



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Corso di Laurea Triennale Ingegneria Meccanica

Caratterizzazione metallografica di campioni in acciaio 316L

realizzati mediante Fusione a Letto di Polvere

Metallographic characterization of Powder Bed Fusion

samples made from 316L steel.

Relatore:

Prof.ssa Eleonora Santecchia

Tesi di Laurea di:

Talal El Beick

Indice

1	Introduzione	5
2	Additive Manufacturing e Descrizione dei Processi	7
2.1	Stereolitografia:.....	8
2.2	Material Extrusion:	9
2.3	Material Jetting:	10
2.4	Binder Jetting	11
2.5	Powder Bed Fusion	12
2.6	Direct Energy Deposition	14
3	principali materiali metallici e leghe (Ti e leghe, Al e sue leghe, Ni e sue leghe, acciai) e principali proprietà	16
3.1	Leghe di Titanio	17
3.2	Alluminio	18
3.3	Acciai Inossidabili.....	19
3.4	Leghe a base di Nickel.....	20
3.5	Leghe a base di cromo cobalto.....	23
3.6	Metalli Preziosi	24
4	Procedure sperimentali	25
4.1	Processi Svolti in laboratorio.....	27
4.2	Descrizione componenti microscopio ottico ed il loro funzionamento.....	30
5	Risultati e discussione	32
5.1	Metodo di misura	39
5.2	Altri tipi di prove.....	40
6	Conclusioni.....	42
7	Ringraziamenti	43
8	Riferimenti	44

8.1	Bibliografia	44
8.2	<i>Sitografia</i>	44
8.3	Fonti immagini.....	46

1 INTRODUZIONE

La storia dell'uomo è stata segnata da innumerevoli eventi che hanno plasmato il suo percorso sulla terra, dalla sedentarizzazione delle prime tribù alla corsa verso lo spazio.

Uno degli eventi che furono critici per il suo sviluppo è la scoperta dei metalli, intorno al 6000 a.C. l'uomo imparò a fondere il rame per creare oggetti e utensili, il rame si era dimostrato un materiale superiore alla pietra per lavorabilità, peso e per la capacità di condurre calore, caratteristiche fondamentali per diverse applicazioni; esso veniva usato principalmente per la produzione di utensili agricoli ed armi rudimentali.

Nel 3000 a.C. l'uomo scoprì che combinando il rame allo stagno otteneva il bronzo, una lega metallica molto resistente e versatile; il bronzo fu usato per la produzione di armi, corazze, idoli e utensili da cucina; l'era del bronzo è stata segnata dalle prime grandi civiltà umane: Egizi, Sumeri, Ittiti, Babilonesi e Micenei.

Il ferro iniziò ad essere usato massicciamente nel 1200 a.C., nonostante che fosse noto sotto forma di ferro meteoritico alle civiltà del bronzo, queste non riuscirono mai ad estrarre il ferro nella sua forma grezza e raffinarlo per usarlo su larga scala, infatti degli archeologi affermano basandosi su dei registri rinvenuti nell'antica città di Ur, che oggetti in ferro erano rari e molto costosi.

Dall'epoca antica fino al diciottesimo secolo d.C. la lavorazione dei metalli ha avuto uno sviluppo lento con poche scoperte significative e tecniche innovative, con le rivoluzioni industriale e scientifica si ebbe un picco nella conoscenza dei metalli e delle loro lavorazioni, soprattutto per quanto riguarda la raffinazione dei metalli grezzi contenuti nei minerali, i progressi della chimica e fisica permisero una produzione massiccia di metalli tramite metodi innovativi, furono implementate nuove tecniche di lavorazione e migliorate quelle già esistenti.

Da questi sviluppi nacque la necessità di comprendere al massimo i metalli, le loro proprietà e da cosa sono influenzate, nasce la metallurgia come scienza che classifica e studia i metalli, uno strumento molto utile per la metallurgia è la metallografia che permette di osservare la superficie dei metalli per determinare caratteristiche come la dimensione dei grani cristallini, le fasi presenti ed eventuali difetti.

Con l'avvento della computerizzazione ed automazione dei processi industriali nasce la manifattura additiva, la manifattura additiva o additive manufacturing in inglese è una tecnologia che si basa sulla solidificazione progressiva di strati su strati di materiale che alla fine andranno a costruire in pezzo riducendo gli sprechi, queste tecnologie hanno il potenziale di rivoluzionare ancora una volta i processi di produzione industriali e di conseguenza le nostre vite, ma hanno ancora diverse limitazioni tra cui le dimensioni massime dei pezzi prodotti, la bassa quantità di pezzi prodotti, elevato costo delle macchine e la difficoltà di smaltimento di alcuni materiali adoperati.

Se questi ostacoli verranno superati l'additive manufacturing potrebbe essere responsabile di una nuova rivoluzione industriale.

2 ADDITIVE MANUFACTURING E DESCRIZIONE DEI PROCESSI

L'additive manufacturing è una tecnologia che consente di realizzare oggetti tridimensionali andando a solidificare progressivamente strato su strato di materiale, tramite essa si possono costruire oggetti unici con forme molto complesse riuscendo comunque ad avere pochissimi scarti.

Nel 1986 Charles W. Hall registra il brevetto della prima tecnica AM, detta anche **stereolitografia**. Essa si basa sulla solidificazione tramite un fascio di luce che avvia la polimerizzazione un una serie di punti specifici che andranno a formare un layer dell'oggetto, in seguito sulla base del layer precedente si ripete il processo fino a quando l'oggetto non è completo.

Al giorno d'oggi possiamo stampare non solo i polimeri ma anche i metalli e le ceramiche grazie a delle tecniche sviluppate negli ultimi decenni, nell'immagine sottostante queste vengono classificate.

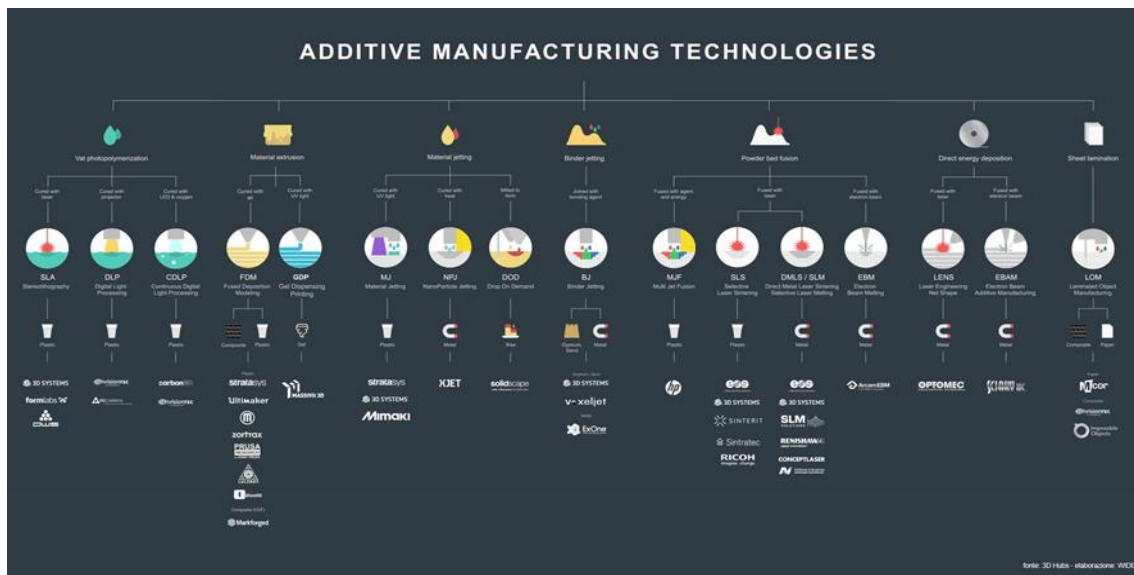


Figura 1 Classificazione delle tecnologie di manifattura additiva

Le tecnologie che analizziamo per i polimeri sono:

1. Stereolitografia
2. Material Extrusion
3. Material Jetting
4. Binder Jetting

Mentre per i Metalli sono:

1. Powder Bed Fusion (LPBF e EBM)
2. Direct Energy Deposition

2.1 STEREOLOGRAFIA:

In questa tecnica si ha una vasca di polimeri fotosensibili allo stato liquido, tramite un sistema di specchi un laser va a tracciare l'area della sezione innescandone la polimerizzazione che va a solidificare solo la superficie colpita dal laser andando a formare un layer, una volta completata la solidificazione il piattello si abbassa e si ripete il processo per i successivi layer così da ottenere il nostro oggetto 3d.

Al posto del laser si possono usare degli schermi LCD che vanno a polimerizzare tutta la sezione del layer indipendentemente dalla sua area totale, ciò è vantaggioso dato che il tempo di stampa è funzione solo dell'altezza del pezzo ma non della sua superficie.

Questa tecnologia ha ci consente di utilizzare materiali trasparenti e biocompatibili senza rinunciare ad una buona resistenza meccanica, inoltre proprio grazie agli LCD si possono raggiungere elevate velocità di stampa.

Queste caratteristiche la rendono una delle tecniche più diffuse e la sua applicazione più diffusa è la prototipazione rapida; ma nonostante questi vantaggi ha dei difetti non trascurabili: la complessità delle stampanti e dei loro sistemi di controllo fanno sì che la tecnologia sia piuttosto costosa, i materiali di stampa devono essere custoditi in condizioni ben precise per evitare che durante la stampa si creino dei difetti, una volta completata la stampa bisogna andare a rimuovere manualmente i supporti cosa che aumenta la mano d'opera richiesta ed i tempi di realizzazione, due elementi che vanno ad influire negativamente sui costi di produzione, infine siamo vincolati a realizzare tutta la stampa in un unico materiale. Questa tecnologia permette di raggiungere tolleranze di +/- 0,15mm e spessori di layer minimi di 0,0016mm.

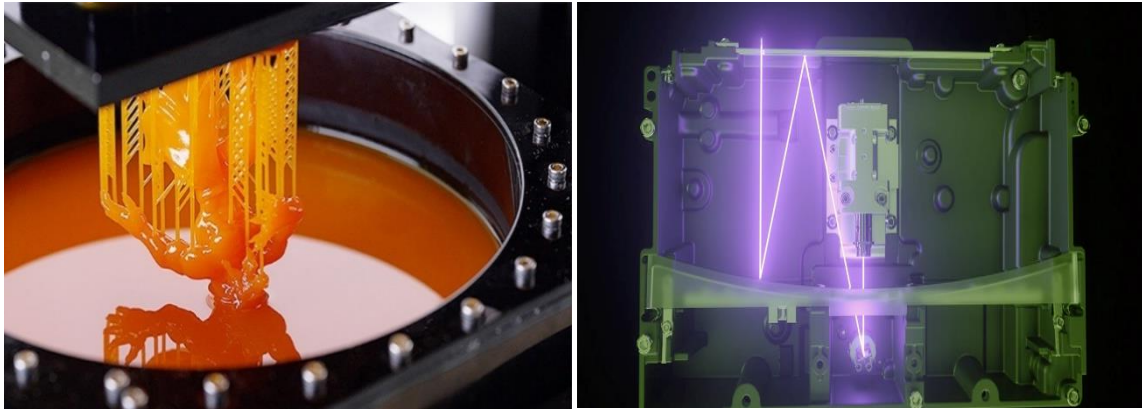


Figure 2 e 3 Oggetto appena stampato e sezione del funzionamento

2.2 MATERIAL EXTRUSION:

I materiali che utilizziamo in questa tecnologia sono una classe di polimeri termoplastici che vengono riscaldati e fusi per poi essere depositati attraverso un estrusore in una serie di punti che formeranno l'area di un layer, a differenza della stereolitografia il tempo di stampa dipende anche dall'area un layer e non solo dall'altezza del pezzo da stampare, la deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consente la stampa dal basso verso l'altro.

Durante la fase di progettazione della stampa è fondamentale che si tenga presente la necessità di integrare delle strutture di supporto al fine di non andare incontro al collasso della struttura durante la fase di stampa, cosa che sprecherebbe tempo, materiale e denaro.

I materiali che vengono adoperati in questa tecnologia sono polimeri termoplastici ma ciò che li differenzia è il campo delle loro applicazioni: ad esempio materiali come PLA, PP e PET vengono usati spesso per la creazione di modelli o prototipi, mentre materiali come il PLAHT vengono utilizzati nel campo medico, aerospaziale e nell'automotivo; infine, in casi eccezionali al posto di materiali polimerici si possono usare sostanze alimentari come cioccolato e zucchero.

Gli svantaggi di questa tecnologia sono: gli elevati tempi di stampa che la escludono dalla produzione di massa industriale e le grezze rifiniture superficiali; infatti, se si analizza il pezzo appena completato si possono distinguere senza problemi i vari layer che

compongono il materiale ma le superfici possono essere migliorate tramite trattamenti post stampa come la sabbiatura, l'abrasione chimica e verniciatura.

Le Caratteristiche di stampa sono che si ha una tolleranza superficiale di +/- 0,2mm con uno spessore dei layer medio di 0,15mm.

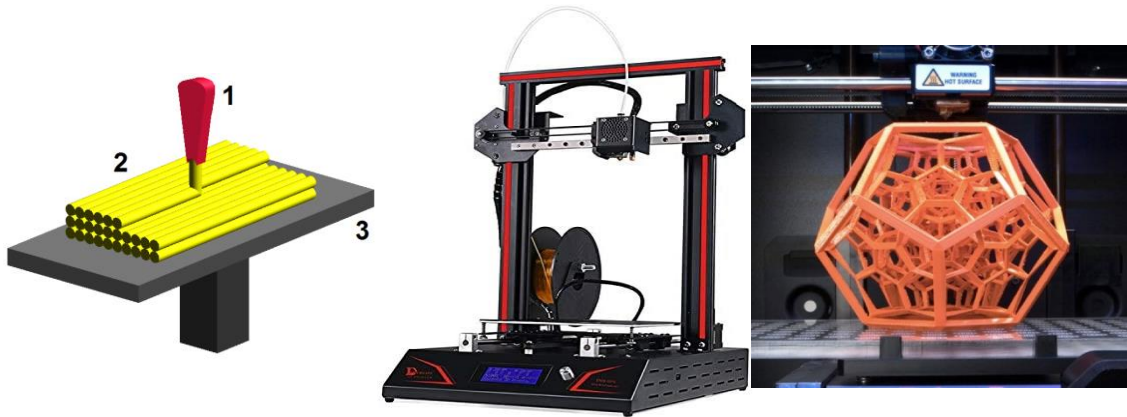


Figure 4, 5 e 6 Formazione dei layer, stampante ed oggetto appena stampato

2.3 MATERIAL JETTING:

Questa tecnologia si basa sulla polimerizzazione dei polimeri fotosensibili ma a differenza della stereolitografia il polimero viene depositato tramite una testina simile a quella delle stampanti inkjet per poi essere solidificata da una fonte di luce uv che segue la testina.

Delle tecniche di additive manufacturing per polimeri questa è la più costosa, infatti una singola stampante può raggiungere le centinaia di migliaia di euro; d'altro canto, le caratteristiche di stampa sono nettamente superiori rispetto alle altre tecniche, inoltre durante la stampa è possibile cambiare il polimero che stiamo depositando permettendo di creare stampe colorate di alta qualità senza la necessità di ulteriori lavorazioni.

Dei gravi svantaggi sono che i pezzi stampati per material jetting hanno caratteristiche meccaniche basse e sono sensibili alle condizioni ambientali in cui si trovano, se sottoposti ad agenti atmosferici questi si degradano.

Viene adoperata in campo medico, elettronica, per la creazione di stampi a cera persa e prototipazione rapida.

Le caratteristiche di stampa sono: spessore minimo del layer 0,015mm tolleranza superficiale di +/-0,025mm

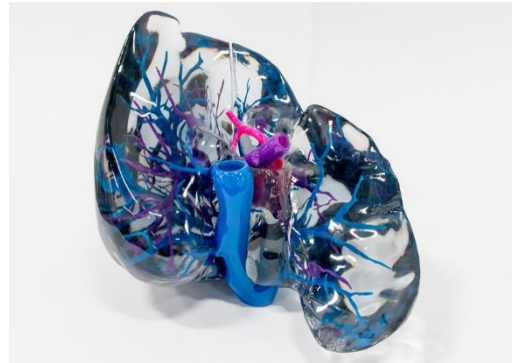
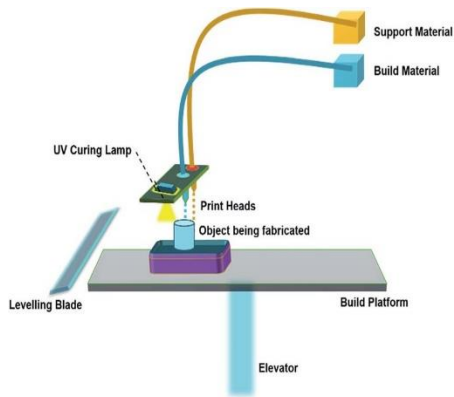


Figure 7 e 8 Schema di funzionamento ed organo stampato

2.4 BINDER JETTING

Quest'ultima tecnologia non riguarda solo i polimeri come le altre ma anche sabbia e polveri metalliche, le quali vengono unite da un legante che va a creare una forma tridimensionale porosa, rispetto alle altre tecnologie è molto più economica e la qualità dello stampato è minore, ciò la rende una tecnica usata solamente per scopi estetici dato che anche le caratteristiche meccanica lasciano a desiderare. Il suo funzionamento è simile a quella del material jetting ma al posto dei polimeri ho delle polveri ed al posto della luce ultravioletta ho il legante che andrà a consolidare le polveri.

Le caratteristiche di stampa sono: spessore minimo layer 0.09mm con tolleranze superficiali di +/- 0.13mm

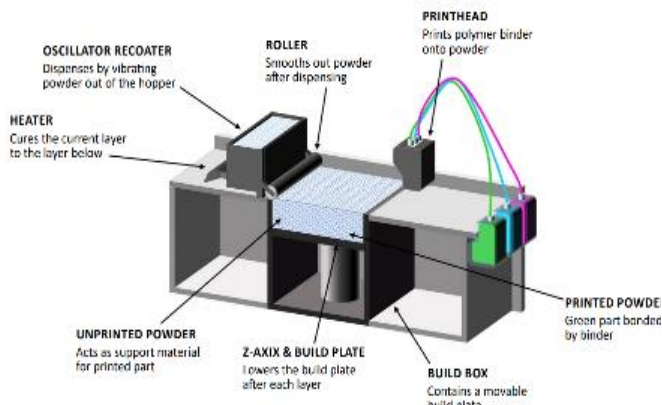


Figure 9 e 10 Schema di funzionamento Binderjetting ed oggetto stampato

Adesso che abbiamo elencato tutte le tecniche adoperare per i polimeri andiamo ad analizzare quelle che adoperiamo per riuscire a stampare i metalli.

Le tecniche che analizzeremo sono la Powder Bed Fusion e la Direct Energy Deposition.

2.5 POWDER BED FUSION

È un insieme di tecnologie che si basano sulla fusione di aree particolari del letto di polvere metallica al fine di poter creare un layer di metallo solido per poi ricoprirlo con un altro strato di polvere andando a ripetere il processo fino a quando non abbiamo una struttura tridimensionale, per fondere le polveri ci sono due modi: tramite un laser oppure tramite un fascio di elettroni, vengono chiamati laser powder bed fusion (LPBF) e electron beam melting (EBM).

LPBF

Sviluppato nel 1995 nell'Istituto Fraunhofer di Aquisgrana da un gruppo di ricercatori tedeschi, questa tecnica è capace di sciogliere completamente il granello di polvere permettendo la creazione di un solido tridimensionale, ciò viene fatto tramite un laser con un alto rapporto potenza/densità. Andiamo ad inserire le polveri metalliche nella macchina, questa prima di inserire le polveri nell'ambiente di stampa va a creare un'atmosfera priva di ossigeno con dei gas inerti come azoto o argon, una volta distese le polveri il laser inizia a tracciare una serie di punti che formerà la superficie del layer andando a fondere tutte le particelle in questa, una volta completata la fusione e consolidazione del layer si va a deporre un nuovo strato di polvere metallica sopra di questo per ripetere il processo; una volta completato la stampa si va ad estrarre il pezzo dalla forma con il risultato di forme geometriche anche complesse a costo di pochissima polvere sprecata nel processo.

Il laser viene controllato tramite una serie di specchi che riflettono il fascio di luce per colpire solamente i punti desiderati, tutte le sue caratteristiche sono fondamentali per il processo di stampa e spesso accade che per ogni lega si ha bisogno di configurazioni diverse. I materiali adoperati per la stampa sono polveri di leghe di Titanio, Acciaio, Alluminio, Tungsteno e Nichel; le polveri devono essere purissime al fine di non causare

difetti e non devono essere esposte ad atmosfere contenenti ossigeno per non subire l'ossidazione.

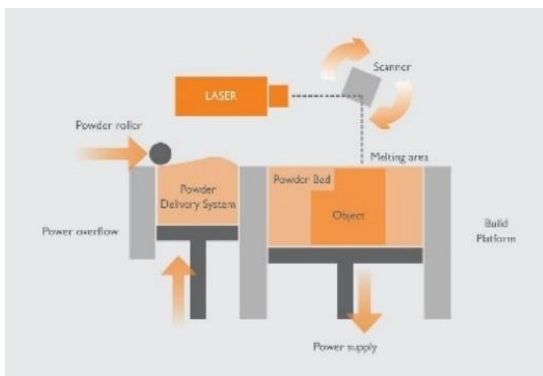


Figure 11 e 12 schema funzionamento lpbfd ed oggetto stampato

EBM:

Il processo di produzione inizia con la generazione del vuoto nell'ambiente di stampa, una volta raggiunto la polvere verrà introdotta e distesa nell'area di stampa per poi essere riscaldata fino alla temperatura desiderata (le temperature in questione possono superare i 1000 C), arrivati a questo punto inizia il processo di stampa con il fascio di elettroni che fonde le parti desiderate; il fascio di elettroni viene controllato tramite lenti elettromagnetiche e ciò rende il direzionamento del fascio quasi istantaneo contribuendo a diminuire il tempo di stampa; essendo il fascio carico negativamente è

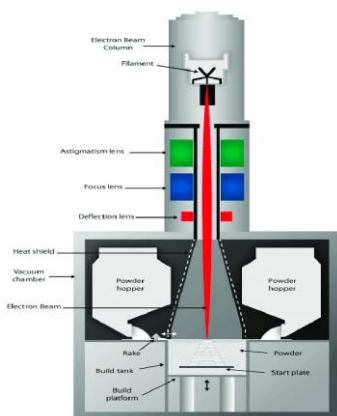


Figure 13 e 14 Schema creazione fascio di elettroni ed oggetto stampato necessario che la conduttività del materiale sia sufficiente, altrimenti si formeranno densità di carica e ciò devierebbe gli elettroni dal punto destinato

Queste due tecnologie sembrano molto simili ma il risultato finale delle stampe ci mostra che non è così, la seguente tabella mostra alcune differenze.

CARATTERISTICHE	EBM	LPBF
MATERIALI	Metalli (conduttori)	Metalli e ceramiche
COSTI	Medio	Alto
FINITURA SUPERFICIALE	Medio-bassa	Medio-Alta
RISOLUZIONE	Media	Alta
CONSUMO ENERGETICO	Medio	Alto
VELOCITÀ DI SCANSIONE	Altissima	Limitata dall'inerzia
ATMOSFERA	Vuoto	Gas Inerte

Tabella 1 Paragoni tra EBM e LPBF

2.6 DIRECT ENERGY DEPOSITION

La DED è un processo di additive manufacturing dove dell'energia termica concentrata è usata per fondere il metallo mentre viene depositato, il materiale si trova sotto forma di polvere o filamenti. Ci sono due tipi di DED, una che sfrutta un laser per trasferire energia termica mentre l'altra utilizza un fascio di elettroni; in entrambe la stampa è fatta in ambiente privo di ossigeno. Le stampanti DED assomigliano molto alle tradizionali macchine CNC data la presenza di 5 assi che controllano la stampa (2 per l'utensile 3 per il piattello), la testa si muove in maniera molto simile agli utensili tradizionali. I vantaggi che ci offre sono i seguenti: dimensione massima disponibile maggiore, alta velocità di stampa, pochissimo spreco di materiale, possibilità di utilizzare più di un materiale per pezzo e buone proprietà meccaniche; ma soffre anche di basse risoluzioni di stampa e le macchine sono molto costose. I materiali che vengono usati per questa tecnologia sono leghe di titanio, leghe di alluminio, acciai e leghe di nichel. Le caratteristiche tipiche di questa tecnologia sono:

1. Tolleranze superficiali +/- 0,02 mm
2. Spessore minimo layer = 0,02 mm
3. Densità =99,9%

4. Finitura superficiale= 40um RA

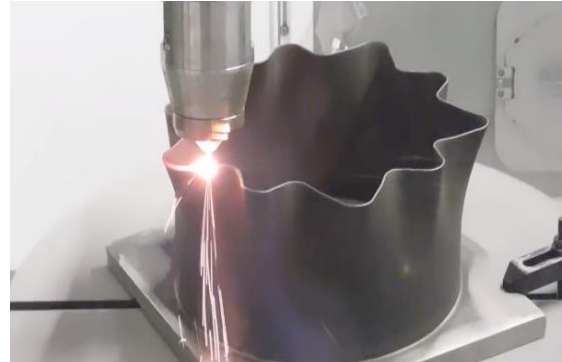
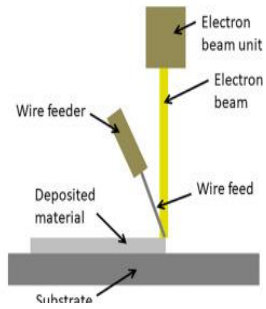
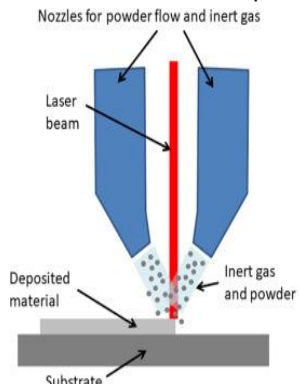


Figure 15 e 16 schema DED con oggetto in stampa

3 PRINCIPALI MATERIALI METALLICI E LEGHE (TI E LEGHE, AL E SUE LEGHE, NI E SUE LEGHE, ACCIAI) E PRINCIPALI PROPRIETÀ

Nei processi di produzione per manifattura additiva è fondamentale conoscere bene le proprietà e caratteristiche del materiale adoperato, in questa sezione andremo ad analizzare i vari metalli e le loro leghe, quali proprietà meccaniche, termiche, chimiche e fisiche possono vantare ed i costi che si devono sostenere per usarli; i campi e settori in cui essi vengono adoperati e le tecnologie con cui vengono realizzati oggetti in quel materiale.

La nostra analisi sarà dedicata ai metalli puri e leghe più adoperati nei processi di AM, ovvero:

- Titanio e le sue leghe
- Alluminio e le sue leghe
- Acciai inossidabili
- Leghe a base di nickel
- Leghe a base di cromo cobalto
- Metalli preziosi

Le tecniche di additive manufacturing che utilizziamo per la produzione di oggetti metallici sono la PBF (fusione a letto di polvere) e la DED (Deposizione diretta di energia), in entrambi i casi è necessario che il metallo sia sotto forma di polvere finissima.



Figura 17 Processo PBF

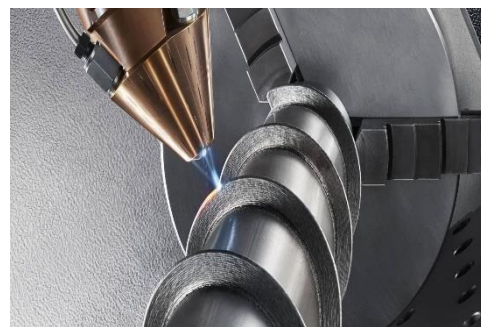


Figura 18 Processo DED

3.1 LEGHE DI TITANIO

Il titanio è un metallo caratterizzato da una struttura cristallina esagonale ed ha: modulo di Young 120 GPa, una resistenza a trazione di 1000Mpa, una densità di 4507 Kg/m³ con una temperatura di fusione di 1941K.

Di per sé il titanio è un metallo molto difficile da lavorare tramite tecniche classiche data la sua estrema durezza, le sue proprietà meccaniche sono paragonabili a quelle degli acciai alto-legati pur avendo il 40% di peso in meno, ha una buona resistenza termica ed una notevole resistenza alla corrosione dovuta alla formazione di un film d'ossido passivo che lo protegge da agenti esterni.

Il titanio "puro" nonostante le sue ottime caratteristiche viene utilizzato principalmente in ambito medico per la creazione di protesi ortopediche e dentali (Buona parte dei casi viene fabbricata tramite additive manufacturing), oggetti che comunemente noi chiamiamo di titanio sono quasi sempre fatti da leghe che contengono principalmente alluminio e vanadio.

Le leghe di titanio si possono classificare in base alla struttura cristallina

- **Leghe a fase α** : contengono elementi come alluminio ed hanno una grande resistenza meccanica ma scarsa duttilità e non possono essere trattate termicamente
- **Leghe a fase β** : possono contenere diversi elementi al loro interno, sono noti per l'ottima lavorabilità e capacità di essere sottoposti a trattamenti termici ed hanno un'ottima saldabilità.
- **Leghe a fase α e β** : queste possono essere trattate termicamente e sono il compromesso tra le leghe alpha e beta.

Vista la grande quantità di pregi che il titanio e le sue leghe esibiscono, essi avranno un vastissimo campo di applicazioni tra cui: industrie navali, aerospaziali,

militari, mediche, automotive ed elettroniche; dato che è un metallo costoso il modo più efficiente per produrre oggetti in titanio è tramite l'additive manufacturing, infatti la quantità di materiale sprecato è nettamente più piccola rispetto ad altre lavorazioni, alcuni studi affermano che la Boeing avrebbe potuto risparmiare 3 milioni di dollari per ogni

787 Dreamliner se avesse sfruttato a pieno le potenzialità della manifattura additiva sui componenti in titanio

Chemical Compounds	Percentage (By wt)
V	4.22
Al	5.48
Sn	0.0625
Zr	0.0028
Mo	0.005
C	0.369
Si	0.0222
Cr	0.0099
Ni	<0.0010
Fe	0.112
Cu	<0.02
Nb	0.0386
Ti	90.0

Tabella 2 Composizione lega di titanio $\alpha\beta$ Ti-6Al-4V

3.2 ALLUMINIO

L'alluminio è il metallo più diffuso sulla crosta terrestre ha una struttura cristallina FCC con un modulo di Young 69 GPa, 210 Mpa di Resistenza a trazione, una densità di 2700 Kg/m³, temperatura di fusione di 933 K.

Il peso dell'alluminio è un terzo di quello dell'acciaio cosa che lo rende molto richiesto, infatti dal campo aerospaziale a quello alimentare troviamo moltissime applicazioni per questo metallo, inoltre essendo un metallo amagnetico si può utilizzare anche nel campo delle telecomunicazioni

Ha una grande resistenza alla corrosione, questo è dovuto al fatto che quando viene esposto all'atmosfera l'alluminio si ossida ma al contrario degli ossidi di ferro quelli i suoi ossidi non sono porosi e quindi vanno a formare una barriera protettiva contro gli agenti esterni, caratteristica molto richiesta nel settore dei trasporti e delle costruzioni.

L'alluminio è uno dei metalli più facilmente lavorabili, grazie alla sua grande duttilità e malleabilità possiamo lavorarlo per deformazione plastica ed asportazione di truciolo senza andare in contro ad inconvenienti, inoltre essendo anche un buon conduttore elettrico e termico ha la possibilità di essere sottoposto a diverse lavorazioni.

Sicuramente la riciclabilità dell'alluminio lo rendono un materiale sostenibile, l'alluminio si può riciclare infinite volte senza che questo perda le sue caratteristiche degradandosi ed i blocchi di alluminio ottenuti da oggetti riciclati hanno un costo di produzione nettamente minore (basti pensare che viene consumata il 95% di energia elettrica in meno, riducendo ulteriormente l'impatto ambientale).

L'alluminio allo stato puro non viene quasi mai utilizzato bensì utilizziamo delle sue leghe che contengono principalmente:

- **Silicio** che diminuisce la dilatazione termica e migliora la sua conducibilità
- **Magnesio** che aumenta la resistenza a corrosione in ambiente alcalino
- **Manganese** che aumenta le proprietà meccaniche

Constituents	% by wt
Al	Balance
Si	9–11
Fe	≤ 0.55
Cu	≤ 0.05
Mn	≤ 0.45
Mg	0.2–0.45
Ni	≤ 0.05
Pb	≤ 0.05
Zn	≤ 0.10
Sn	≤ 0.05
Ti	≤ 0.15

Tabella 3 composizione di una lega AlSi10Mg di alluminio usata per la manifattura additiva

3.3 ACCIAI INOSSIDABILI

L'acciaio è forse il materiale più utilizzato nell'industria moderna, riesce a garantire buone proprietà e con un costo molto contenuto rispetto alle altre leghe, ci viene naturale chiederci se esso è un candidato adatto per le lavorazioni additive. A parte i casi in cui c'è la necessità che il pezzo abbia una forma particolare diremmo che per gli acciai "tradizionali" i processi classici sono i più efficaci dato che i costi da sostenere sono minori e si ha una produttività maggiore.

Questo discorso cambia quando gli acciai in questione sono di una classe superiore che contiene al suo interno metalli costosi come il cromo, tungsteno e vanadio; infatti, dato che si tratta di leghe costose i processi classici causerebbero perdite economiche non

indifferenti a causa della grande quantità di scarti; al contrario gli scarti generati dalla manifattura additiva sono minimi.

Gli acciai inossidabili vengono usati molto soprattutto perché riescono a garantire le seguenti proprietà:

- Resistenze alla corrosione e capacità di perdurare in ambienti ostili;
- Resistenza a fatica, durezza, duttilità e buone proprietà meccaniche;
- Basso costo;
- Incredibile varietà disponibile commercialmente.

Come possiamo vedere il materiale ha una grande versatilità dal punto di vista applicativo, poiché grazie alle sue resistenze termiche, chimiche e meccaniche viene utilizzato in settori estremi come quello petrolchimico, nucleare, energetico, aerospaziale, militare, medico e nell'industria automobilistica.

Nel 2016 in Gran Bretagna è stato effettuato uno studio per valutare la possibilità di utilizzare dell'acciaio inossidabile a basso contenuto di carbonio prodotto tramite Electron Beam Melting per la realizzazione di un contenitore nucleare pressurizzato. L'acciaio 316L è stato selezionato come materiale per il contenitore data la sua saldabilità, resistenza alla corrosione ed alle sue caratteristiche meccaniche.

Chemical Composition (%)		Austenitic 316L Stainless Steel
Carbon	C	0.020
Nickel	Ni	11.21
Chromium	Cr	17.38
Manganese	Mn	1.860
Phosphorus	P	0.027
Sulphur	S	0.0054
Silicon	Si	0.510
Molybdenum	Mo	2.360
Nitrogen	N	0.038

Tabella 4 composizione dell'acciaio inossidabile 316L il quale trova vasto impegno nelle tecnologie di AM

3.4 LEGHE A BASE DI NICKEL

Le super leghe a base di nichel sono uno dei materiali metallici più importanti nell'industria moderna; data l'elevata qualità della lega essa viene utilizzata i campi

estremi dove deve sopportare una elevatissima temperatura, carichi applicati o anche in ambienti estremi dove la resistenza alla corrosione è critica.

Le industrie petrolchimiche, aereospaziali, navali e automotive già adoperavano queste superleghe ma dall'avvento dell'additive manufacturing la quantità di pezzi prodotti è aumentata nettamente, questo perché le leghe sono molto costose e nei processi tradizionali gli sprechi di materiali erano altissimi incidendo negativamente sul costo finale del pezzo, basti pensare che nella fusione si può perdere anche il 40% del materiale inizialmente adoperato, mentre nell'additive gli sprechi di materiale sono nettamente inferiori con tempi di produzione minori e processi automatizzati.

Il nickel di per sé non ha elevatissima resistenza meccanica e duttilità ed è per questo motivo che le sue superleghe sono arricchite da elementi metallici aggiuntivi in grado di garantire la presenza di carburi e precipitati intermetallici, i quali contribuiscono alle proprietà meccaniche ed influenzano positivamente le proprietà meccaniche.

Le superleghe a base di nickel possono contenere fino a 15 elementi diversi e ognuno conferisce caratteristiche specifiche:

- **Titanio/ Molibdeno/ Tungsteno** conferiscono indurimento ed aumento delle proprietà meccaniche
- **Manganese/ Boro/ Zirconio/ Silicio** bloccano la concentrazione di impurezze nel bordo di grano
- **Alluminio e Cromo** impediscono la formazione di ossidi
- **Vanadio/ Niobio/ Tantalio** determinano la formazione di carburi

Le polveri metalliche sono adoperate nei processi di additive manufacturing e le loro caratteristiche incidono molto sulla qualità del prodotto stampato finale. In particolar modo le caratteristiche microstrutturali e la composizione delle polveri sono fattori

critici; quindi, è necessario che la polvere sia conforme alle caratteristiche desiderate e che sia sufficientemente pura per garantire che il processo di stampa avvenga in maniera desiderata.

Elements	Inconel 718	Inconel 625
Ni	50-55	≥58
Cr	17-22	20-23
Co	≤1	≤1
C	≤0.08	≤0.1
Mo	2.8-3.3	8-10
Al	0.2-0.8	≤0.4
Ti	0.65-1.15	≤0.4
Fe	Bal	≤5.0
Nb	4.75-5.5	3.15-4.15
Si and Mn	≤0.35	≤0.50
Ta	-	≤0.05
P and S	≤0.015	≤0.015
Cu	≤0.3	-
B	≤0.006	-

Tabella 5 composizioni delle super leghe a base di nickel Inconel 718 e 625

3.5 LEGHE A BASE DI CROMO COBALTO

Questo tipo di lega è famosa per le sue incredibili resistenze a trazione, corrosione e logoramento, caratteristiche che la rendono un materiale molto appetibile per il settore medico data la sua biocompatibilità, infatti già dalla metà del ventesimo secolo si iniziò a adoperare questo materiale per la creazione di protesi dentali ed ortopediche; ha anche usi nel campo industriale come nel caso di turbine eoliche e componenti del motore.

La sua resistenza alla corrosione è principalmente alla formazione di uno strato protettivo principalmente composto da Cr₂O₃ insieme a piccole quantità di cobalto ed altri ossidi metallici, e questa è la causa principale della sua biocompatibilità

Alcuni gioiellieri hanno iniziato a vendere anelli fatti con leghe di cromo cobalto ma questo comporta un rischio in casi di emergenza, dove si deve rimuovere l'anello dal dito del paziente nel minor tempo possibile, in caso che l'anello sia bloccato si procederà al taglio tramite frullino, un processo che durerebbe poco tempo per anelli d'oro ed argento, ma quando il metallo in questione è questo tipo di lega il processo potrebbe durare anche più di dieci minuti, cosa che potrebbe compromettere il trattamento dell'emergenza.

Visto che i campi di applicazione di questa lega richiedono spesso forme molto complesse difficilmente ottenibili tramite lavorazioni tradizionali (essendo incredibilmente dure e poco duttili la lavorazione per asportazione di truciolo è fuori discussione per la maggior parte dei casi) si utilizzano le tecniche di manifattura additiva per la creazione di oggetti, soprattutto dato che si è notato che questi hanno una resistenza meccanica superiore ai pezzi prodotti per fonderia, ciò è dovuto al fatto che dimensioni del grano nel pezzo stampato sono molto più piccole rispetto al pezzo ottenuto dalla fusione.

COMPOSIZIONE CHIMICA

C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	Ni%	Fe%	N%	Co%
Max	Max	Max	26,00	5,00	Max	Max	Max	saldo
0,14	1,00	1,00	30,00	7,00	0,1	0,75	0,25	

Tabella 6 composizione della lega cromo cobalto CoCr28Mo

3.6 METALLI PREZIOSI

La capacità della manifattura additiva di fabbricare pezzi con complessa geometria l'ha resa un argomento di interesse per artisti e gioiellieri, quest'ultimi in particolare hanno fabbricato oggetti di lusso con dei metalli preziosi tramite i processi di stampa 3D; oro, platino, argento e palladio sono i metalli che vengono utilizzati per questi scopi.

I gioielli sono da sempre considerati uno status symbol, più complesse ed elaborate le forme maggiore sarà il prestigio di chi li indossa, naturalmente i gioielli stampati in 3d sono molto costosi, alcuni pezzi che raggiungono cifre esorbitanti; ad esempio la rivista Forbes ha intervistato un gioielliere che ha creato un oggetto dal costo di oltre un milione di dollari, il committente ha specificatamente richiesto una Torre Eiffel stampata in cima ad una perla di una collana per commemorare la sua luna di miele nella capitale francese.

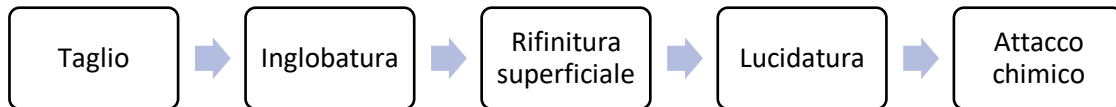
Tutte queste caratteristiche rendono la stampa 3d di metalli preziosi un mercato sempre più in crescita, infatti i produttori di stampanti 3d hanno progettato e prodotto macchine che sono interamente dedicate alla manifattura di oggetti in oro, queste macchine sono a letto di polvere.



Figure 19, 20 e 21 Gioielli stampati 3d

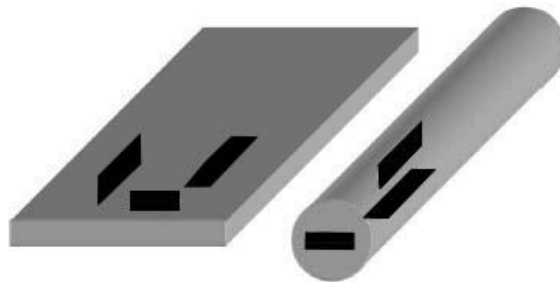
4 PROCEDURE SPERIMENTALI

L'analisi metallografica mira ad esaminare tramite un microscopio un campione metallico preparato con degli appositi trattamenti per riuscire a determinare tramite l'immagine ingrandita caratteristiche e difetti.



Il processo di analisi inizia con l'estrazione dei campioni dal pezzo che vogliamo analizzare, abbiamo bisogno di un minimo di tre pezzi ognuno diretto lungo un piano per riuscire ad avere una panoramica delle proprietà, i pezzi devono essere estratti con criterio al fine di avere una panoramica generale di come è composta la struttura metallica nelle tre dimensioni.

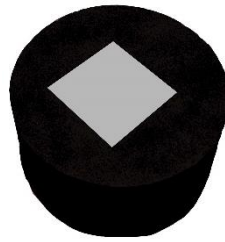
Bisogna sempre ricordare di estrarre un buon numero di campioni così che si possano effettuare un maggior numero di analisi (anche distruttive) e per avere una riserva da usare se i campioni usati venissero danneggiati in qualche modo.



Esempio piani di estrazione provini

Una volta che i pezzi sono stati tagliati, andranno ad essere inglobati con delle resine o con dei polimeri per aumentarne la maneggevolezza durante le analisi senza rischiare la contaminazione delle superfici da analizzare; per l'inglobatura a resina il provino e la

resina vengono scaldati fino alla temperatura adatta per la corretta fusione della resina per poi essere mantenuti a quella temperatura fino a otto minuti mentre allo stesso tempo si aumenta la pressione fino a raggiungere in alcuni casi anche i ventotto Bar, conclusi gli otto minuti la temperatura e la pressione diminuiscono lentamente fino a tornare in condizioni ambientali così che possiamo estrarre il campione inglobato, (il raffreddamento è ravelocizzato grazie a dei tubi in cui circola dell'acqua fredda che va ad asportare il calore)



Esempio di provino inglobato

Gli attacchi chimici servono per mettere in risalto i dettagli della microstruttura del materiale, essendo che i bordi di grano sono più suscettibili agli attacchi chimici questi verranno eliminati lasciando una chiara distinzione tra i grani cristallini; inoltre, ci permette di analizzare il tipo di lavorazione subite, le strutture allotropiche ed effetti dovuti a trattamenti termici

Esiste una variante dell'attacco chimico fatto con l'ausilio dell'elettricità, detto pure attacco elettro-chimico, questo avviene in genere a basse temperature.

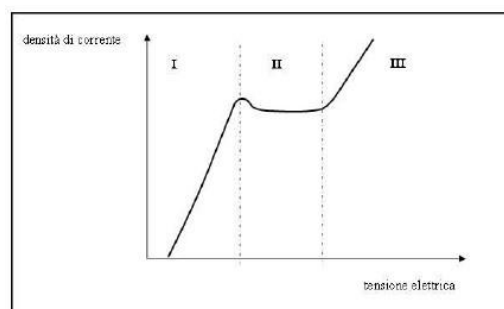


Figura 22 Fasi di attacco elettrochimico

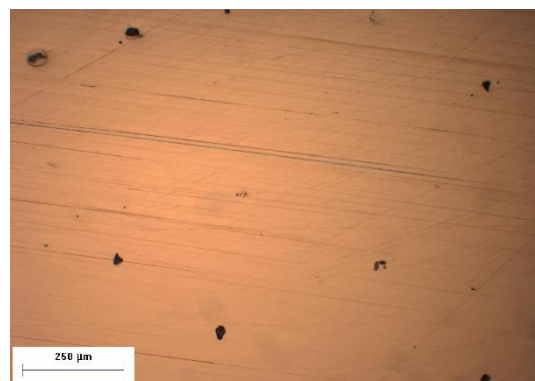
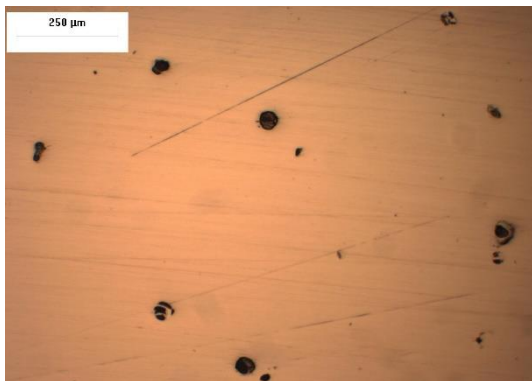
Nella figura possiamo notare come venga fatto tipicamente un attacco elettrochimico e possiamo distinguere tre zone:

- **La zona 1: detta anche zona di etching**, è la zona dove la superficie del campione subisce attacchi tale da produrre solchi poco estesi dovuti alla bassa corrente, ha l'impatto più basso sulla superficie.
- **La zona 2: detta anche zona di plateau**, è la zona ideale per cui ottenere una superficie dove l'attacco agisce principalmente nelle zone di discontinuità strutturale del materiale.
- **La zona 3: detta anche zona di pitting**, è quella che coinvolge i più alti valori di corrente con conseguente effervescenza sulla superficie che produce uno strato quasi uniforme e spesso alcuni micron di sovra attacco dove la superficie sembra essere bruciata dal reagente

4.1 PROCESSI SVOLTI IN LABORATORIO

La nostra analisi sarà incentrata su un oggetto di acciaio 316L stampato tramite fusione a letto di polvere, estrarremo due provini uno lungo in piano XY ed uno lungo il piano YZ, successivamente andiamo ad inglobarli in una resina 603 (una resina epossidica di colore nero).

Terminato il processo di inglobatura inizieremo con la fase di rifinitura meccanica bagnata tramite carta vetrata grossa, successivamente andiamo a ripetere il processo sempre con una grana più fina (ricordano di ruotare il provino di 90°): concludendo la prima rifinitura si passa alla lucidatura che utilizza carte con una densità di cristalli di circa 2000x per pollice quadro Tramite. un microscopio ottico abbiamo potuto analizzare i provini ottenendo le seguenti immagini per il piano XY



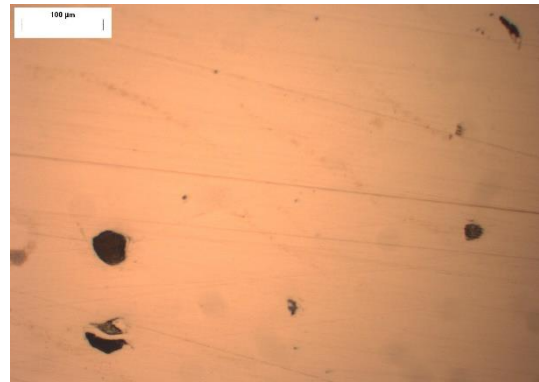
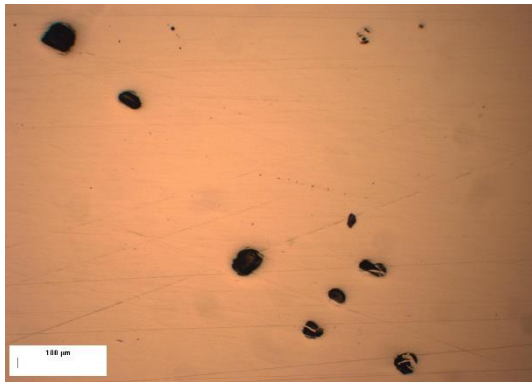


Figure 23, 24, 25 e 26 Micrografie nel piano XY

Notiamo che difetti normalmente invisibili all'occhio umano diventano ben osservabili e quantizzabili, cosa che verrà fatta nel capitolo successivo.

Sono state scattate anche delle foto nel piano YZ.

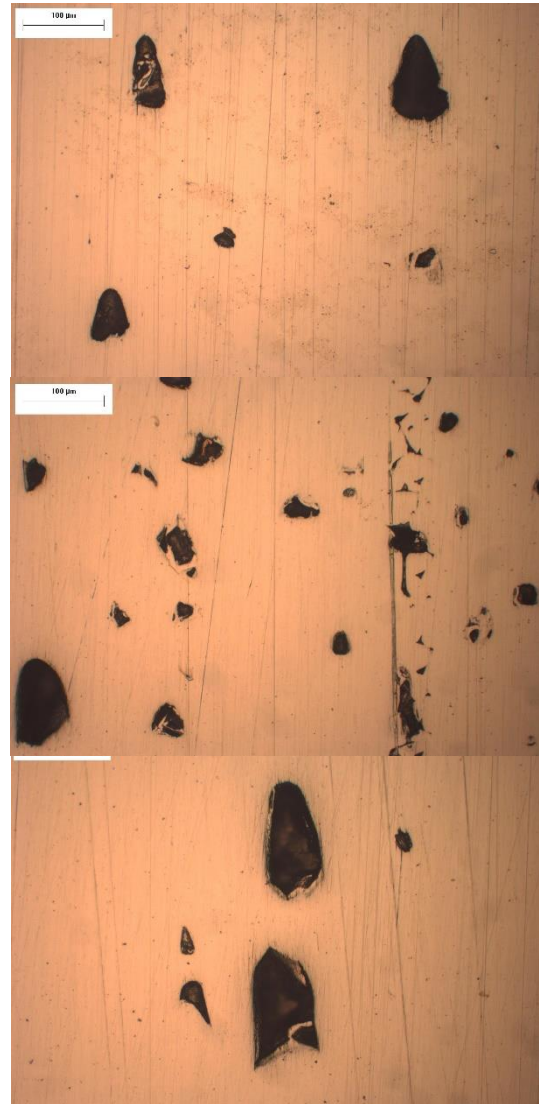
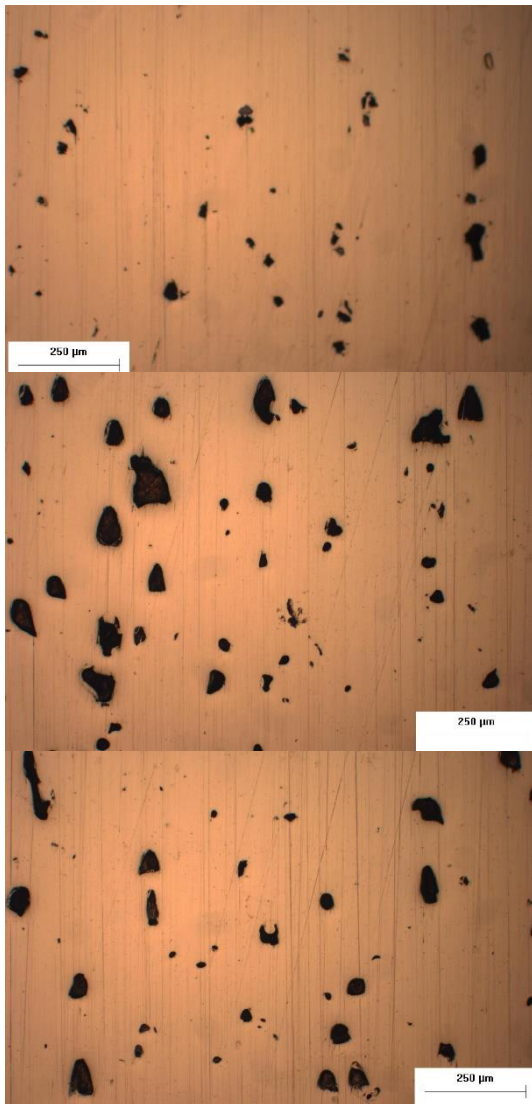


Figure 27, 28, 29, 30, 31 e 32 Metallografie nel piano YZ

Come abbiamo potuto notare la differenza tra le metallografie fatte nel piano XY e YZ sono enormi ed entrambe ma soprattutto quelle su YZ presentano dei difetti.

Infine, effettuiamo l'attacco chimico usando una soluzione di acido nitrico che va ad attaccare le parti meno protette del metallo esposto mostrandoci i grani cristallini e le loro forme. Andando ad effettuare un attacco chimico, vedremo come le pozze di fusione verranno esaltate mostrando il passaggio del laser.

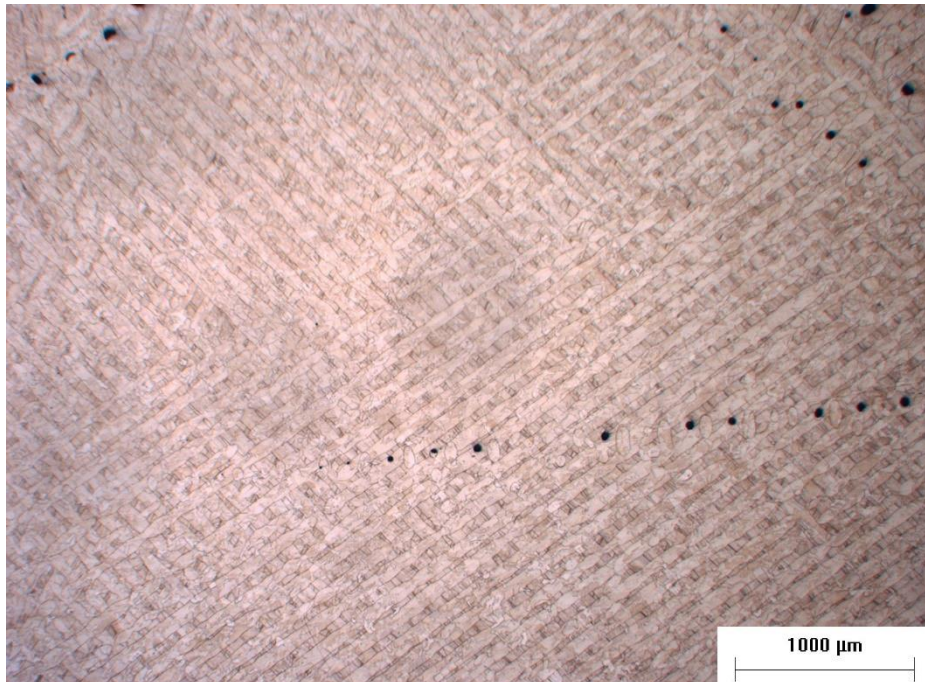


Figura 33 Metallografia Piano XY post- attacco chimico

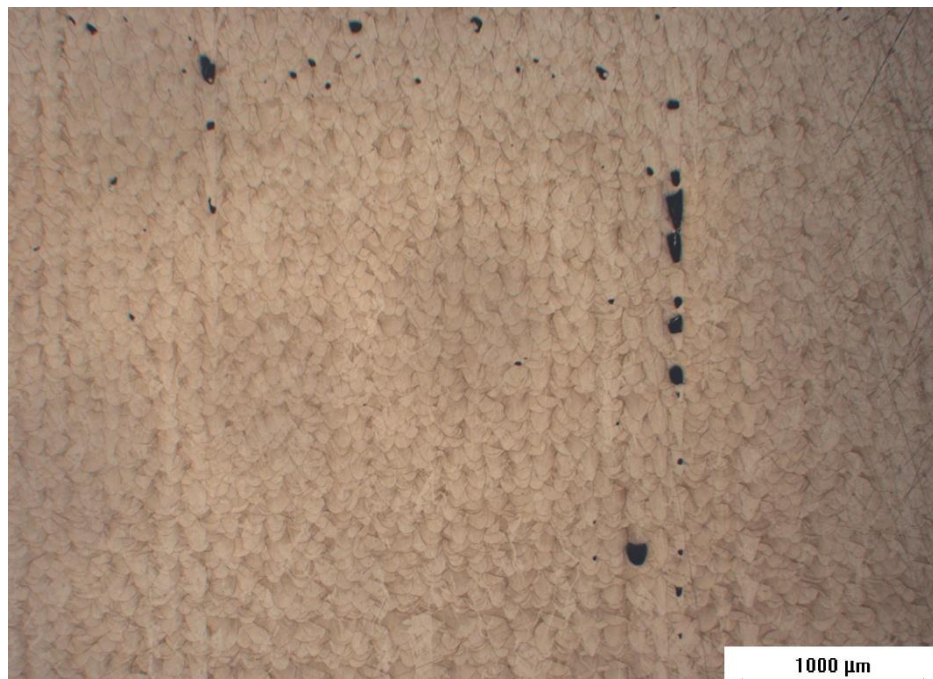


Figura 34 Metallografia piano YZ post attacco chimico

4.2 DESCRIZIONE COMPONENTI MICROSCOPIO OTTICO ED IL LORO FUNZIONAMENTO

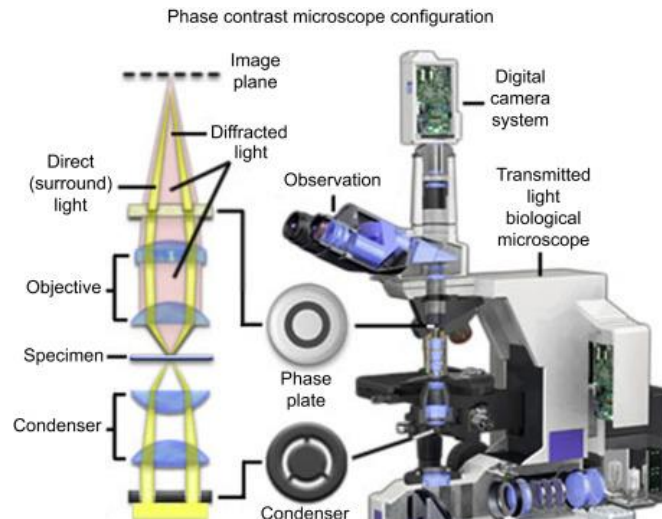


Figura 35 Schema funzionamento microscopio ottico

Il microscopio ottico sfrutta lo spettro della luce visibile per ingrandire le immagini, esso ci permette di arrivare ad ingrandimenti compresi tra 1000x e 2000x, il suo limite più grande è proprio l'ingrandimento massimo dato che questo è vincolato dalla lunghezza d'onda dello spettro visibile.

Una luce parte dal fondo del microscopio ed attraversa il condensatore, il quale migliora le caratteristiche del fascio di luce, in seguito il fascio colpisce il campione e viene riflesso dentro l'obiettivo il quale ingrandisce l'immagine riflessa, infine questo raggio viene ingrandito ulteriormente nell'oculare e in uscita da esso avremmo l'immagine ingrandita del campione.

Nei microscopi sono caratterizzati dalle seguenti grandezze:

- **La risoluzione:** è la distanza minima tra due punti per la quale continuiamo a distinguerli come due punti definiti
- **L'ingrandimento:** è quante volte possiamo ingrandire la parte analizzata del campione
- **Contrasto:** per riuscire a visualizzare bene il campione ingrandito bisogna avere un contrasto sufficiente, per aumentare il contrasto bisogna diminuire la quantità di luce o eliminare quella diffusa

- **Profondità di campo:** indica quanto si può spostare l'oggetto dal fuoco dell'obiettivo affinché rimanga ancora a fuoco

Un microscopio ottico è composto da:

- Oculare
- Obiettivo
- Condensatore e diaframma
- Fonte di luce

Oculare: L'oculare è un cilindro contenente due o più lenti la cui funzione è quella di mettere a fuoco l'immagine per l'occhio; questo è posizionato in cima al tubo del microscopio. Può essere sostituito al fine di avere differenti livelli di ingrandimento.



Obiettivo: Tipicamente poste in fondo al microscopio ottico, hanno il compito di raccogliere la luce che arriva dal campione. Esso è di forma cilindrica ed al suo interno ha una o più lenti, in genere vengono posti due o più obiettivi con diverse capacità di ingrandimento ma con lo stesso fuoco. Ci sono degli obiettivi che sfruttano l'indice di rifrazione dell'olio per ottenere un ingrandimento fino a 100x.

Figura 36 Oculari



Condensatore e diaframma: Il condensatore è una lente usata per focalizzare la luce dalla sorgente luminosa al campione, questo può includere anche un diaframma e/o dei filtri per migliorare la qualità e la luminosità del fascio di luce.

Figura 37 Obiettivi

La fonte di luce: il componente più importante per un microscopio ottico è la fonte di luce, come fonte di luce si può usare la luce del giorno direzionata tramite specchi, ma la maggior parte dei microscopi ottici ha una fonte luminosa integrata nel sistema, queste possono essere lampade alogene, led o anche dei laser.

5 RISULTATI E DISCUSSIONE

Lo scopo della nostra ricerca è l'analisi metallografica delle micrografie ottenute tramite microscopio ottico (con e senza attacco chimico), analisi dei difetti con ipotesi correlate alla loro presenza, analisi delle pozze di fusione tipiche della manifattura additiva.

Chemical Composition (%)		Austenitic 316L Stainless Steel
Carbon	C	0.020
Nickel	Ni	11.21
Chromium	Cr	17.38
Manganese	Mn	1.860
Phosphorus	P	0.027
Sulphur	S	0.0054
Silicon	Si	0.510
Molybdenum	Mo	2.360
Nitrogen	N	0.038

Tabella 7 composizione acciaio 316L

Il nostro studio è stato effettuato su un campione cubico stampato tramite LPBF (laser powder bed fusion) da una polvere di acciaio inossidabile 316L (la composizione viene riportata), durante la stampa il laser ha avuto un indice di diffusione del 0,05.

L'analisi dei difetti è uno step fondamentale per conoscere le limitazioni di un processo di lavorazione, è naturale che i metalli presentino imperfezioni ma nel caso specifico dell'additive manufacturing queste sono più diffuse a causa della natura del processo.

20x08 XY	Area Tot (μm^2)	Area Diff (μm^2)	Vuoti %
1	322752,00	5.083	1,57%
2	322752,00	3.412	1,06%
3	322752,00	3.165	0,98%
4	320460,00	3.580	1,12%
5	320460,00	3.257	1,02%
6	320784,00	3.767	1,17%
7	323736,00	1.396	0,43%
8	320460,00	5.689	1,78%
9	318828,00	2.380	0,75%
10	319806,00	2.845	0,89%
Area tot Media		Area Diff Media	%Vuoti Media
267732,50		2881,05	0,90%

Tabella 8 Difetti nelle metallografie 20x08 XY

Per ogni micrografia abbiamo effettuato la misura delle superfici che i difetti occupano in micron quadri e la loro percentuale rispetto all'area della foto, notiamo che i dati riportano un massimo del 1,57%, un minimo di 0,43% ed una media di 0,90%.

10x08 XY	Area Tot (μm^2)	Area Diff (μm^2)	Vuoti %
1	1291008,00	11.022	0,85%
2	1278574,00	12.090	0,95%
3	1285438,00	13.206	1,03%
4	1285438,00	5.332	0,41%
5	1291008,00	8.927	0,69%
6	1278574,00	5.893	0,46%
7	1291008,00	10.205	0,79%
8	1291008,00	15.522	1,20%
9	1285438,00	22.748	1,77%
10	1285438,00	22.748	1,77%
Area tot Media		Area Diff Media	%Vuoti Media
1157749,40		10494,49	0,99%

Tabella 9 Difetti nelle metallografie 10x08 XY

Per ottenere le micrografie 10x08 abbiamo "diminuito lo zoom" e come per il caso precedente abbiamo fatto un'analisi superficiale dei difetti ed abbiamo constatato che in percentuale il difetto max sia 1,77%, il min 0,41% con una media del 0,99%.

In base alla tabella notiamo che nel piano XY i difetti sono relativamente piccoli e piuttosto pochi, inoltre lo scostamento tra i dati delle due tabelle è molto piccolo, ciò è una garanzia in più per l'autenticità dei dati raccolti, ripetiamo i processi eseguiti anche per il piano YZ.

20x08 YZ	Area Tot (μm^2)	Area Diff (μm^2)	Vuoti %
1	321089,55	11.743	3,66%
2	323157,21	9.234	2,86%
3	321090,53	9.126	2,84%
4	319051,35	6.159	1,93%
5	323157,21	19.388	6,00%
6	321089,55	7.908	2,46%
7	321090,53	12.207	3,80%
8	321090,53	7.465	2,33%
9	323157,21	10.835	3,35%
10	319051,35	19.335	6,06%
11	321090,53	18.792	5,85%
12	323157,21	26.450	8,18%
Area tot Media	Area Diff Media	%Vuoti Media	
321439,39	13220,16	4,11%	

Tabella 10 Difetti nelle metallografie 20x08 YZ

10x08 YZ	Area Tot (μm^2)	Area Diff (μm^2)	Vuoti %
1	1286007,57	23387	1,82%
2	1291814,88	26971	2,09%
3	1279462,09	37815	2,96%
4	1286007,57	49360	3,84%
5	1286007,57	44176	3,44%
6	1289309,52	53739	4,17%
7	1282732,74	78.251	6,10%
8	1289309,52	70.331	5,45%
9	1286007,57	89.570	6,96%
10	1286007,57	38.594	3,00%
11	1279462,09	43.929	3,43%
12	1279462,09	22.570	1,76%
Area tot Media	Area Diff Media	%Vuoti Media	
1285132,57	48224,48	3,75%	

Tabella 11 Difetti nelle metallografie 10x08 YZ

A differenza del piano XY, in queste micrografie sono presenti molti difetti e questi occupano una porzione non indifferente di superficie, abbiamo, un massimo di 8,18%, un minimo di 1,93% ed una media di 4,11%. Andando ad analizzare le immagini meno magnificate noto che la presenza di difetti seppur alta, è minore rispetto alle micrografie 20x08; in questo caso abbiamo un massimo di 6,96%, un minimo di 1,76% ed una media di 3,75%. Analizzando i risultati ottenuti capiamo subito che i vuoti si sviluppano in altezza (come la stampa), nel piano orizzontale noto che ci sono pochi buchi di forma quasi circolare, questi spesso si trovano allineati lungo una retta obliqua.

Nelle micrografie del piano verticale notiamo molti vuoti di forma allungata, spesso questi sono allineati lungo una retta parallela al verso di sviluppo della stampa 3d; ciò che abbiamo appena descritto ci fa pensare che buona parte di questi difetti è causata dalla distribuzione di particelle impure ed agglomerati di polvere insieme alla polvere metallica pura.

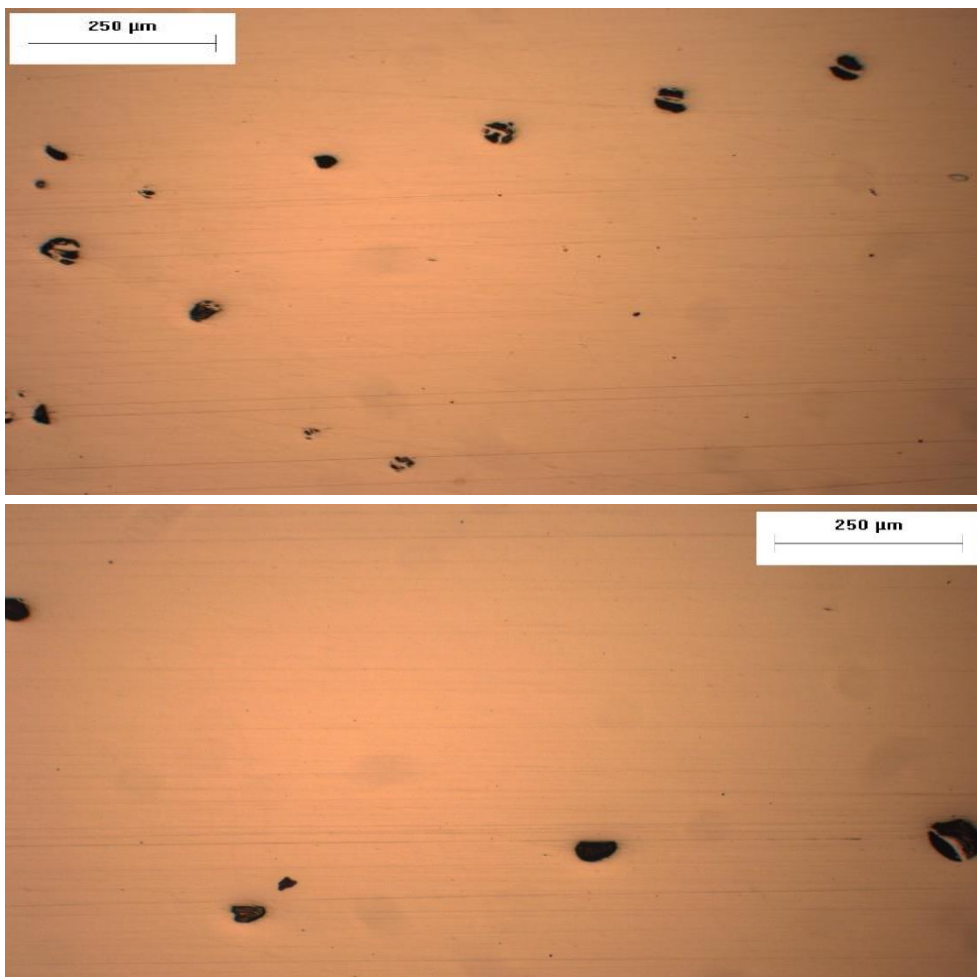


Figure 38 e 39 Metallografie XY

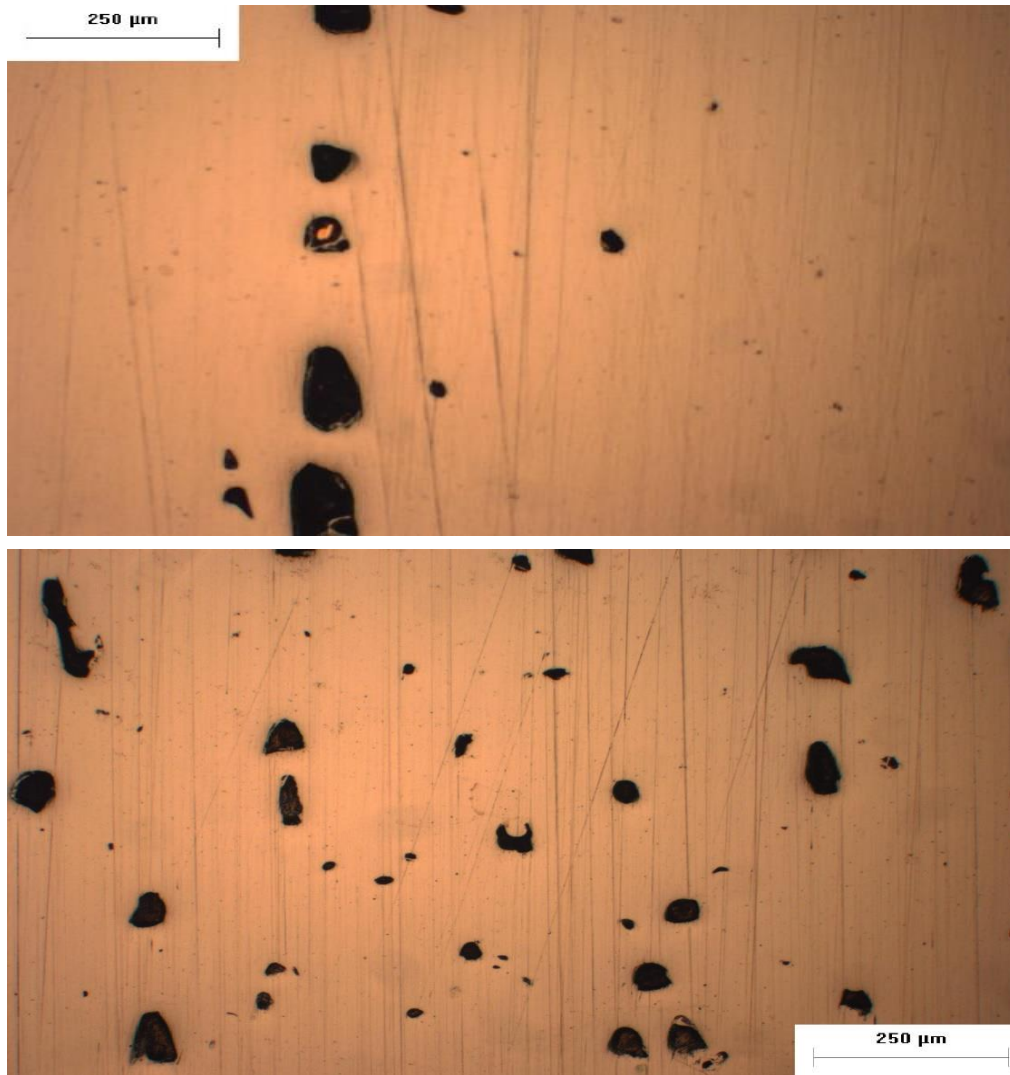


Figure 40 e 41 Metallografie YZ

Lo step finale della nostra ricerca è l'analisi delle pozze di fusione e dei difetti dovuti presenti in esse; misureremo l'area, la profondità e larghezze delle pozze di cinque micrografie nel piano verticale YZ.

10x08 YZ	Area pozze di fusione (μm^2)	Profondità pdf	Larghezza pdf
1	9.571	118	122
2	10.096	105	137
5	9.777	114	107
	Area media pozze di fusione (μm^2)	profondità media	larghezza media
	9.815	112	122

Tabella 12 Classificazione pozze di fusione

Le micrografie 1,2 e 5 sono prive di difetti e la misura sarà incentrata sulle pozze di fusione; una pozza di fusione ha un'area media di $9815 \mu\text{m}^2$, una profondità di $112 \mu\text{m}$ ed una larghezza di $122 \mu\text{m}$.

10x08YZ	Area Diff (μm^2)	Profondità Diff (μm)	Larghezza Diff (μm)
3	3.233	133	88
4	1.713	91	74
Area media diff (μm^2)			
profondità media diff			
Larghezza media diff			
	2.473	112	81

Tabella 13 Classificazione pozze dei difetti nelle pozze di fusione

Le micrografie 3 e 4 hanno dei difetti, quindi analizzeremo le dimensioni medie delle pozze in cui sono presenti; i difetti hanno in media un'area di $2473 \mu\text{m}^2$, una profondità di $112 \mu\text{m}$ ed una larghezza di $81 \mu\text{m}$; questa è la conferma definitiva della nostra ipotesi sulla natura e formazione dei difetti.





Figure 42, 43, 44, 45 e 46 Metallografie YZ post attacco chimico

5.1 METODO DI MISURA

Come accennato in precedenza, le nostre misure sono state fatte tramite il software ImageJ, il processo di misura inizia con il setting di una distanza nota nella metallografia per poi tracciare una retta che ricopra questa distanza, ciò che il software fa è quella di associare un certo numero di pixel dell'immagine alla lunghezza della retta, in questo modo quando noi andiamo ad analizzare una distanza avremo già la misura in μm senza la necessità di fare delle conversioni.

Quando andiamo a misurare un'area non dobbiamo calibrare il programma tramite la misura di un'area nota ma basta definire una lunghezza nota come per le distanze, quando andiamo a misurare un'area andiamo a tracciare delle curve che inglobano l'area interessata, il risultato ci verrà fornito in μm^2 .



Figure, 47, 48 e 49 Processo calibrazione e di misura con dati ottenuti

Come possiamo notare i dati raccolti da una sola metallografia vengono inseriti in una tabella che può essere esportata in un Excel dove possiamo adoperare le sue innumerevoli funzionalità per il nostro studio, ripetiamo il processo per ogni metallografia di quel tipo ed abbiamo una tabella piena di info sulla quale andremo poi a trarre i dati finali che ci interessano, ed è così che abbiamo ottenuto le tabelle che rappresentate.

5.2 ALTRI TIPI DI PROVE

Illustriamo brevemente altre prove alla quale poteva essere sottoposto il provino, in cosa consistono e che dati ci forniscono.

Prova a trazione:

Forse la prova più iconica di tutta l'ingegneria meccanica, questa ci permette di tracciare un diagramma deformazione tensione di un provino di una forma precisa ottenendo tensione di snervamento e modulo di Young del materiale; se avessimo stampato un provino della forma richiesta allora avremmo potuto fare un confronto con un provino di materiale e forma identica ottenuto tramite le tecniche tradizionali.

Prove di durezza:

Le prove di durezza servono ad indicare con la difficoltà con cui un materiale si lascia penetrare, esse sono suddivise in prove Vickers, Rockwell e Brinell, ciò che li differenzia è la forma del penetratore, se facessimo una prova su un provino stampato ed uno ottenuto tradizionalmente potremmo fare un paragone tra la durezza degli oggetti stampati e quelli tradizionali. La durezza è una caratteristica molto importante negli impianti protesici, ambito in cui la stampa 3d sta prendendo sempre più piede.

Prove di resilienza:

Come sappiamo la resilienza è la capacità di un materiale a resistere agli urti, per fare la prova abbiamo bisogno di un provino stampato secondo una forma ben precisa, questo provino verrà posto al punto di massima energia cinetica del pendolo Charpy, il pendolo quando viene rilasciato va a convertire l'energia potenziale in energia cinetica, quando raggiunge il massimo di energia va a colpire il provino rompendolo, andando a riportare la nuova altezza massima raggiunta dal pendolo possiamo calcolare quanta energia è stata usata per rompere il provino e di conseguenza la sua resilienza. Possiamo come sempre fare il confronto tra un pezzo stampato ed uno tradizionale per fare il paragone tra le due tecniche.

In un nuovo studio possiamo fare dei trattamenti termici sui provini per verificare come questo incida sulle proprietà meccaniche del campione prodotto per additive

manufacturing e se vogliamo possiamo sottoporre un pezzo prodotto con tecniche classiche per vedere se i pezzi stampati subiscono i trattamenti in maniera diversa.

6 CONCLUSIONI

La caratterizzazione metallografica è uno step molto importante per apprendere le proprietà dei metalli analizzati. Nell'ambito di questa tesi è stato analizzato un provino di acciaio inossidabile 316L stampato con tecnologia Laser Powder Bed Fusion e ci si è focalizzati sull'analisi delle dimensioni delle pozze di fusione e dei vuoti.

Nell'additive manufacturing la presenza di vuoti è quasi una certezza, infatti anche le migliori macchine non raggiungono il 100% di compattezza arrivando ad un massimo del 99%. I vuoti in un oggetto sono nocivi dato che abbassano la tensione massima di lavoro che il campione riesce a sopportare; ciò è dovuto al fatto che intorno ai vuoti le tensioni si accumulano facendo innescare la rottura in maniera prematura compromettendo il funzionamento del pezzo.

La manifattura additiva si sta sempre più diffondendo nell'ambito civile ed industriale con particolare attenzione alla manifattura di oggetti metallici di forme complesse e materiali costosi. Come riportato precedentemente, è importante che si comprenda la natura dei difetti così che si riesca a correggerli e a rendere i pezzi stampati paragonabili a quelli ottenuti con tecniche tradizionali, in poche parole bisognerebbe risolvere il problema dei vuoti, delle basse velocità di produzione e gli alti costi delle macchine per la stampa.

Se questi ostacoli verranno superati in futuro assisteremo ad una nuova rivoluzione industriale dove tutti gli oggetti verranno fabbricati autonomamente senza l'ausilio di personale umano che svolga del lavoro manuale, questo gioverebbe sicuramente all'economia mondiale. Nonostante ciò, alcuni scettici affermano che questo sviluppo porterebbe via il lavoro ad un numero incalcolabile di persone, quindi come sempre è necessario che lo sviluppo tecnologico sia accompagnato dall'avanzamento della società umana al fine che non si utilizzino queste innovazioni per scopi nocivi per le persone e per l'ambiente.

7 RINGRAZIAMENTI

Ringrazio Dio per l'infinita Misericordia che mi concessami e per i tanti traguardi che sono riuscito a raggiungere grazie alla sua Grazia.

Ringrazio i miei genitori e la mia famiglia, il loro amore ed orgoglio nei miei confronti è sempre stata una carica per riuscire a migliorare.

Ringrazio mio fratello Omar che è stato d'esempio e di supporto nei momenti più bui

Ringrazio la professoressa Eleonora Santecchia per avermi permesso di scrivere la tesi di laurea su un argomento affascinante quanto innovativo.

Ringrazio tutti gli amici che hanno contribuito a rendere la mia esperienza universitaria indimenticabile.

8 RIFERIMENTI

8.1 BIBLIOGRAFIA

C. A. Biffi, A. Tuissi: *Stato dell'arte sulle tecniche di produzione additiva per metalli in "La metallurgia italiana" MMXVII n.1, 5-10*

J.P. Oliveiraa, b, A.D. LaLonded, J.Mac: *Processing parameters in laser powder bed fusion metaladditive manufacturing "Materials & Design" Volume CXCIII 2020, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520302963>*

T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties "Progress in Materials Science" volume XCII 2018, pages 112-224, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172>*

Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui, *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges "Composites Part B: Engineering" Volume CXLIII 2018, pages 172-196 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817342944>*

A.A. Deev, P. A. Keznetcov, S. N. Petrov, *Anisotropy of mechanical properties and its correlation with the structure of stainless steel 316L produced by the SLM method "Physics Procedia" LXXXIII 2016 pages 789 – 796*

Hitzler, L.; Alifui-Segbaya, F.; Williams, P.; Heine, B.; Heitzmann, M.; Hall, W.; Merkel, M.; Öchsner, A. *Additive Manufacturing of Cobalt-Based Dental Alloys: Analysis of Microstructure and Physico-Mechanical Properties. Preprints 2018, 2018100224 (doi: 10.20944/preprints201810.0224.v1).*

8.2 SITOGRAFIA

<https://www.cial.it/riciclo-alluminio/#:~:text=L'alluminio%20possiede%20caratteristiche%20ottimali,ogni%20volta%20a%20nuovi%20prodotti.&text=Dopo%20la%20selezione%2C%20gli%20imballaggi,avviati%20a%20riciclo%20in%20fonderia.>

https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_ottico

<https://3d4growth.com/stampa-3d-metallo>

<https://www.zare.it/stampa-3d-metallo>

https://it.wikipedia.org/wiki/Produzione_additiva

https://it.wikipedia.org/wiki/Stampa_3D

<https://www.meccanicaneews.com/additive-manufacturing/>

<https://www.ridix.it/blog/approfondimenti/additive-manufacturing-cosa-e/>

<https://www.tav-vacuumfurnaces.com/blog/39/it/manifattura-additiva-superleghe-nichel>

<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/metal-additive-manufacturing-materials>

<https://www.zare.it/titanio-usi-caratteristiche><https://www.metal-am.com/norsk-titanium-supplies-titanium-am-components-for-boeing-dreamliner/>

<https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/people-health/sports-lifestyle-consumer-goods/jewelry>

<https://3dprinting.com/precious-metal-additive-manufacturing-pmam/>

<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>

<https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Stereolitografia>

<https://www.sinthesieng.it/servizi/prototipazione-rapida/stereolitografia/>

<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>

<https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-extrusion/>

https://it.wikipedia.org/wiki/Material_Jetting

https://it.wikipedia.org/wiki/Binder_Jetting

<https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>

<https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>

<https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/>

<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-powder-bed-fusion>

<https://www.3dnatives.com/en/direct-metal-laser-sintering100420174-2/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam_additive_manufacturing

<https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>

<http://www.addmelab.polimi.it/stampare-in-metallo/la-tecnologia-ded/>

https://it.wikipedia.org/wiki/Direct_Energy_Deposition

<https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>

8.3 FONTI IMMAGINI

Figura1: <https://www.3dprintingmedia.network/3d-hubs-publishes-complete-3d-printing-technologies-infographic/>

Figura2: <https://www.ruggeromarzocca.it/i-nostri-corsi/corso-stampa-3d-barletta-andria-trani>

Figura 3: <https://formlabs.com/it/3d-printers/form-3/>

Figura 4: <https://it.tipsandtricks.com/what-is-3d-printing-767983>

Figura 5: <https://www.solid3dprinting.it/stampanti-3d-autolivellante>

Figura 6: <http://www.migliorestampante3d.eu/>

Figura7: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-material-jetting-process_fig3_325876280

Figura8 <https://www.indiamart.com/proddetail/polyjet-3d-printing-service-22636436291.html>

Figura 9: <https://www.digitalalloys.com/blog/binder-jetting/>

Figura10:<https://www.sculpteo.com/en/materials/binder-jetting-material/binder-jetting-stainless-steel-316/>

Figura 11: <https://www.primaadditive.com/it/il-processo-powder-bed-fusion/>

Figura 12 <https://www.pinterest.it/pin/8866530490673856/?d=t&mt=login>

Figura 13:<https://jhh60718442.tistory.com/28>

Figura14:<https://www.pinterest.it/pin/283375001528003601/?d=t&mt=signupOrPersonalizedLogin>

Figura15:https://e-tarjome.com/storage/panel/fileuploads/2020-05-14/1589439845_E14930-e-tarjome.pdf

Figura16:<https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>

Figura 17:<https://www.machinery-market.co.uk/news/29005>

Figura18:https://www.trumpf.com/en_INT/solutions/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/

Figura 19:<https://www.jewellerynews.ru/2019/01/prodways-group-anonsirovala-yuvelirnyj-stereolitograficheskij-3d-printer-solidsapedl/22847/>

Figura 20:<https://id.pinterest.com/pin/681310249860288923/?d=t&mt=login>

Figura 21:<https://www.turbosquid.com/3d-models/ring-jewelry-3d-model-1509414>

Figura 22a: *Lezione3_Metallografia, E. Santecchia, 2019/2020*

Figura 22b: *Lezione3_Metallografia, E. Santecchia, 2019/2020*

Figura 34: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optical-microscope>

Figura 35: https://it.wikipedia.org/wiki/File:Oculari_per_microscopio_ottico.jpg

Figura 36: <https://microscopiomigliore.it/guida/>

Tabella2:https://www.researchgate.net/figure/Chemical-Composition-of-Ti-6Al-4V_tbl1_269040007

Tabella3:https://www.researchgate.net/figure/Chemical-composition-of-ALSi10Mg-aluminum-alloy_tbl1_337000192

Tabella4:https://www.researchgate.net/figure/Chemical-compositions-wt-of-Type-316L-stainless-steel-15_tbl1_284698427

Tabella 5: https://www.researchgate.net/figure/composition-in-weight-percentage-of-Inconel-718-and-Inconel-625-used-for-the-research_tbl1_304365810

Tabella 6: <https://www.klein.it/en/portfolio/cocr28-2/>

Tabella7:https://www.researchgate.net/figure/Chemical-compositions-wt-of-Type-316L-stainless-steel-15_tbl1_284698427