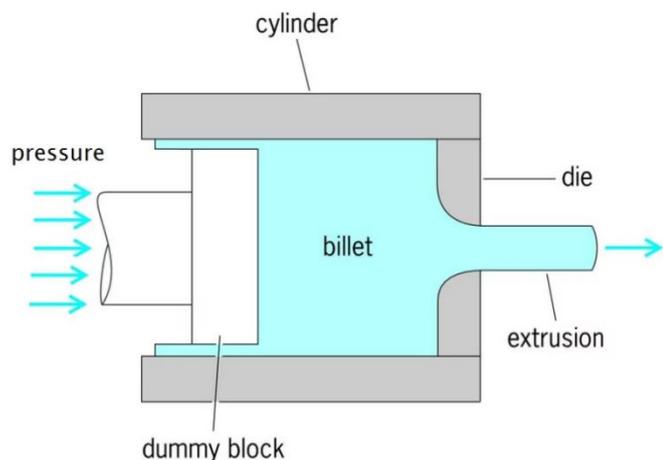


Figura 5 Schema processo di estrusione [6]

- Trafilatura: è uno speciale tipo di laminazione a freddo nel quale il pezzo di partenza è fatto passare attraverso uno stampo che gli dà la forma definitiva. Si usa per produrre alcuni fili e tubi a diametro ridotto, detti tubi trafilati, usati in applicazioni che spaziano dall'aeronautica fino agli oggetti da cucina.
- Getti di fusione: l'alluminio viene fuso in varie forme e colato in appositi stampi. La colata in stampi di sabbia si usa per piccole serie o pezzi molto

complicati. Questo processo è molto comune nell'industria automobilistica, dove si producono parti come pistoni, collettori e pompe in alluminio fuso.

- Forgiatura: è uno dei processi metallurgici più antichi e inizialmente veniva eseguito manualmente con martello e incudine mentre oggi viene realizzato con macchine (maglio e pressa). La forma finale si ottiene comprimendo una pastiglia di metallo caldo (figura 6) in uno stampo apposito. È una tecnica per produrre pezzi con peso variabile (da 50g a 100kg). In base alla deformazione che subisce il materiale, può essere suddivisa in: libera o obbligata (o stampaggio massivo).



Figura 6 Operazione di forgiatura [7]

- Estrusione per impatto: questa tecnica combina l'estrusione e la forgiatura. Un esempio famoso di prodotto ottenuto con questa tecnologia è il tubetto flessibile utilizzato per contenere prodotti come crema da barba, dentifricio o cosmetici.

2.2 Additive manufacturing:

L' additive manufacturing [8] è una famiglia di processi produttivi che consente di creare oggetti tridimensionali aggiungendo materiale strato dopo strato fino a ottenere la forma desiderata.

A differenza dei metodi tradizionali, come la fresatura e la tornitura in cui il pezzo viene ricavato attraverso l'asportazione di materiale o trucioli dal blocco iniziale, quindi per produzione sottrattiva, l'additive manufacturing (AM) comprende una classe di tecnologie che permettono la realizzazione di oggetti tridimensionali attraverso la sovrapposizione di strati di materiale.

I processi AM più utilizzati sono: l'estrusione, la laminazione a strati, la fotopolimerizzazione, il getto di materiale/legante, la fusione del letto di polvere, la deposizione ad energia diretta.

A seconda del materiale utilizzato, la sorgente di deposizione varia.

Vengono utilizzate diverse sorgenti di energia come bobine di riscaldamento a resistenza, tubi caldi, raggi laser/ionici/elettronici, vibrazioni ultrasoniche e luce ultravioletta (UV).

2.2.1 Cenni storici AM

L'origine dell'Additive manufacturing risale al 1980, anno in cui Kodama del Nagoya Municipal Industrial Research Institute creò una tecnica di prototipazione rapida in grado di produrre un oggetto "fetta per fetta".

Alla fine degli anni '80, Chuck Hull introdusse la stereolitografia (SLA) presso la 3D Systems. La SLA fu il primo esempio commerciale di prototipazione rapida e basava il suo funzionamento su un fascio laser, grazie al quale si solidificavano strati di resina fotosensibile e si ottenevano i modelli tridimensionali.

Inizialmente, la maggior parte dei processi di stampa 3D erano brevettati, quindi le possibilità e le macchine disponibili erano limitate.

Dagli anni 2000 in poi l'additive manufacturing si è evoluta sempre di più, diventando facilmente accessibile.

Si prevede che in futuro la stampa 3D possa trasformare ancora di più il processo di progettazione e produzione degli oggetti, aprendo nuove possibilità per la personalizzazione, la sostenibilità e l'efficienza produttiva.

2.2.2 Vantaggi AM

L'additive manufacturing [9], grazie alla sua tecnica di creazione strato su strato, offre un'ampia libertà progettuale rispetto alle tecnologie tradizionali di lavorazione del metallo: stampare in 3D un componente permette di ottenere geometrie complesse, precise e con maggiori dettagli. Questo approccio consente di riprogettare i componenti in base alla loro funzione, piuttosto che adattarli alla tecnologia di produzione.

Dunque, è possibile creare componenti più leggeri, svuotando parti piene e realizzando forme organiche e ciò offre vantaggi significativi in settori come l'aerospaziale e il motor sport.

L'Additive Manufacturing, non essendo un processo per asportazione ma additivo, riduce ed elimina diverse fasi del processo di sviluppo del prodotto arrivando ad avere una prototipazione molto più rapida: in questo modo il processo produttivo viene controllato strato dopo strato e di conseguenza diminuiscono tutti i possibili errori.

Inoltre, grazie alle tecnologie di riparazione e rivestimento come il Direct Energy Deposition e il laser cladding, è possibile riutilizzare e riparare componenti esistenti, contribuendo a un approccio più sostenibile e riducendo i costi.

2.3 Tipologie di processi di Additive Manufacturing

Tutte le tecnologie di Additive Manufacturing [10] hanno come obiettivo comune la creazione di oggetti 3D, depositando il materiale strato su strato.

Esistono svariati metodi per ottenere questo risultato, tra i più importanti e diffusi ci sono:

- Estrusione: è la più utilizzata nella FDM (Fused Deposition Modeling). Questa tecnica prevede la fusione di materiali termoplastici attraverso un ugello di estrusione riscaldato, che successivamente costruisce le parti strato dopo strato. I prodotti finali sono caratterizzati da elevata porosità, bassi costi di lavorazione e flessibilità delle geometrie. Proprio per questo è largamente utilizzato nella produzione di piccoli volumi.
- Laminazione a strati: consiste nel sovrapporre strati di diversi materiali per ottenere il componente desiderato.
- Fotopolimerizzazione: è un processo molto semplice che utilizza la luce UV per polimerizzare un materiale strato per strato ad una velocità di elaborazione elevata. La stereolitografia (SLA), in figura 7, sfrutta questo principio e coinvolge quattro tecnologie diverse: laser, ottica, chimica dei fotopolimeri ed informatica. La SLA prevede la solidificazione di un fotopolimero (resina) liquido. Questa tecnologia consente di ottenere prodotti finiti con ottime finiture superficiali, buone tolleranze geometriche e dimensionali e, inoltre, permette di realizzare forme molto complesse. Tuttavia, i macchinari per la stereolitografia sono molto costosi, così come i polimeri utilizzati. Anche la DLP (Digital Light Processing) sfrutta la fotopolimerizzazione che avviene però attraverso una sorgente luminosa differente rispetto ad un laser: viene utilizzato un vero e proprio videoproiettore, che in un solo passaggio proietta l'intera superficie del layer di stampa senza doverlo disegnare per intero. Questa tecnica consente di ridurre i tempi e di ottenere ottimi risultati.

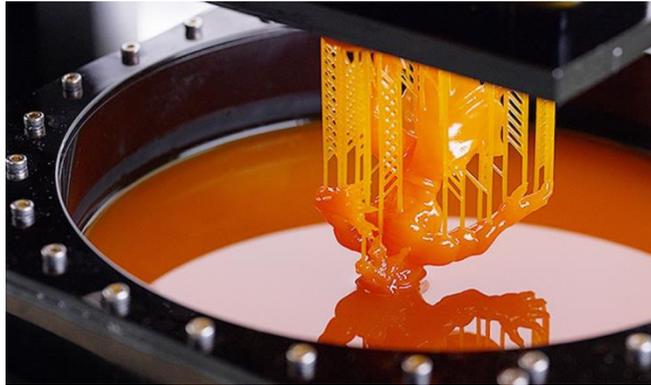


Figura 7 Operazione stereolitografia [11]

- Getto di materiale: viene utilizzato nella Sheet Lamination, in cui grazie a colle, saldature a ultrasuoni o brasature, si assemblano fogli e successivamente a fine processo viene eliminato il legante. Si tratta di un processo estremamente economico e veloce. Material jetting e binder jetting sono due tecniche distinte che si basano sul medesimo principio: nel getto di materiale i polimeri vengono fusi e depositati sotto forma di goccioline che danno luogo alla geometria richiesta. I polimeri fusi subiscono quindi un processo di indurimento mediante calore, luce o sostanze chimiche. Material jetting e binder jetting sono considerati rapidi, ma il prodotto finale presenta alcune porosità.
- Fusione letto di polvere: ci sono diverse tecnologie PBF (powder bed fusion) che si differenziano a seconda della sorgente utilizzata per fondere strato per strato il letto di materiale. Tra le più importanti ci sono Direct Metal Laser Melting (DMLS), electron beam melting (EBM), Selective Laser Melting (SLM), and Selective Laser Sintering (SLS). La più diffusa è la SLM in cui le particelle metalliche vengono alimentate in strati di diverso spessore ed un raggio laser fonde le regioni desiderate della superficie. Successivamente un nuovo strato di polvere viene distribuito sulla piastra e la sorgente laser scioglie la polvere fino a quando la deposizione termina e si ottiene la forma finale.

- Deposizione ad energia diretta: anche per questo processo ci sono differenti tecnologie a seconda della sorgente che viene utilizzata per fondere il materiale: DED-L usa una testa laser, DED-EB un fascio elettronico.

Nei prossimi paragrafi verrà posta maggiore attenzione per le tecnologie a base di polvere LPBF e DED e per quelle a base di filo metallico WAAM e MMD.

2.4 Tecnologie a base di polvere

Le *tecnologie a base di polvere* [12] sono un insieme di processi di produzione additiva che utilizzano polveri di materiali, solitamente metallici, polimerici o ceramici, per creare oggetti tridimensionali strato per strato.

Le tecniche più diffuse di AM sono la Powder Bed Fusion (PBF) [13] e la Directed Energy Deposition.

In figura 8 è possibile vedere i diversi schemi di funzionamento delle due tecnologie sopracitate. Nel caso della PBF la polvere viene pre-dispersa su un supporto di costruzione prima dell'interazione con la fonte energetica, mentre nel caso della DED la polvere viene spruzzata sul supporto mediante l'ausilio di uno o più ugelli e contemporaneamente viene investita dal fascio energetico.

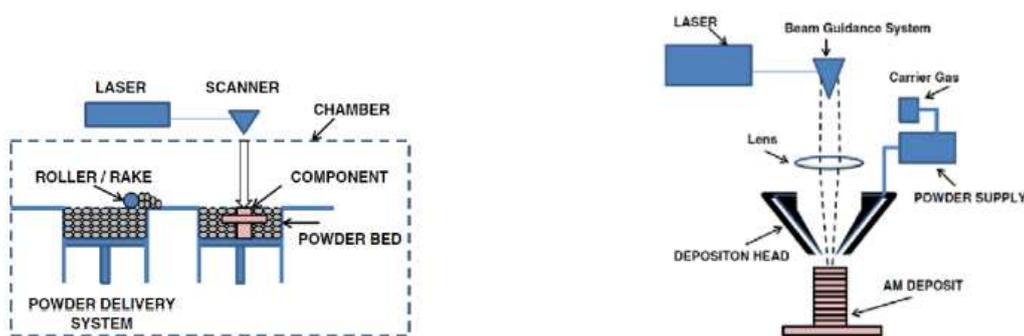


Figura 8: rappresenta lo schema di funzionamento del processo di PBF a sinistra e di DED a destra.

Entrambe le tecniche di AM iniziano con la creazione di un modello CAD (Computer-Aided Design) del particolare di interesse: infatti, il componente da produrre va ridisegnato in funzione della tecnica di produzione stessa.

Successivamente il disegno CAD va convertito file STL (Standard Tessellation Language), in cui la superficie del componente viene approssimata in una somma di triangoli. Questo secondo passaggio consente di avere un file molto più semplice ma con una perdita di alcune informazioni geometriche. In seguito, il file viene suddiviso in una serie di strati (operazione chiamata appunto *"slicing"*) che riproducono tutta la

geometria del pezzo e convertito nel formato specifico richiesto dalla macchina di stampa. A questo punto il file viene caricato nella macchina AM e può essere costruito. Quando il componente viene rimosso dalla macchina può rendersi necessario effettuare delle operazioni di pulizia, rifinitura superficiale o trattamento termico a seconda del grado di ottimizzazione della produzione.

2.4.1 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

Il termine *PBF* [14] comprende tutte le tecniche in cui un fascio di energia laser (L-PBF) o elettronico (EBM) viene sfruttato per fondere uno strato di un letto di polvere. Grazie all'uso della PBF è possibile realizzare componenti con un'elevata complessità geometrica e con una migliore finitura superficiale rispetto alle tecniche di DED.

La Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) [15] è un processo che ha origine nel 1994, anno in cui è stato brevettato da EOS come Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ed è anche conosciuta come SLM (Selective Laser Melting), termine introdotto dal Fraunhofer Istitute nel 1995.

Esistono diverse varianti [16] della tecnologia di fusione a letto di polvere e hanno tutte lo stesso principio di funzionamento: inizialmente viene creato il modello 3D tramite un software CAD; esso poi viene tagliato con uno slicer in più strati, con uno spessore compreso tra 20 e 60 micron. Successivamente vengono definiti e impostati i parametri di lavorazione, quali: la densità di energia volumetrica, la potenza del laser, la velocità di scansione, la strategia di scansione, la distanza tra le tracce, la dimensione dello spot laser e lo spessore dello strato di polvere. Tra questi i più importanti sono la potenza laser, la velocità di scansione, la distanza tra le tracce e lo spessore dello strato, il cui effetto combinato viene descritto dalla densità di Energia.

Il processo avviene all'interno di una camera chiusa, riempita con un gas inerte come Argon o Azoto, a seconda della reattività della polvere metallica utilizzata; la camera viene poi mantenuta in sovrappressione per minimizzare la contaminazione da ossigeno.

La realizzazione del componente (figura 9) avviene su una piattaforma riscaldata su cui, tramite un rullo, viene applicato uno strato di polvere. Il laser effettua la scansione della sezione trasversale, fondendo tra loro le particelle metalliche. Dopo che il primo strato è stato completato, la piattaforma si abbassa e viene distribuita nuova polvere. Grazie a questa piattaforma si riduce il gradiente di temperatura e le tensioni termiche che porterebbero alla deformazione del componente.

Il processo continua finché non si ottiene il pezzo desiderato.

Infine, la stampante 3D viene lasciata a raffreddarsi e la polvere non fusa deve essere eliminata dalla piattaforma: soltanto in alcuni casi, dopo aver effettuato una particolare operazione, la polvere non utilizzata può essere riutilizzata.

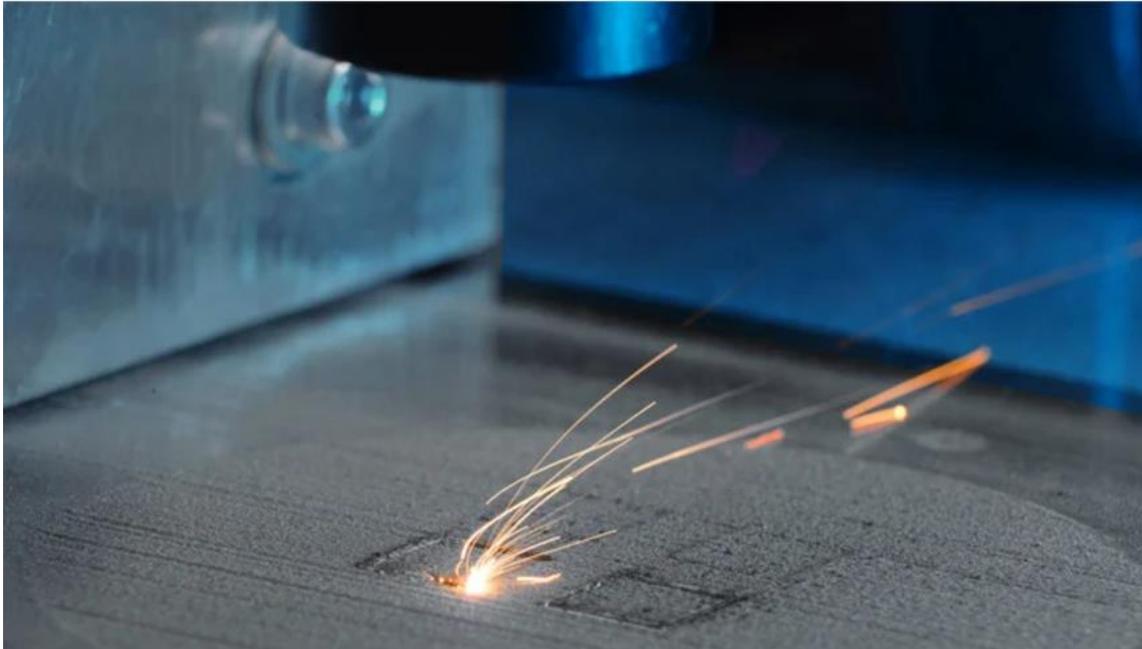


Figura 9: L-BPF: funzionamento della macchina

Utilizzare la Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) [17] ha innumerevoli vantaggi tra i quali:

- Elevata personalizzazione del design;
- Prototipazione rapida;
- Capacità di utilizzo di diversi materiali;
- Riduzione degli scarti di produzione;
- Ottimizzazione della produzione;
- Facoltà di progettare strutture integrate con controllo della porosità.

Tuttavia, come tutti i processi presenta anche i suoi svantaggi, quali:

- Possibile comparsa di ossidi e inclusioni la polvere di metallo viene fusa;
- Accessibilità limitata ad alcuni materiali metallici sotto forma di polvere
- Necessità di un post-processo
- Flusso di Marangoni: l'alta velocità di scansione determina il contatto, breve ma sufficiente a riscaldare e fondere le particelle di metallo, tra laser e letto di polvere. L'energia trasferita in questo intervallo di tempo va a determinare la

dimensione del melt-pool, all'interno del quale si sviluppa un flusso, "il Flusso di Marangoni". I gradienti termici che si sviluppano tra il centro del melt-pool e i bordi (l'interfaccia liquido-solido) alimentano il flusso.

In base alla lega metallica in questione si hanno gradienti di tensione diversi, che determinano il verso del "Flusso di Marangoni" [5]: quando il gradiente è negativo si crea un moto che va dall'interno verso l'esterno; se invece il gradiente positivo si genera il moto opposto (questo legame tra gradiente di tensione e moto viene illustrato in figura 10).

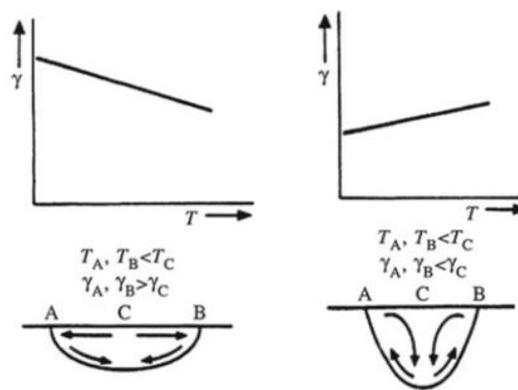


Figura 10: Grafico del legame tra gradiente di tensione e moto

2.4.2 Direct Energy Deposition (DED):

La Direct Energy Deposition (DED) [18] è una tecnologia di stampa 3D che principalmente viene impiegata per effettuare riparazioni su componenti già esistenti. Secondo la ASTM International "la Direct Energy Deposition (DED) ha la capacità di produrre pezzi relativamente grandi (volume di stampa $> 1000 \text{ mm}^3$) che richiedono una minima lavorazione meccanica e una lavorazione secondaria relativamente piccola. Inoltre, i processi di DED possono essere utilizzati per produrre componenti con gradienti di concentrazione o strutture ibride composte da vari materiali caratterizzati da diverse composizioni e strutture". Il processo inizia con la creazione di un modello 3D del pezzo tramite un software CAD. Poi, il modello viene diviso in tanti strati da uno slicer. Questa tecnologia consiste nel depositare il materiale su una base

o su un componente che viene riparato con l'utilizzo di un ugello montato su un braccio che si muove su più assi, solitamente 4/5. Il materiale metallico viene fuso mentre viene depositato, grazie a una fonte di calore come un laser o un fascio di elettroni [6] (in questo caso è importante che si lavori sottovuoto per evitare problemi di interazione tra elettroni e aria). Questo processo (figura 11) viene ripetuto più volte, strato dopo strato, fin quando non si ottiene l'oggetto desiderato.

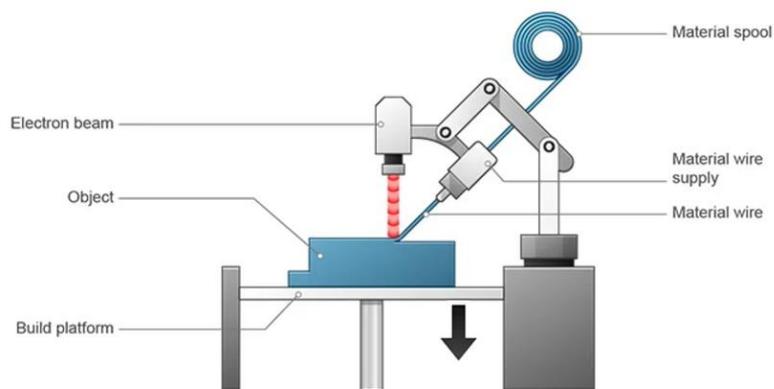


Figura 11: schema del processo di funzionamento della Direct Energy Deposition

Le macchine DED presentano la possibilità di variare e regolare diversi parametri di funzionamento in base al materiale che si sta utilizzando e in base alla geometria e del componente che si sta producendo. I parametri più importanti sono il flusso di polvere in uscita dagli ugelli, la potenza del fascio laser, la velocità di scansione del laser, lo spot size del laser, l'energia specifica e la distanza tra due linee di scansione parallele. Essi sono strettamente collegati tra loro: ad esempio la velocità di scansione è direttamente proporzionale al tempo di produzione del particolare e varia tra 1 e 20 mm/s, mentre la distanza tra due linee di scansione parallele è strettamente correlata alla dimensione dello spot del laser, da cui dipende lo spessore della traccia depositata. Inoltre, un singolo strato può essere scansionato con differenti strategie di deposizione, che hanno un notevole impatto sulle proprietà geometriche e meccaniche del pezzo prodotto.

La Direct Energy Deposition [14] rispetto alla Laser Powder Bed Fusion presenta una maggiore versatilità e una riduzione dei tempi di produzione, proprio grazie all'utilizzo di layer di spessore più elevato.

Tuttavia, la L-PBF consente di ottenere geometrie più complesse e un'elevata finitura superficiale.

2.5 Tecnologie a filo metallico

Le tecnologie a filo metallico [19] sono un tipo di processo di stampa 3D che sfruttano l'alimentazione di un filo metallico che viene fuso e depositato strato dopo strato per costruire oggetti tridimensionali o per riparare superfici di componenti esistenti. Queste tecnologie sono particolarmente adatte per applicazioni che richiedono alta resistenza e precisione.

2.5.1 Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

La Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) è un processo di produzione utilizzato per stampare in 3D o riparare componenti danneggiati; unisce due tecniche industriali: la saldatura ad arco con filo metallico e la stampa 3D.

La WAAM, la cui macchina di funzionamento viene mostrata in figura 12, utilizza un arco elettrico come fonte di calore e un filo metallico come materia prima. Sotto il controllo di software CAD, l'arco fonde il filo e costruisce il pezzo solido 3D strato dopo strato.

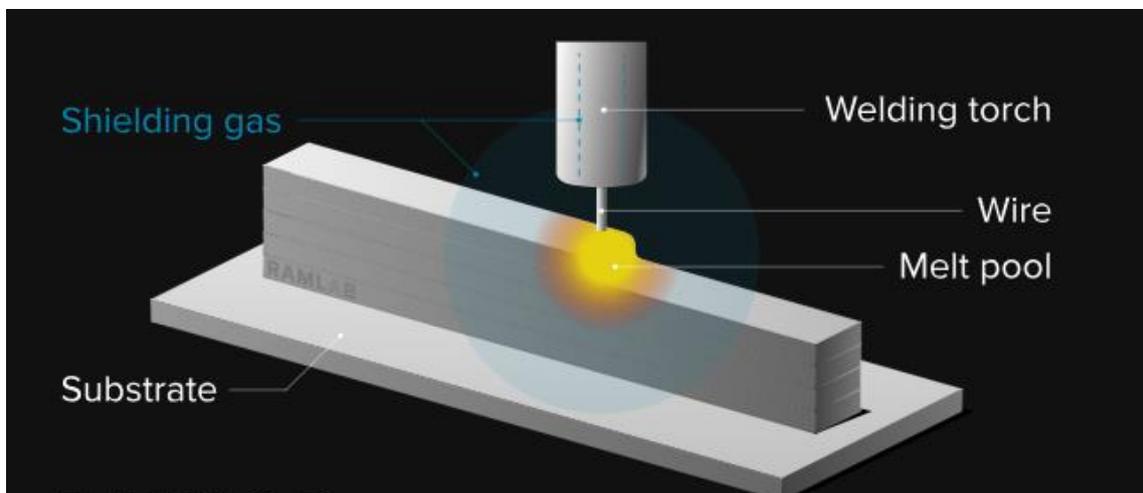


Figura 12: Macchina WAAM

In base alla forma della fonte di energia termica applicata, il processo WAAM può essere suddiviso in tre categorie (figura 13):

- GMAW saldatura ad arco metallico con gas;

- GTAW saldatura ad arco con tungsteno;
- PAW saldatura ad arco al plasma;

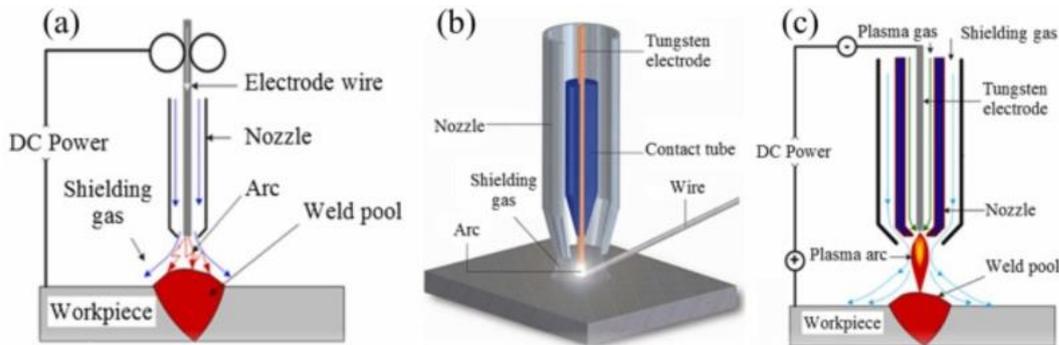


Figura 13: GMAW – GTAW – PAW

Vantaggi WAAM:

- Grandi dimensioni: WAAM permette di produrre parti molto grandi, oltre un metro cubo, usando robot e manipolatori speciali.
- Libertà progettuale: Si possono creare forme complesse e ottimizzare i progetti in modo più facile.
- Bassi costi iniziali: WAAM è più economico rispetto ad altri processi simili e consente una maggiore velocità di produzione.
- Ampia scelta di materiali: Si possono usare molte leghe metalliche, adattabili alle diverse necessità.
- Produzione ibrida: WAAM può essere combinato con metodi di produzione tradizionali per aggiungere funzionalità extra alle parti.
- Materiali combinati: È possibile progettare componenti che combinano più materiali per ottenere caratteristiche specifiche.
- Riduzione degli scarti: Si usa solo il materiale necessario, riducendo gli scarti fino al 50%, utile per materiali costosi.
- Migliori proprietà meccaniche: Le parti prodotte con WAAM possono avere proprietà migliori rispetto a quelle create con metodi tradizionali.

Capitolo 3

Alluminio e le sue leghe

3.1 Alluminio

L'alluminio, dal latino *Allumen* [20], è uno degli elementi più diffusi sulla terra, è secondo solamente a litio e ossigeno.

La sua storia ha origini antichissime: i greci e i romani utilizzavano l'allume, un sale di solfato di alluminio e potassio dodecaidrato, come farmaco per ridurre o arrestare un'emorragia.

L'alluminio si trova sempre combinato ad altri elementi ed è presente in numerosi minerali, tra questi il più importante è la Bauxite, dal francese *Bau*, una roccia di colore rosso intenso.

Il processo per la produzione di alluminio è diviso in due fasi distinte:

- Processo termochimico o Bayer: il minerale viene macinato in modo da avere una dimensione media dei grani piccola e calibrata.

Il minerale macinato viene caricato nei rulli che alimentano 2 polmoni: questi sono di decantazione, ovvero con la temperatura si tende a separare la componente acquosa della bauxite. Successivamente il sale si lega alla bauxite privata della componente acquosa e si formano i sali di $Al(OH)_3$. L'ossigeno e il sodio si legano per ossidazione a diversi elementi come silicio, fosforo, calcio e ferro, arrivando a un composto quasi puro.

In seguito, avviene la produzione di alluminia che è un composto bianco in polvere.

- Processo elettrolitico o Hall-Heroult: ci sono un catodo di carbonio e un anodo dove si deposita l'alluminio. La cella elettrolitica con scariche elettriche fa separare la componente ossigeno facendola legare a CO_2 liberando 4 atomi di alluminio.

In questo modo si produce alluminio industriale.

3.2 Leghe di alluminio

I principali elementi che si uniscono all'alluminio [21] sono:

- Rame: [22] aggiungendo il rame aumentano la resistenza e la durezza ma, quando il contenuto di questo elemento supera il 12%, la lega diventa drasticamente più fragile. Il rame migliora la lavorabilità del materiale e riduce la resistenza alla corrosione, anche a basse percentuali.
- Magnesio: conferisce alla lega una buona resistenza alla corrosione; infatti, le leghe Al-Mg, in ambiente marino, hanno proprietà migliori dell'alluminio puro. Queste leghe hanno buona duttilità e lavorabilità, per cui si prestano bene alle giunzioni mediante saldatura. Inoltre, il magnesio migliora le caratteristiche meccaniche dell'alluminio.
- Silicio: è il legante dell'alluminio più diffuso in quanto ne migliora le caratteristiche di resistenza e durezza, senza ridurre la duttilità e la resistenza alla corrosione. Le leghe di comune impiego hanno una percentuale di silicio compresa fra il 2 e il 15%.
- Manganese: svolge una funzione di tampone nei confronti del ferro, che è un elemento indesiderato. Grazie al manganese aumentano la tenacità, la duttilità e la resistenza alla corrosione della lega.
- Zinco: si trova nelle leghe destinate ad impieghi ad alte temperature in quanto migliora la resistenza a caldo dell'alluminio.
- Ferro: è un elemento indesiderato ma sempre presente nelle leghe di alluminio.

Il silicio è uno tra gli elementi che maggiormente si lega con l'alluminio; grazie ad esso si hanno notevoli miglioramenti: aumenta la fluidità della lega e diminuisce il coefficiente di espansione termica, consentendo una migliore colabilità all'interno dello stampo e permettendo, di conseguenza, un miglior riempimento anche di sezioni sottili.

Inoltre, dal diagramma di stato (figura 14) [9] si può notare che il silicio presenta poca solubilità nell'alluminio; dunque, esso tende a precipitare nella sua forma pura

sviluppando cristalli di durezza molto elevata che portano ad un rafforzamento della lega e ad un aumento della resistenza.

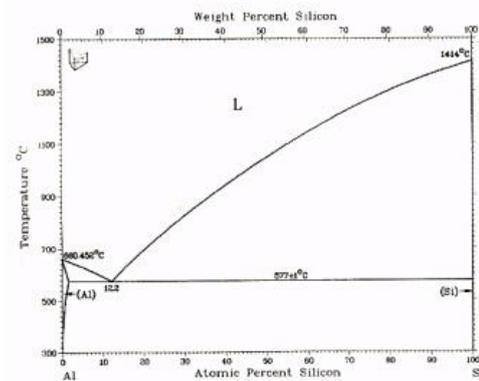


Figura 14: diagramma di stato Al-Si

Le leghe di alluminio possono essere divise in due grandi gruppi:

- Leghe da fonderia: permettono di ottenere la forma finale del pezzo attraverso un unico processo di colata all'interno dello stampo. Tuttavia, la solidificazione può determinare l'insorgere di difetti come ritiri o porosità all'interno dei getti che creano discontinuità di materiale e diminuiscono di molto la qualità del prodotto finale.
- Leghe da deformazione plastica: inizialmente vengono colate sotto forma di semi-lavorati che poi vengono sottoposti a processi di forgiatura, estrusione e laminazione per ottenere lastre, fogli, barre a sezioni differenti e prodotti semi-finiti.

Se si vogliono ottenere geometrie più complesse bisogna aggiungere un'ulteriore fase di formatura. Queste leghe sono caratterizzate da elevate proprietà meccaniche.

Tuttavia, le leghe da deformazione plastica presentano costi maggiori rispetto a quelle da incrudimento. In figura 15 vengono mostrate le leghe da fonderia e quelle da lavorazione plastica.

Alloy	Main alloying element
1xx.x	Pure aluminum, 99.00% max
2xx.x	Copper
3xx.x	Silicon, with added copper and/or magnesium
4xx.x	Silicon
5xx.x	Magnesium
7xx.x	Zinc
8xx.x	Tin
9xx.x	Other elements
6xx.x	Unused series

Alloy	Main alloying element
1xxx	Mostly pure aluminum; no major alloying additions
2xxx	Copper
3xxx	Manganese
4xxx	Silicon
5xxx	Magnesium
6xxx	Magnesium and silicon
7xxx	Zinc
8xxx	Other elements (e.g., iron or tin)
9xxx	Unassigned

Figura 15: Designazione leghe da fonderia e leghe da deformazione plastica

Tra le leghe di alluminio principali [23] ci sono:

- Leghe 1000: sono formate al 99,5% da alluminio quasi completamente puro. Esse hanno elevata resistenza alla corrosione, ottima conducibilità elettrica e termica, buona lavorabilità; tuttavia, hanno caratteristiche meccaniche molto basse.
- Leghe 3000: l'elemento principale è il Manganese. Questo tipo di leghe sono molto utilizzate nel settore automobilistico e negli scambiatori di calore in quanto hanno alta resistenza meccanica e ottima resistenza alla corrosione.
- Le leghe 6000: sono una classe di leghe a 3 componenti: alluminio, silicio e magnesio. Quest'ultime sono le più utilizzate e hanno un campo di applicabilità molto ampio. Tra le caratteristiche principali hanno buona lavorabilità a caldo e a freddo, buona resistenza alla corrosione, buone caratteristiche meccaniche e bell'aspetto e dopo la lucidatura.

Queste leghe sono molto utili per le strutture saldate e per ottenere prodotti da estrusione, magnesio e manganese vengono tenuti sotto l'1,5% in peso.

Leghe [24] da deformazione plastica:

- 1100
- 3003
- 5050
- 5252
- 5454
- 5082
- 5182
- 2011
- 2014
- 2024
- 6063
- 6061
- 6062
- 6066
- 6070
- 7001
- 7050

Nella presente tesi vengono analizzati campioni della lega AlSi₉.

AlSi ₉								
Elements	Al	Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Sr	others
Mean value in wt%	89.310	9.746	0.451	0.017	0.110	0.032	0.048	0.286
Standard deviation	0.080	0.060	0.0043	0.0005	0.011	0.0012	0.0002	

In questa tabella [25] è possibile vedere le percentuali degli elementi presenti in questa lega. Essa presenta ottima fusibilità, resistenza alla corrosione, leggerezza e buona conducibilità termica.

Le leghe AlSi vengono chiamate Silumin, termine coniato da Aladar Pacz nel 1920.

L'aggiunta di silicio aumenta la fluidità dell'alluminio allo stato liquido: questo, insieme al basso costo, rende le leghe silumin ottime per realizzazioni su scala industriale di pezzi per fusione.

Capitolo 4

Procedure sperimentali

4.1 Troncatura

Questa tesi si propone di esporre i risultati ottenuti sui provini 772 e 775 (in figura 16 viene illustrato il prodotto prima della lavorazione), analizzati durante l'attività di tirocinio. Quest'ultima ha avuto inizio con la preparazione dei campioni per le successive analisi [28].

Innanzitutto, mediante troncatrici tipo TR60 (figura 17), sono stati tagliati entrambi i provini lungo la sezione trasversale per poi studiare le proprietà meccaniche nella direzione di crescita.



Figura 16 Campioni prima di essere stati tagliati



Figura 17 Troncatrice

4.2 Microscopio digitale

Lo stereomicroscopio ottico è uno strumento ottico in grado di fornire un'immagine tridimensionale di un oggetto.

È costituito da due oculari separati, consentendo all'osservatore di percepire la profondità del provino in esame.

Gli stereomicroscopi hanno un sistema ottico a zoom che permette di cambiare il rapporto di ingrandimento senza modificare l'obiettivo: ciò consente di ottenere ingrandimenti continui.

In questo lavoro è stato utilizzato il microscopio digitale Leica DVM6. Esso è costituito da un obiettivo digitale, da un sensore che acquisisce le immagini, da luci LED e da uno zoom digitale.

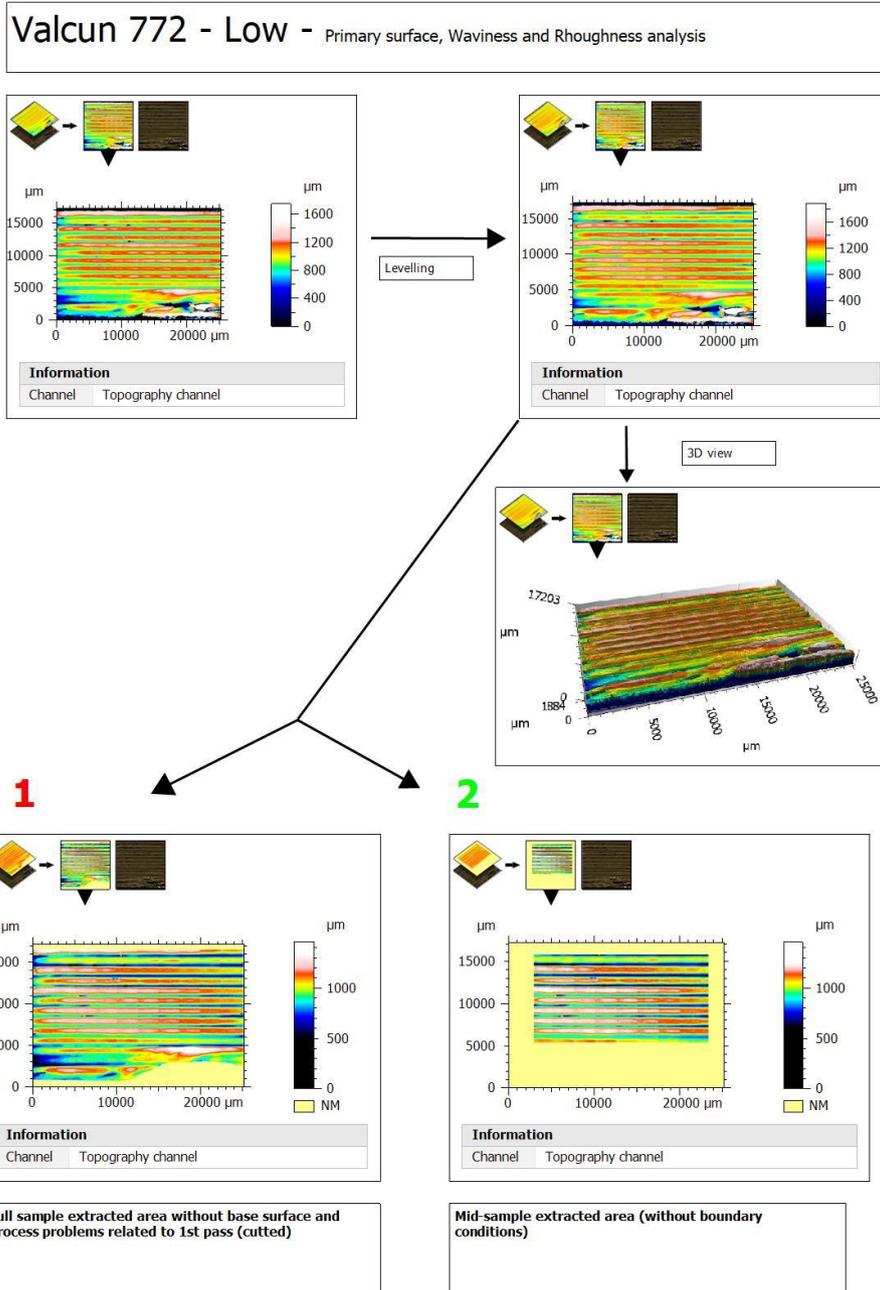
Ci sono tre tipi di obiettivi:

- Obiettivo a basso ingrandimento: ideale per panoramiche ampie;
- Obiettivo a medio ingrandimento;
- Obiettivo ad elevato ingrandimento: per osservare i dettagli più piccoli.

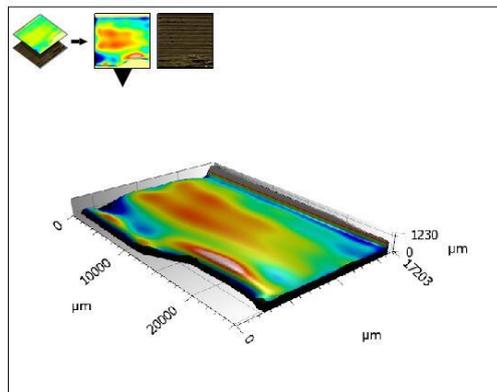
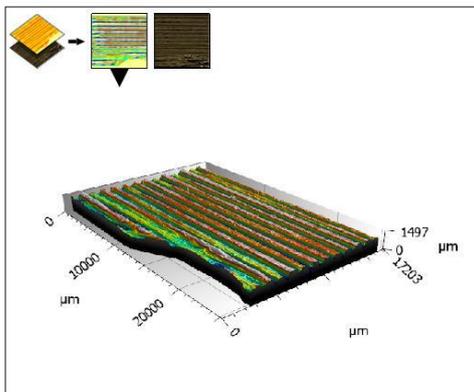
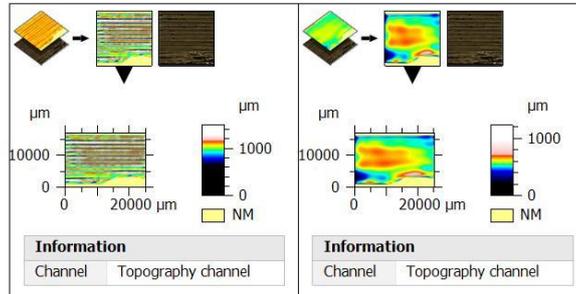
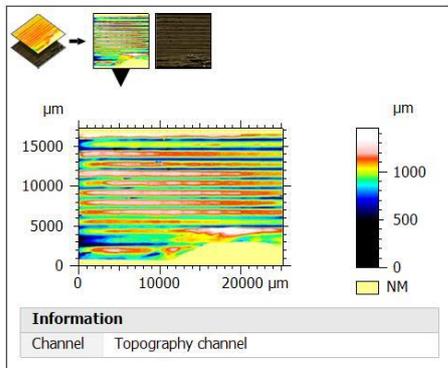
Questo microscopio è dotato di messa a fuoco automatica ed è direttamente collegato ad un computer che trasmette l'immagine.

Con il microscopio digitale Leica DVM6 sono stati visionati i due campioni e di entrambi sono state effettuate analisi sia sulla superficie ruvida sia sulla parte centrale.

772:



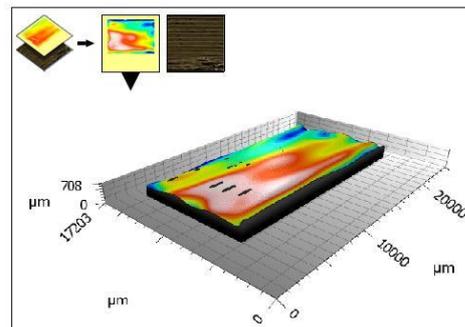
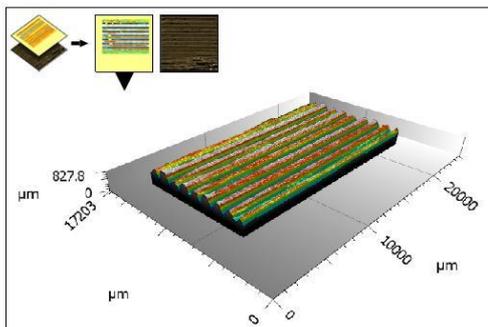
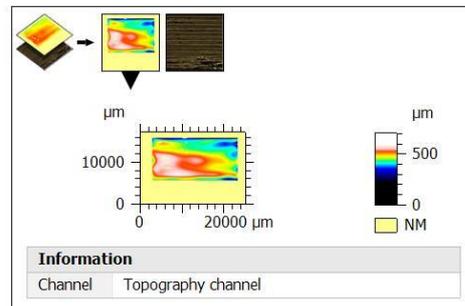
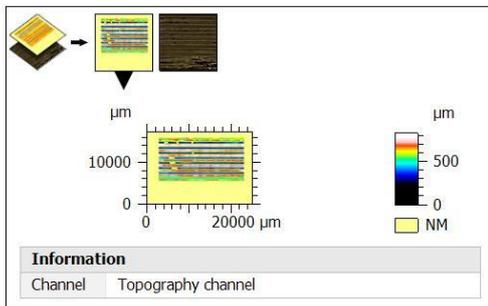
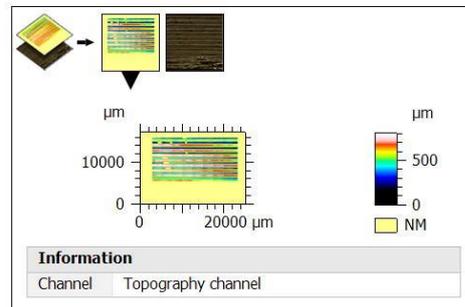
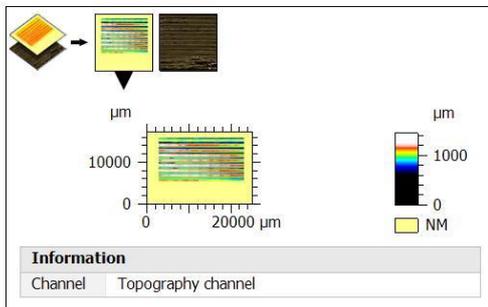
1-Rough surface analysis



ISO 25178 - Waviness...	
F-operation: None	
S-filter (λc): Gaussian, 0.25 mm	
Height parameters	
Sq	133.3 μm
Ssk	-0.5717
Sku	2.973
Sz	1221 μm
Sa	111.5 μm
Information	
The studiable contains non-meas...	

ISO 25178 - Roughnes...	
S-filter (λs): Gaussian, 0.8 μm	
F-operation: None	
L-filter (λc): Gaussian, 0.25 mm	
Height parameters	
Sq	10.24 μm
Ssk	-2.414
Sku	55.92
Sz	569.4 μm
Sa	6.285 μm
Information	
The studiable contains non-meas...	

2-Mid-surface analysis

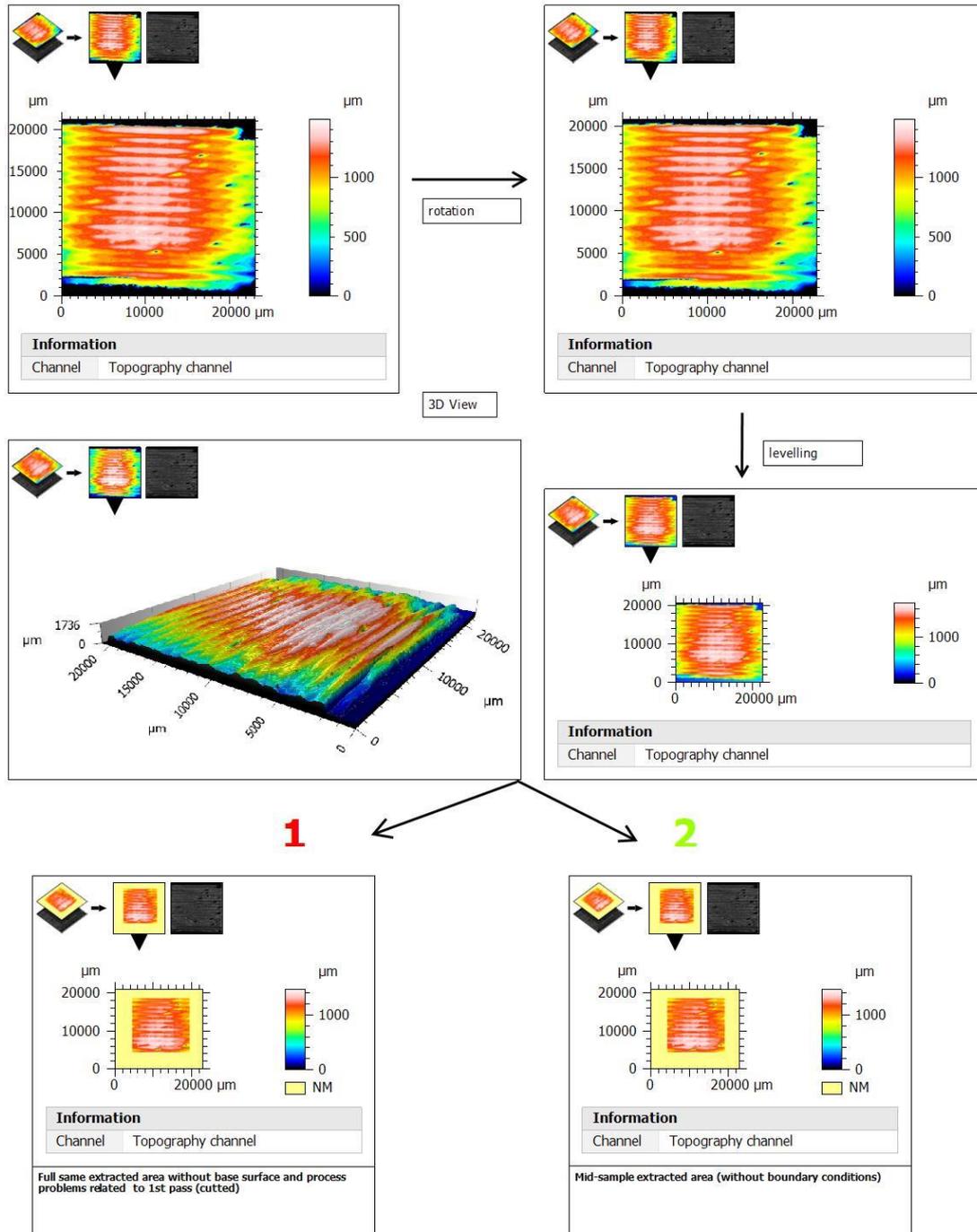


ISO 25178 - Waviness (S-F)			
<i>F-operation: None</i>			
<i>S-filter (λ_c): Gaussian, 0.25 mm</i>			
Height parameters			
Sq	131.3	μm	
Ssk	-0.6282		
Sku	2.339		
Sz	752.9	μm	
Sa	111.5	μm	
Information			
The studiabile contains non-measured poi...			

ISO 25178 - Roughness (S-L)			
<i>S-filter (λ_s): Gaussian, 0.8 μm</i>			
<i>F-operation: None</i>			
<i>L-filter (λ_c): Gaussian, 0.25 mm</i>			
Height parameters			
Sq	8.126	μm	
Ssk	-1.056		
Sku	6.156		
Sz	188.5	μm	
Sa	5.996	μm	
Information			
The studiabile contains non-measured poi...			

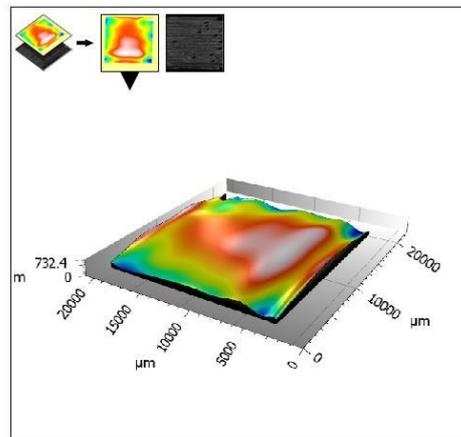
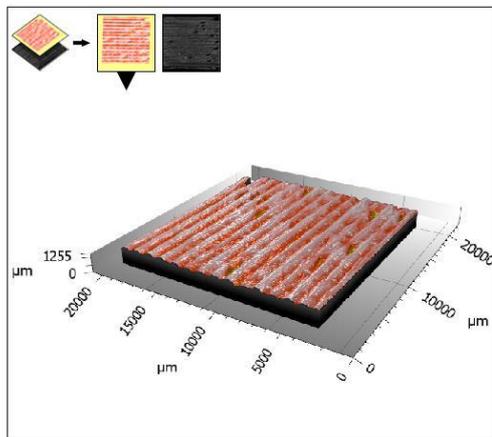
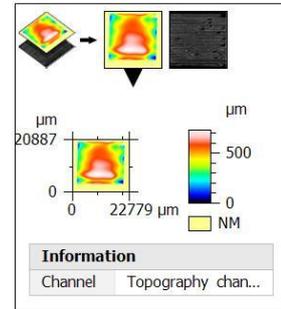
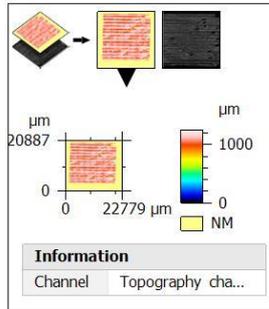
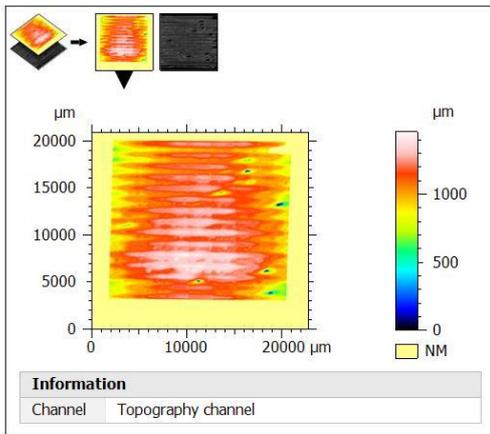
775:

Valcun 775 - High - Primary surface, Waviness and Roughness analysis



Leica Map Start 10.1.10606

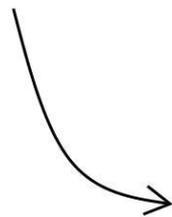
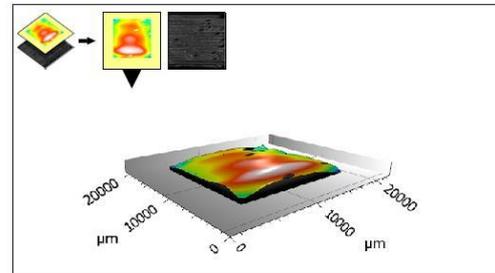
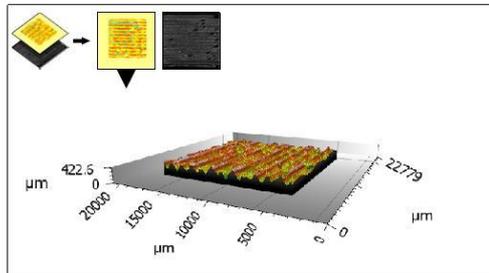
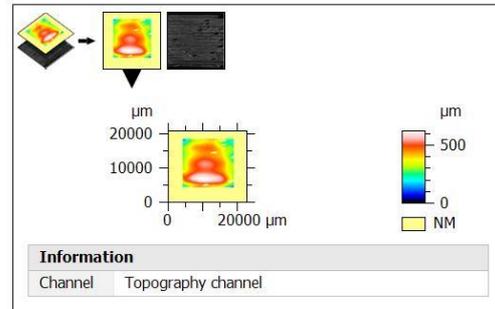
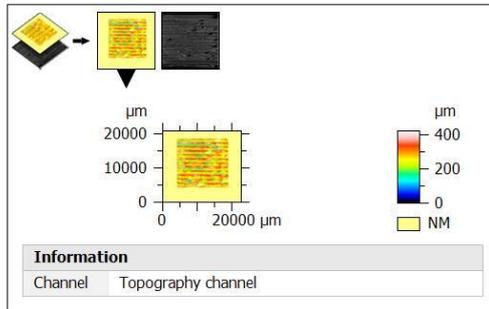
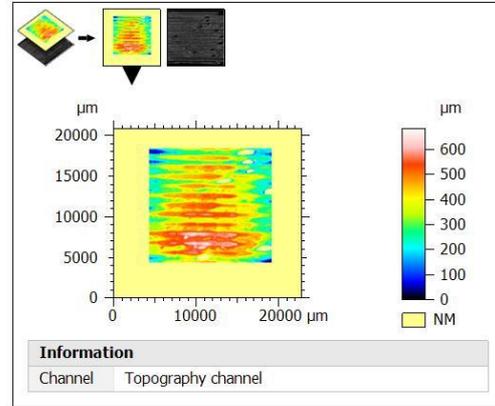
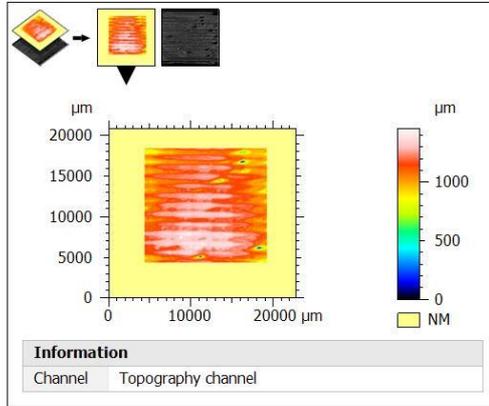
1 - Rough surface analysis



ISO 25178 - Waviness (S-F)		
<i>F-operation: None</i>		
<i>S-filter (λc): Gaussian, 0.5 mm</i>		
Height parameters		
Sq	61.80	µm
Ssk	-1.692	
Sku	13.75	
Sz	847.9	µm
Sa	45.95	µm
Information		
The studiable contains non-measured points....		

ISO 25178 - Roughness (S-L)		
<i>S-filter (λs): Gaussian, 0.8 µm</i>		
<i>F-operation: None</i>		
<i>L-filter (λc): Gaussian, 0.5 mm</i>		
Height parameters		
Sq	15.22	µm
Ssk	-6.121	
Sku	127.2	
Sz	635.0	µm
Sa	9.764	µm
Information		
The studiable contains non-measured points....		

2 - Mid surface analysis



ISO 25178 - Waviness (S-F)	
<i>F-operation: None</i>	
<i>S-filter (Ac): Gaussian, 0.5 mm</i>	
Height parameters	
Sq	47.88 μm
Ssk	-0.0495
Sku	2.616
Sz	316.8 μm
Sa	39.24 μm
Information	
The studiable contains non-measured points. Th...	

ISO 25178 - Roughness (S-L)	
<i>S-filter (As): Gaussian, 0.8 μm</i>	
<i>F-operation: None</i>	
<i>L-filter (Ac): Gaussian, 0.5 mm</i>	
Height parameters	
Sq	10.74 μm
Ssk	-0.2179
Sku	3.681
Sz	246.1 μm
Sa	8.692 μm
Information	
The studiable contains non-measured poi...	

Leica Map Start 10.1.10606

4.3 Inglobatura

I campioni destinati all'analisi dei vuoti sono stati preparati in modo da renderli facilmente maneggiabili: si è eseguita pertanto l'inglobatura in una pressa idraulica (figura 18-19) automatica mediante resina transottica. Quest'ultima è una speciale resina trasparente a caldo, caratterizzata da ottima trasparenza ed elevate durezza.

La resina transottica si stampa bene dai 130 ai 160 gradi per un intervallo di tempo compreso tra 7 e 12 minuti: in questa analisi i provini sono stati inglobati a 150 gradi per 8 minuti.

Infine, i campioni inglobati sono stati raffreddati per quattro minuti, in modo da consentire alla resina di indurirsi.



Figura 18 Provino nella pressa



Figura 19 Pressa idraulica

4.4 Assottigliamento meccanico

Per osservare il campione al microscopio ottico è necessario che la superficie sia piana e lucida; per renderla tale utilizziamo la smerigliatrice (figura 20) a dischi rotanti su cui montiamo le carte abrasive al SiC a grani progressivamente decrescenti: prima la 800 e poi la 1200.

Le carte sono classificate secondo una normativa internazionale e il numero presente su ciascuna di esse indica la densità media dei carburi di silicio per $inch^2$: minore sarà il numero riportato nella carta, minore sarà la densità di SiC e maggiore sarà la grossezza media dei singoli carburi presenti.

È importante mantenere il campione sempre nella stessa orientazione quando si usa una carta abrasiva e quando quest'ultima viene cambiata bisogna ruotare il provino di 90 gradi, in modo tale che siano progressivamente eliminati i segni lasciati sul campione dalla carta precedente.

Durante la lavorazione si usa acqua corrente come lubrificante e si aggiunge del sapone per evitare l'ossidazione.



Figura 20 Smerigliatrice

Successivamente bisogna osservare al microscopio ottico l'andamento della superficie lavorata e stabilire se si può proseguire con la lucidatura o se bisogna continuare con l'assottigliamento meccanico.

4.5 Lucidatura

La lucidatura (effettuata dalla macchina in figura 21) è un processo analogo all'assottigliamento meccanico, la differenza sta nell'utilizzo di una pasta diamantata (da 3 μm) e di un panno abrasivo.

In questa fase molto importante è la lubrificazione, effettuata mediante olio e sapone, perché il risultato finale deve essere una superficie perfettamente lucida a specchio, esente il più possibile da graffi.



Figura 21 Lucidatrice

4.5.1 Acquisizioni post-lucidatura

Dopo la lucidatura, sono state acquisite delle immagini (esempi nelle figure 22-23 e 24-25) al microscopio ottico dei vuoti e dei dettagli dei due campioni.

Questa procedura è stata effettuata con differenti ingrandimenti, andando a regolare di volta in volta messa a fuoco, luminosità e contrasto.

772:

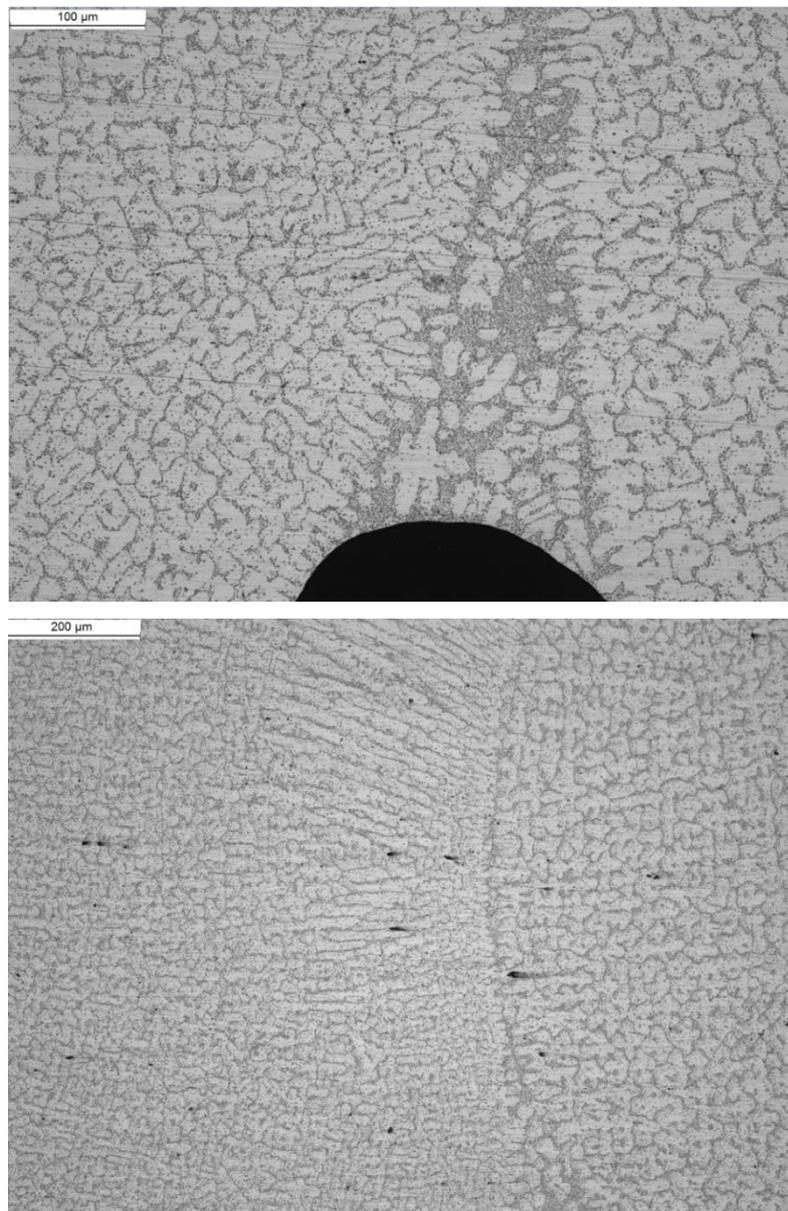


Figura 22-23 Micrografie vuoti e dettagli 772

775

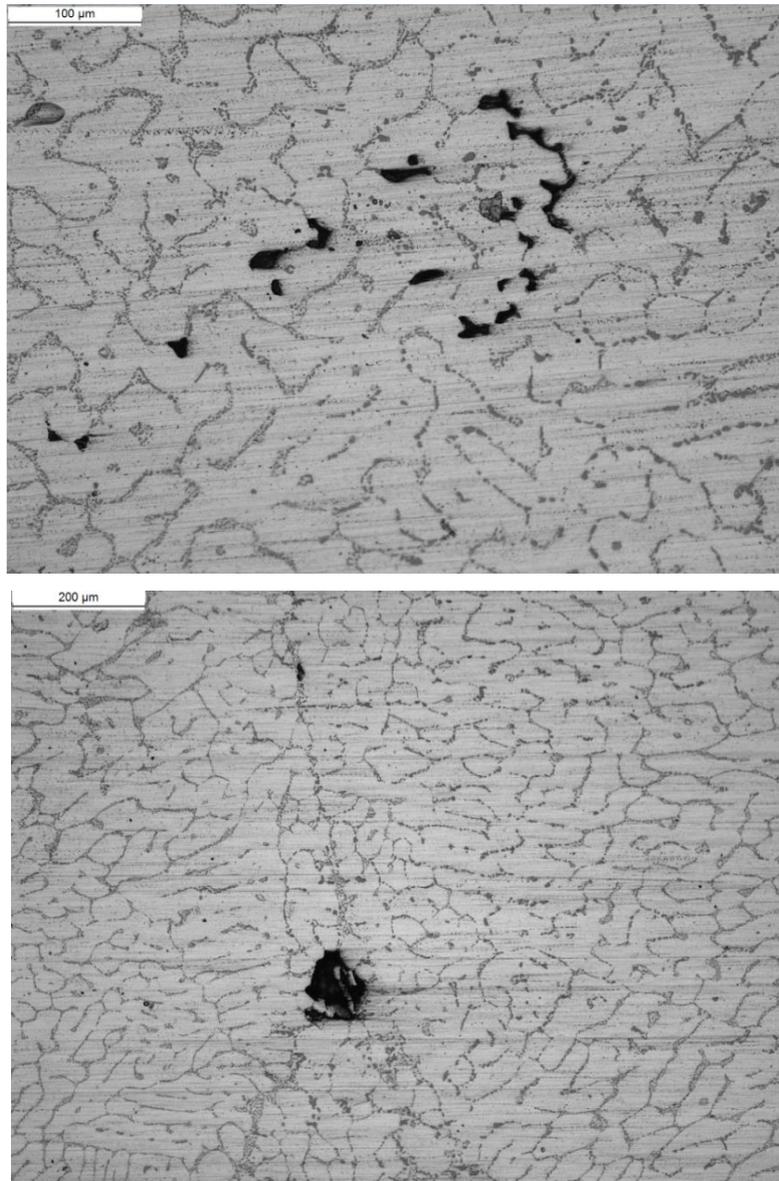


Figura 24-25 Micrografie vuoti e dettagli 775

4.6 Prove di microdurezza

I campioni sono stati sottoposti ad una prova Vickers (25 grammi forza per un tempo di 10 secondi). La prova di durezza Vickers si esegue applicando sul provino un carico mediante un opportuno penetratore a forma piramidale e misurando la superficie di impronta (visibile in figura 26).

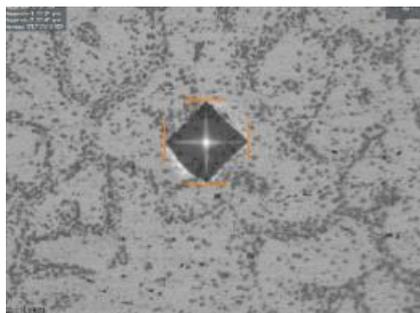


Figura 26 Esempio di impronta

Il test è stato eseguito con il Microdurometro Qness 60 A (figura 27-28) facendo una scansione al contorno e dell'intera lunghezza del provino. La procedura è stata la stessa per entrambi i campioni: essi sono stati posizionati sul piano di lavoro uno per volta. La torretta, abbassandosi tramite un cursore, si è posizionata sul provino prima con la lente desiderata e poi con il penetratore.

La messa a fuoco, la luminosità, la posizione e il numero delle impronte vengono definite grazie ad un sistema automatico della macchina.



Figure 27-28 Microdurometro Qness 60 A.

Nel successivo capitolo verranno riportati e analizzati i risultati di tale prova.

4.7 Attacco chimico

L'attacco chimico permette di mettere in risalto i dettagli della microstruttura del materiale, attaccando selettivamente le discontinuità in modo da creare un contrasto superficiale.

Questa procedura (figura 29) viene realizzata all'interno di una cappa e indossando i dispositivi di sicurezza, in quanto si interagisce con sostanze potenzialmente dannose per l'uomo.

Nel caso specifico dei campioni 772 e 775 l'attacco chimico è stato effettuato per un totale di 16 secondi per entrambi i provini, sui quali è stato depositato il reagente Keller, composto da acido fluoridrico, acido cloridrico, acido nitrico e acqua.

Successivamente i campioni 772 e 775 sono stati immersi in acqua, asciugati e osservati al microscopio elettronico a scansione (SEM).

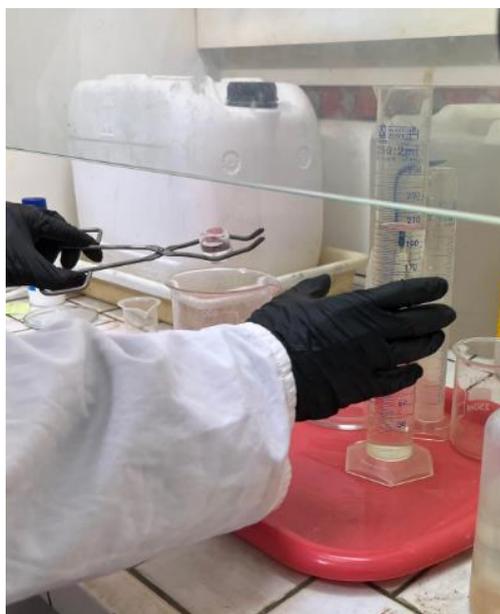


Figura 29 Campione sottoposto ad attacco chimico

4.8 Microscopio elettronico a scansione (SEM)

Dopo l'attacco chimico i campioni vengono analizzati con il microscopio elettronico a scansione (SEM), come quello in figura 30: in questo modo si riesce a osservare la microstruttura nel dettaglio.

Il SEM è costituito da:

- Cannone elettronico: genera il fascio di elettroni che interagisce con il campione;
- Lenti elettroniche, diaframmi e lenti di scansione;
- Sistema per ottenere il vuoto: il vuoto è necessario per consentire la generazione e il movimento degli elettroni del fascio incidente e per raccogliere quelli emessi dal campione.

I campioni SEM sono collegati ad un supporto detto stub, in cima al quale deve essere posizionata la parte di interesse del campione. Il collegamento tra stub e campione deve essere elettrico.

L'interazione tra fascio e campione produce dei segnali che sono di due tipi:

- Gli elettroni retrodiffusi (BSE): sono il risultato di collisioni elastiche che si verificano tra gli elettroni del fascio e gli atomi del materiale e si traducono in un cambiamento nella traiettoria degli elettroni. Essi forniscono informazioni sia morfologiche che compositive;
- Gli elettroni secondari (SE): sono il risultato di collisioni anelastiche. Essi forniscono informazioni solo morfologiche e non compositive.



Figura 30 Microscopio elettronico a scansione

4.9 Analisi vuoti

Per entrambi i campioni 772 e 775 viene eseguita l'analisi dei vuoti mediante il programma ImageJ.

La procedura per la caratterizzazione dei vuoti consiste in:

- scegliere per ogni campione 9 micrografie con la stessa scala da 200 micron, acquisite precedentemente con il microscopio ottico;
- aprire un'immagine per volta su ImageJ e settare la scala, come mostrato in figura 31;

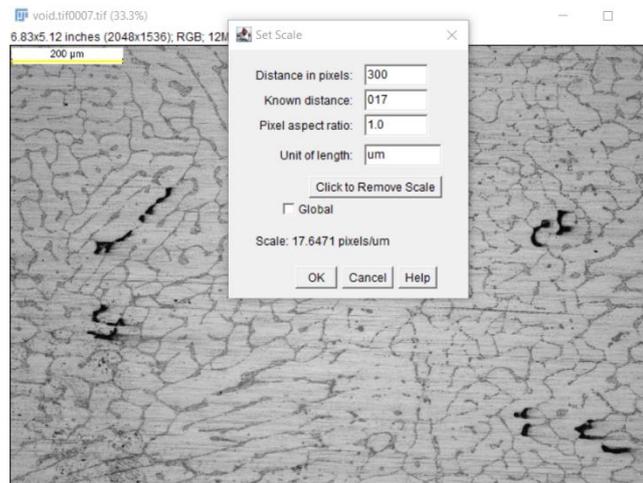


Figura 31 Impostazione scala

- cliccare sul comando plugins → segmentation → trainable weka segmentation in modo da assegnare alla categoria 1 i vuoti scuri e alla categoria 2 le parti grigie varie (figura 32) → Train classifier;

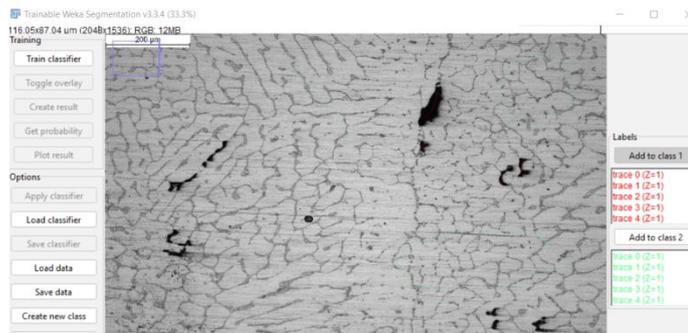


Figura 32 Assegnazione vuoti

- successivamente bisogna selezionare il comando get probability, in modo da ottenere una mappa in bianco e nero come nella figura 33;

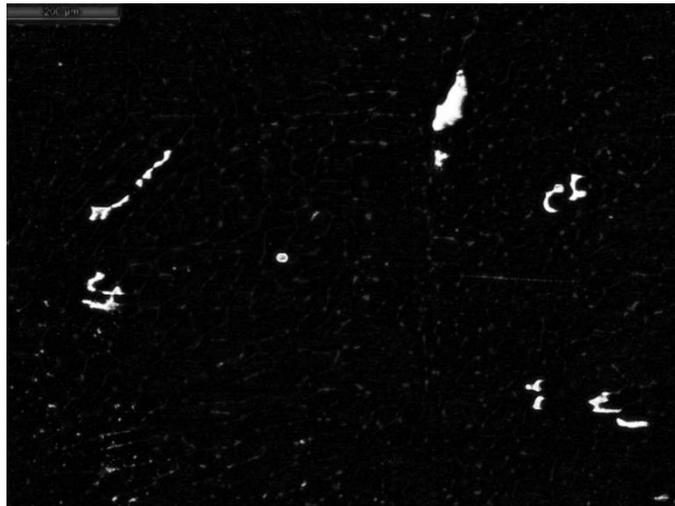


Figura 33

- cliccare su image e impostare 8 bit;
- selezionare una zona, evitando il marker, e poi Crop.;
- image → adjust → threshold -> apply;
- analyze → analyze particles e impostare i parametri come in figura 34 [28];

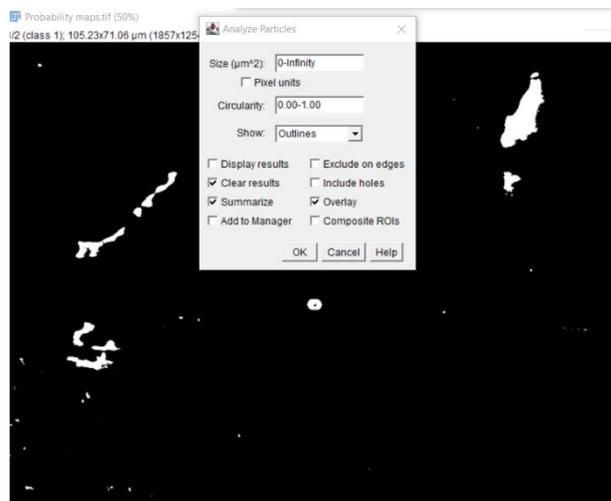


Figura 34

Tramite questa procedura è possibile ottenere il valore percentuale della porosità.

Capitolo 5

Risultati e conclusioni

5.1 Risultati Waviness e Roughness

Le analisi acquisite con il microscopio digitale Leica DVM6 hanno permesso di riportare i valori ottenuti su excel per poter ricavare una media dei valori Waviness e Roughness sia per il campione 772 che per il 775.

772:

Rough surface			Mid surface		
Wa	Ra		Wa	Ra	
118,5	6,203		121,5	5,772	
112,2	5,446		117,4	5,983	
116,4	7,391		115	5,812	
116,9	6,356		112,3	5,91	
120,7	6,384		111,8	5,984	
115,7	6,188		113,4	5,638	
114,8	6,089		103,9	5,41	
108,4	5,683		122	5,451	
108,4	5,461		116,9	5,844	
102,9	5,509		110,6	5,758	
105,2	5,522		115,7	5,81	
103,7	5,293		115,6	6,18	
104,7	5,307		104,3	5,687	
113,2	5,637		114,7	5,795	
114,8	5,991		114,6	5,817	
117,8	6,29		114,2	5,795	
120,8	6,2		112,6	5,709	
119	6,137		115,3	5,627	
116,9	6,276		115,9	5,723	
122	6,608		116,5	5,721	
media	113,65	5,99855	media	114,21	5,7713
dev stand	6,06522	0,52122	dev stand	4,44817	0,17407
mediana	115,25	6,113	mediana	114,85	5,7835
max	122	7,391	max	122	6,18
min	102,9	5,293	min	103,9	5,41

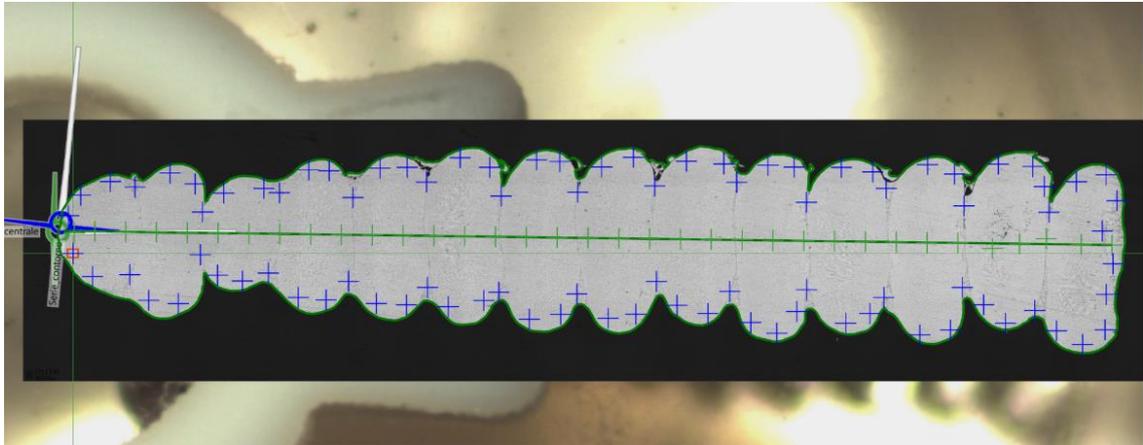
775:

Rough surface			Mid surface		
Wa	Ra		Wa	Ra	
44,21	9,474		42,71	8,477	
45,35	8,166		43,38	8,394	
49,14	7,919		39,65	8,237	
52,51	8,963		40,86	8,571	
48,11	8,527		29,48	7,053	
45,88	9,164		36,93	7,77	
40,39	9,311		43,87	8,606	
42,79	9,161		44,18	8,904	
44,79	9,077		44,28	8,477	
49,8	9,059		41,44	8,227	
50,07	8,243		39,42	8,687	
46,98	8,992		40,11	8,234	
44,08	8,372		43,48	8,383	
40,54	8,272		45,09	8,07	
46,22	8,943		40,22	7,773	
50,79	8,957		27,47	6,73	
43,15	9,302		30,94	7,597	
45,53	8,651		42,58	8,306	
33,92	7,414		42,04	7,754	
43,4	9,082		44,88	8,395	
media	45,3825	8,75245	media	40,1505	8,13225
dev_stand	4,26388	0,53729	dev_stand	5,15163	0,54501
mediana	45,53	8,957	mediana	41,74	8,2715
max	52,51	9,474	max	45,09	8,904
min	33,92	7,414	min	27,47	6,73

Da questi risultati si può facilmente vedere come i valori di Waviness e Roughness sono molto più alti per il campione 772.

5.2 Risultati prova di microdurezza

Campione 772



Serie centrale:

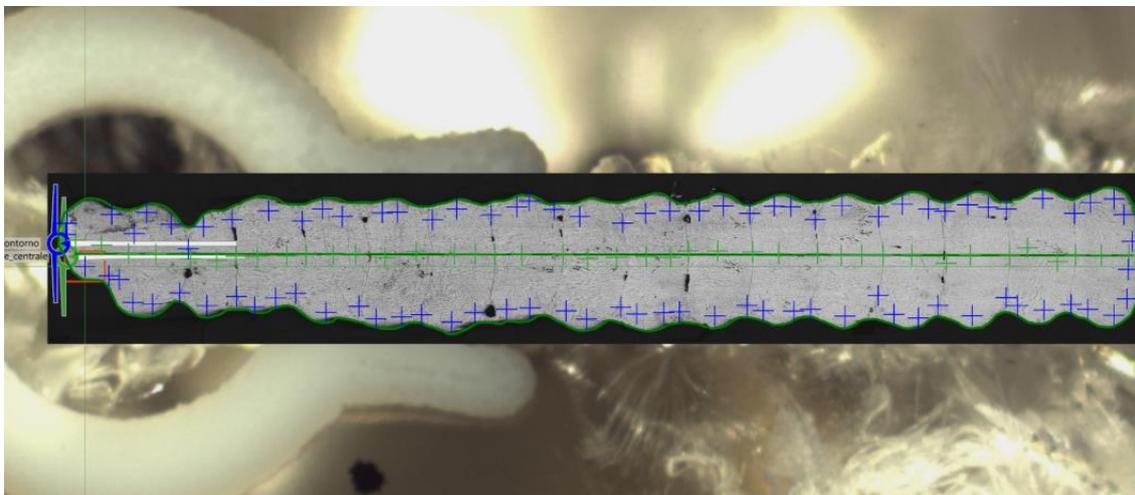
Statistics:

Mean value	Range	Hardness min.	Hardness max.	Standard dev.	Results OK
63,51	23,10	58,70	81,80	4,19	33,00

Serie al contorno:

Mean value	Range	Hardness min.	Hardness max.	Standard dev.	Results OK
64,08	27,20	53,80	81,00	6,69	77,00

Campione 775:



Serie centrale:

Mean value	Range	Hardness min.	Hardness max.	Standard dev.	Results OK
56,60	16,60	48,80	65,40	4,70	37,00

Serie al contorno:

Mean value	Range	Hardness min.	Hardness max.	Standard dev.	Results OK
63,08	36,60	52,70	89,30	5,93	86,00

Per entrambi i campioni, in riferimento ai valori medi riportati, si può notare una durezza maggiore nelle impronte eseguite al contorno rispetto a quelle al centro.

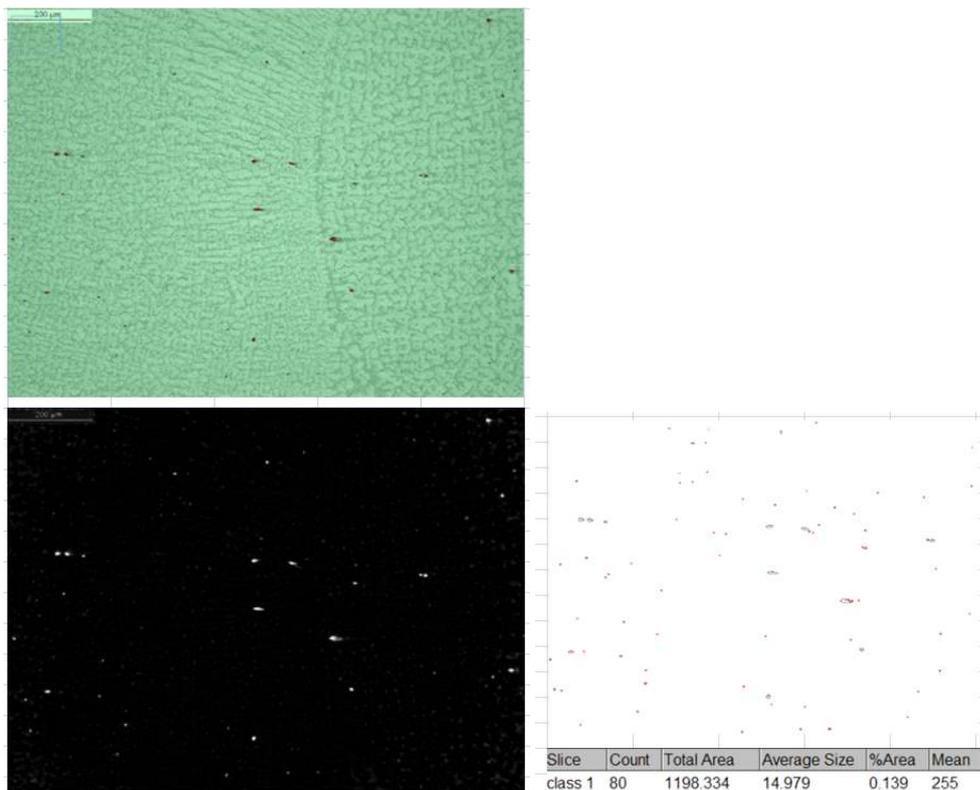
Inoltre, confrontando i risultati del campione 772 con quelli del 775 si evince che sia per le impronte al contorno sia per quelle al centro, i valori medi del 772 sono più alti di quelli del 775.

5.2 Risultati caratterizzazione dei vuoti

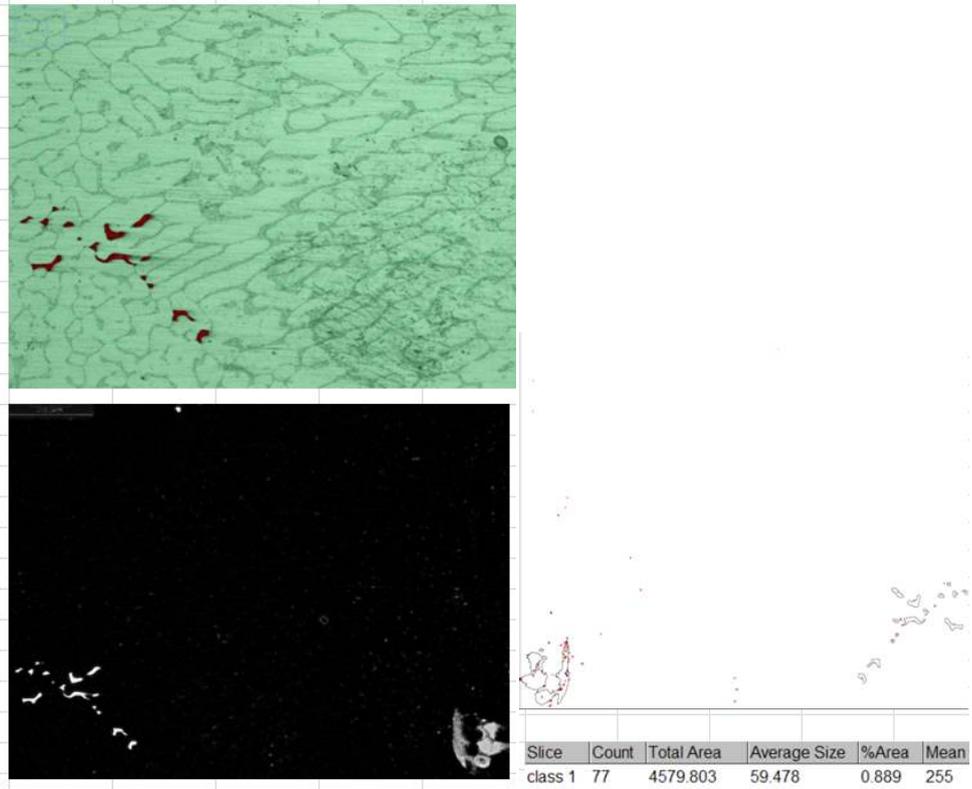
Con il programma ImageJ, la cui procedura di utilizzo è stata illustrata e spiegata nel capitolo precedente, è possibile ottenere i risultati dei valori percentuali della porosità per entrambi i campioni.

L'analisi svolta ha messo in luce che il campione 775 ha una porosità più elevata del 772: questo è possibile vederlo mettendo a confronto le immagini e risultati riportati di seguito.

772:



775:



5.3 Conclusioni

Questa tesi si concentra sullo studio di due provini 772 e 775 ottenuti tramite il processo di Molten Metal Deposition (MMD), sviluppato dalla ValCUN.

Questi campioni mostrano una struttura a strati, che porta ad avere una superficie ruvida e irregolare.

Dalle analisi condotte si evince che il 775 presenta una porosità più elevata rispetto al 772; ciò influenza le proprietà fisico-chimiche.

Questo risultato è confermato anche dall'osservazione visiva della superficie dei due campioni, visibili in figura 35 [40].



Figura 35 Campioni 772 e 775

Inoltre, dalla prova condotta con il Microdurometro Qness 60 A si può notare che i due provini presentano un range di durezza che oscilla tra i 55 e gli 80 HV.

Bibliografia

- [1] Sito dell'azienda ValCUN (WWW.valcun.be)
- [2] Articolo scientifico "Exploring impact, spreading, and bonding dynamics in molten metal deposition for novel drop-on-demand printing".
- [3] Articolo "Quali sono i diversi modi per realizzare parti in alluminio?" di Eddie Rodriguez.
- [4] Schema colata continua sito So.ra.me.
- [5] Articolo "La produzione dell'alluminio" di CiAl.
- [6] Articolo "Guida completa all'estrusione di alluminio", pubblicato il 24 gennaio 2023.
- [7] Articolo "Guida per il servizio di forgiatura dell'alluminio", pubblicato il 16 gennaio 2023.
- [8] Articolo "Processi di produzioni polveri per Additive Manufacturing: Ricerca e sviluppo" S. Galvagno, C. Borriello, S. Portofino, G. Pandolfi, P. Iovane
- [9] Articolo di 3Dnatives "Quali sono le tecnologie di stampa 3D".
- [10] Articolo di Prima additive "Vantaggi dell'additive manufacturing del metallo".
- [11] Articolo "Stereolitografia: tutto quello che c'è da sapere", pubblicato il 2 settembre da Nunzia A.
- [12] Tesi di Laurea Magistrale "Effetto dei principali parametri di processo sulla stabilità della pozza fusa durante un processo additivo di una lega di alluminio" di Jacopo De Carlo e Relatori Prof.ssa Mariangela Lombardi, Ing. Michele De Chirico.
- [13] Articolo di 3Dnatives "Laser Powder Bed Fusion (LPBF): tutto quello che c'è da sapere", pubblicato il 5 settembre 2021 da Nunzia A.
- [14] Articolo "PBF VS DED: quale processo di stampa 3D scegliere", pubblicato il 14 marzo 2023 da Nunzia A.
- [15] Tesi di Laurea Triennale "Analisi degli effetti del processo di laser powder bed fusion applicato ad acciai con diverso contenuto di carbonio" di Erika Di Domenico e Relatrice Prof.ssa Eleonora Santecchia.
- [16] Tesi di Laurea Magistrale "Aspetti metodologici per la qualifica del processo di fusione laser selettiva a letto di polvere per componenti metallici" di Federico Giuffrida e Relatori Prof. L. Iuliano, Ing. F. Calignano, Ing. M. Galati.

- [17] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, and A. Yadollahi, "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics," *Addit. Manuf.*, vol. 8, pp. 36–62, 2015.
- [18] Articolo scientifico "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges" *Composites Part B: Engineering* Volume 143, 15 June 2018.
- [19] Articolo scientifico "Additive manufacturing of ultra-high strength steels: A review" di *Journal of Alloys and Compounds* Volume 965, 25 November 2023.
- [20] Descrizione e cenni storici sull'alluminio dall'Enciclopedia Treccani di Nicoletta Nicolini.
- [21] Manuale "L'alluminio e le leghe leggere" di Daniele Veschi.
- [22] Dal sito Teknoring, articolo "alluminio(leghe)".
- [23] Articolo "Le migliori leghe nella lavorazione dell'alluminio", pubblicato il 26 ottobre 2018 da Profilati alluminio.
- [24] Materiale dispense di Metalli non ferrosi del Prof Marcello Cabibbo.
- [25] www.researchgate.net.
- [26] Articolo "Leghe metalliche: il silumin", pubblicato il 10 giugno 2012.
- [27] www.leica-microsystems.com.
- [28] Materiale dispense di Metodologie metallografiche della Prof.ss Eleonora Santecchia.