



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Strutture in acciaio inossidabile 316L
fabbricate tramite laser powder bed
fusion e risposta a prove di impatto**

**Stainless steel 316L structures manufactured
using laser powder bed fusion and response to
impact test**

Relatore:

Prof.ssa Eleonora Santecchia

Tesi di Laurea di:

Gianmarco D'Ambrosio

A.A. 2022/2023

Sommario

Introduzione	4
1. Additive manufacturing di materiali metallici	6
1.1. Workflow	7
1.2. Tecnologie	10
2. Materiali metallici per assorbimento urti	15
2.1. Acciaio 316L	16
2.2. Prova statica e dinamica	20
3. Procedure sperimentali	25
3.1. Preparazione metallografica	25
3.2. Attacco chimico	31
3.3. Prova microdurezza Vickers	32
4. Risultati e discussione	35
Conclusioni	47
Riferimenti bibliografici	48

Introduzione

Nell'attuale panorama dell'ingegneria dei materiali, le tecnologie additive hanno rivoluzionato il modo in cui concepiamo e realizziamo componenti strutturali complessi. In questo contesto, la possibilità di creare prodotti su misura, attraverso processi di produzione come la stampa 3D, ha aperto nuove prospettive nell'ottimizzazione delle prestazioni e nella personalizzazione dei prodotti. La presente ricerca si propone di esplorare la risposta meccanica di un provino realizzato tramite tecnologie additive, sottoposto a prove di compressione e impatto al fine di valutarne le prestazioni e la microstruttura dopo l'applicazione del carico. La scelta di concentrarsi sulla compressione è motivata dalla rilevanza di questo tipo di carico in numerose applicazioni industriali, nonché dalla necessità di comprendere a pieno il comportamento dei materiali in risposta a sollecitazioni di diversa natura.

Lo scopo principale di questa tesi è quello di analizzare in dettaglio la risposta del materiale del provino alle sollecitazioni di compressione, esaminando fattori quali resistenza, deformazione e capacità di assorbimento dell'energia, attraverso l'utilizzo di metodologie sperimentali rigorose e l'impiego di strumentazione specializzata. Verrà fornita una panoramica del contesto teorico e delle tecnologie additive utilizzate nella realizzazione del provino. Successivamente, si procederà con la descrizione dettagliata della metodologia sperimentale impiegata per la conduzione delle prove di compressione statiche e dinamiche. I risultati sperimentali saranno quindi presentati e analizzati in relazione agli obiettivi della ricerca.

Nella prima parte dell'elaborato sono presenti riferimenti teorici, derivanti da un'ampia ricerca bibliografica, focalizzati sui principali argomenti trattati, quali gli acciai inossidabili, le varie tecnologie di additive manufacturing e le

attività sperimentazioni svolte. Il processo di produzione additiva utilizzato per la realizzazione dei provini presi in analisi è il Laser Powder Bed Fusion ovvero la fusione a letto di polvere. Troviamo quindi un'ampia argomentazione riguardante questa particolare tecnologia, la quale si contrappone ai metodi tradizionali come la fonderia, e metodi di deformazione plastica come le lavorazioni sottrattive, ed inoltre influisce sulle proprietà meccaniche e microstrutturali del materiale metallico.

Tra gli acciai inossidabili più utilizzati troviamo l'AISI 316, questo acciaio particolare trova applicazione in moltissimi settori, tra cui impianti chimici, petrolchimici, nell'industria alimentare, e in campo farmaceutico, medico e militare. In molte di queste applicazioni il materiale lavora in condizioni caratterizzate da elevati carichi di esercizio, risulta quindi importante valutare risposta del materiale in situazioni di stress meccanico. Nella seguente tesi in particolare è stato analizzato il comportamento e la risposta alla compressione dell'AISI 316L, una variante dell'AISI 316, che presenta una minore concentrazione di carbonio (Low Carbon).

1. Additive manufacturing di materiali metallici

L'Additive Manufacturing (AM), produzione additiva nota anche come stampa 3D è un processo industriale innovativo che sfrutta l'applicazione progressiva di strati di materiali come metalli puri, leghe, compositi e polimeri. Questo principio consente di creare strutture ed oggetti complessi difficilmente realizzabili o impossibili da realizzare con i classici metodi sottrattivi e formativi quali lavori di fonderia, fucinatura e lavorazioni alle macchine utensili per asportazione di truciolo [1]. Con l'additive manufacturing non abbiamo più il limite di dover partire da un semilavorato iniziale da modellare per arrivare ad un prodotto finito; infatti, si parte da un progetto CAD (Computer Aided Design) ove disegniamo il modello che vogliamo produrre, il quale viene convertito in un formato specifico per essere interpretato e realizzato dalla macchina che svolge la lavorazione 3D, riducendo notevolmente i tempi di produzione e consentendo una maggiore flessibilità nel design.

Scegliamo l'additive manufacturing per l'elevata riciclabilità delle materie prime, l'elevato grado di personalizzazione e per l'ottimizzazione topologica, ovvero l'ottimizzazione delle forme eliminando il volume di materiale eccessivo e minimizzando il peso senza compromettere la funzionalità strutturale. Risulta un processo vantaggioso per la produzione su piccola scala e prototipazione rapida, perché riduce notevolmente i tempi di produzione, specialmente per componenti complessi che richiederebbero una serie di lavorazioni successive. Grazie alla vasta gamma di materiali utilizzabili, questa tecnica offre numerosi vantaggi e trova applicazioni in molteplici settori, dall'automotive all'aerospaziale, ma anche in campo medico, la sua adozione

promette di trasformare radicalmente l'industria manifatturiera, rendendola più efficiente, flessibile e sostenibile.

La produzione additiva dal punto di vista industriale a meno che non sia l'unico processo utilizzabile, molte volte non viene presa in considerazione a causa della bassa produttività che offre e soprattutto per gli elevati costi di investimento iniziali, portando alla scelta dei classici metodi di produzione dai costi più economici ma altamente impattanti dal punto di vista ecologico.

Con additive manufacturing si intende il sistema di processi e tecnologie volte alla produzione 3D, tra cui troviamo Laser Powder Bed Fusion, un particolare processo che ha portato alla realizzazione dei provini presi in esame e per i quali studieremo il comportamento alla risposta nelle prove di deformazione di tipo statico e dinamico.

1.1. Workflow

Il processo di additive manufacturing inizia con l'ideazione del progetto. Questa fase coinvolge la definizione delle specifiche del prodotto, la progettazione e la creazione di un modello digitale tridimensionale CAD che servirà da base di partenza per la stampa 3D. Si utilizzano software specializzati per creare modelli dettagliati che possono essere facilmente adattati e ottimizzati per il processo di stampa 3D, in particolare una volta completata la progettazione, il modello CAD deve essere preparato per la stampa, ovvero convertito in un formato STL (Solid to Layer) il quale trasforma le superfici del modello approssimandole ad una composizione di triangoli, verificando che le superfici siano opportunamente chiuse. Segue poi il processo di slicing, e la generazione di un file di istruzioni di stampa G-code che contiene tutte le informazioni necessarie per la stampante 3D. Durante questa fase, vengono prese in considerazione diverse variabili, scelto il metallo primitivo e quindi lo spessore

della polvere metallica, possiamo conoscere la risoluzione della stampa, il tempo ed i costi di produzione.

Arriviamo alla fase di produzione con il file G-code pronto, il processo di stampa può iniziare. Le stampanti 3D possono utilizzare una vasta gamma di materiali, tra cui plastica, metallo, ceramica e persino materiali compositi avanzati. Il materiale viene depositato strato dopo strato secondo le istruzioni del file G-code, dando vita al modello tridimensionale desiderato. Durante la stampa, è possibile monitorare il processo e apportare eventuali correzioni in tempo reale.

Durante la produzione si utilizzano strutture di supporto per la realizzazione di modelli con forme particolari o con inclinazioni delle superfici tali da non poter garantire la corretta realizzazione. Le superfici con un'inclinazione superiore ai 45° non possono essere realizzate senza l'utilizzo di supporti, senza di essi queste superfici potrebbero non mantenere la forma prevista e potrebbero deformarsi o collassare durante il processo di stampa. Al fine di minimizzare la deformazione del materiale in fase di raffreddamento, questi supporti vengono aggiunti automaticamente dal software durante la fase di slicing e sono stampati dalla macchina stessa durante il processo. Per evitare eccessivi utilizzi di materiale, minimizzando gli sprechi di materia prima, in fase di progettazione possiamo opportunamente orientare il modello che vogliamo realizzare creando una struttura autoportante, in maniera tale da utilizzare il minor numero di supporti possibili.

Una volta completata la stampa i supporti possono essere rimossi, questa è una fase da non sottovalutare, è un processo che richiede particolare attenzione in quanto i supporti stessi sono in materiale metallico e quindi non semplici da rimuovere. Sebbene l'aggiunta e la rimozione dei supporti possano richiedere

tempo e lavoro aggiuntivo, sono essenziali per garantire la precisione e la qualità delle parti stampate in 3D, specialmente per superfici complesse o inclinate.

Rimossi i supporti otteniamo l'oggetto finale con la forma desiderata e senza residui indesiderati, il prodotto finito può richiedere alcune operazioni post-produzione per raggiungere le specifiche tolleranze desiderate. Questo può includere, la levigatura delle superfici, la verniciatura e altri trattamenti superficiali per migliorare l'aspetto e le prestazioni del pezzo stampato. Segue il controllo qualità, un passaggio fondamentale in qualsiasi processo di produzione, e l'additive manufacturing non fa eccezione. I pezzi stampati vengono sottoposti a una serie di test e ispezioni per verificare la conformità alle specifiche del progetto, oltre che misurazioni dimensionali, analisi strutturali o test funzionali. Una volta superato il controllo qualità, i pezzi stampati possono essere integrati nei loro contesti operativi. Possono essere utilizzati per prototipazione rapida, produzione su scala ridotta, produzione di parti di ricambio personalizzate o per applicazioni specializzate in vari settori.

Il ciclo di vita di un prodotto stampato in 3D non termina con la sua produzione, le tecnologie additive consentono un'ottimizzazione continua dei progetti in base ai feedback ricevuti dall'utilizzo del prodotto, ai miglioramenti dei materiali e delle tecniche di stampa e alle continue nuove scoperte nell'ambito della progettazione e dell'ingegneria. Questo ciclo di feedback e miglioramento continuo contribuisce a mantenere l'additive manufacturing al passo con le esigenze e le sfide in evoluzione delle industrie moderne. Grazie alla sua flessibilità, versatilità e capacità di adattarsi rapidamente alle esigenze del mercato, l'additive manufacturing continua a trasformare radicalmente il modo in cui concepiamo, progettiamo e produciamo oggetti nel mondo moderno.

1.2. Tecnologie

Tra le varie tecniche di Additive manufacturing andremo a descrivere le più utilizzate nel campo dei materiali metallici ovvero Direct Energy Deposition e Laser Powder bed fusion. La Direct Energy Deposition (DED), tradotta in Deposizione Diretta di Energia, è un processo di produzione additiva utilizzato per creare componenti tridimensionali sfruttando energia termica per fondere materiale mentre questo viene depositato strato dopo strato direttamente dall'ugello che contiene il flusso di energia termica. In questo processo, la materia prima che può essere metallo in polvere o sottoforma di filo viene fuso e depositato su un substrato tramite una sorgente di energia termica concentrata, come un raggio laser o un fascio di elettroni (figure 1a e 1b). La fusione comprende sia lo strato precedentemente formato sia la materia prima dentro e attorno al punto dell'energia termica focalizzata. La deposizione si conclude mediante il raffreddamento del bagno di fusione e attraverso la ripetizione della procedura sopra descritta, viene fabbricata una parte metallica 3D [2]. Questo processo viene utilizzato in una varietà di settori, compresa l'industria aerospaziale, automobilistica e medicale, per la produzione di parti complesse, riparazioni e rivestimenti superficiali. La Direct Energy Deposition offre vantaggi come la possibilità di lavorare con una vasta gamma di materiali, la capacità di riparare parti usurate o danneggiate, e la flessibilità nella progettazione e personalizzazione dei componenti.

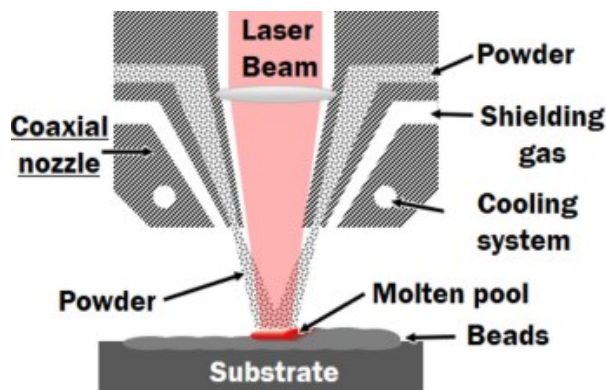


Figura 1a: Schematizzazione Direct energy deposition

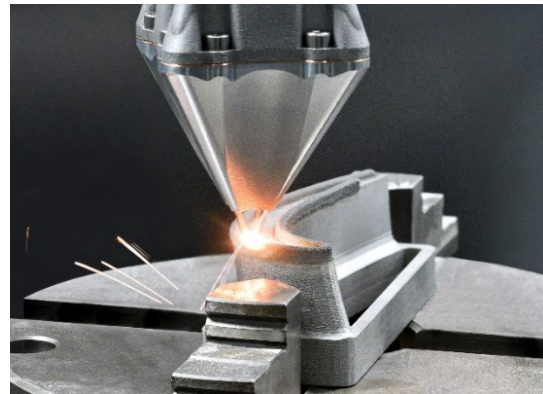


Figura 1b: Direct energy deposition

Introduciamo un'altra particolare tecnica relativa all'additive manufacturing con la quale abbiamo realizzato i provini di Acciaio 316L presi in esame, ovvero Laser Powder Bed Fusion (LPBF), questa tecnica tradotta in fusione a letto di polvere, prevede la fusione di strati di polvere metallica tramite un raggio laser, per l'ottenimento di prodotti tridimensionali. In particolare, si utilizza polvere metallica ottenuta per atomizzazione dal diametro compreso tra $15 \div 45 \mu m$.

Con l'atomizzazione ottengo le polveri metalliche utilizzate nell'Additive Manufacturing, esistono diverse tecniche per effettuare questo processo, tra queste vediamo l'atomizzazione a gas. L'atomizzazione a gas avviene all'interno di un impianto chiamato gas atomizzatore dove il materiale viene fuso in un crogiolo posto all'interno della camera di fusione, il metallo quindi fluisce attraverso un ugello dove si ha un notevole incremento dell'energia cinetica (figura 2). Il fluido subisce un'istantanea espansione grazie anche alla presenza di gas inerte (Azoto, Elio o Argon), le microstrutture del fluido vengono rotte creando gocce indipendenti, che solidificano principalmente in forma sferica depositandosi sul fondo dell'impianto [3].

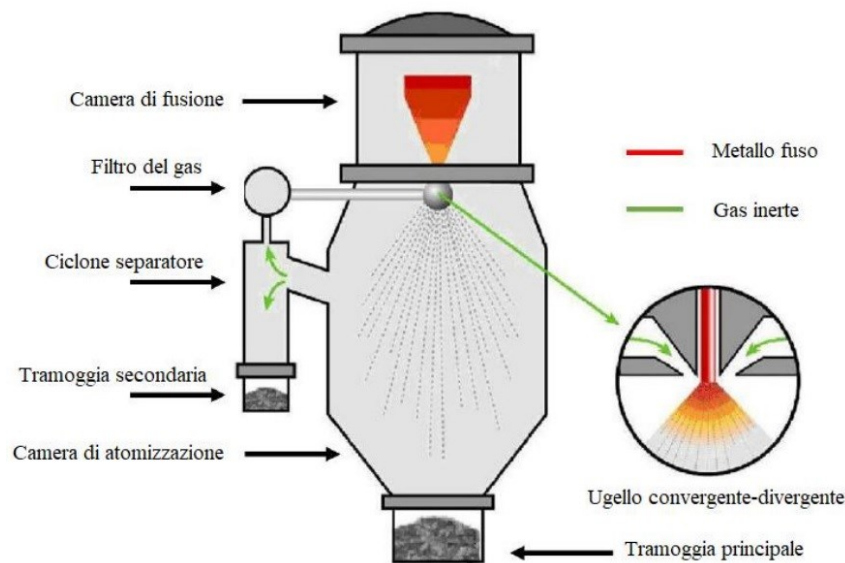


Figura 2: Gas atomizzatore

Il processo del LPBF prevede l'inserimento della polvere nella stampante 3D in un cilindro a fianco del quale troviamo il piatto di costruzione, ovvero il piatto ove sarà eseguito l'accrescimento del pezzo progettato (figura 3). La camera di costruzione viene riempita con un gas con lo scopo di riscaldare l'ambiente e mantenere la temperatura di stampa ottimale, è presente inoltre una lama che assolve la funzione di prelevare la polvere metallica dal cilindro e distribuirla sul piatto di costruzione con uno spessore già definito dal software e che comunque non supera un massimo di $60 \mu m$. Sul piano di costruzione è focalizzato il raggio laser a fibre ottiche ($200/400W$) la cui direzione è controllata da degli specchi e fonderà un sottile strato di polvere, una volta completato lo strato, il piatto si sposta verso il basso consentendo l'aggiunta di un altro strato di polvere, questo procedimento viene ripetuto sino alla completa realizzazione del pezzo, il raggio laser è quindi fisso su un piano focale mentre è il piatto di costruzione a muoversi scendendo molto lentamente e permettendo l'accrescimento verticale del prodotto.

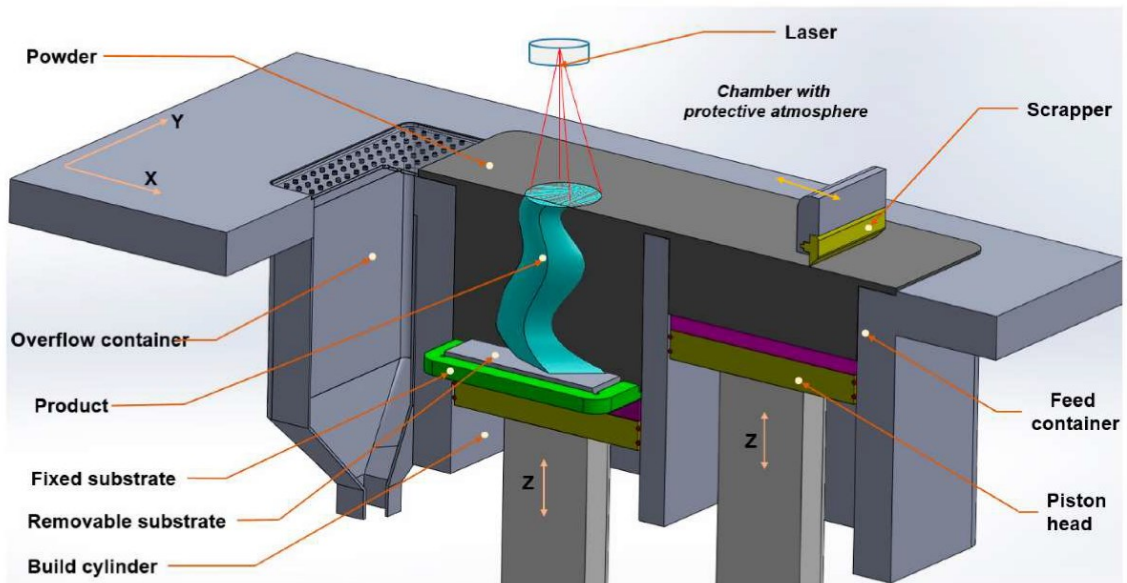


Figura 3: Laser Powder Bed Fusion

Alla fine del processo il pezzo è sommerso di polvere non fusa che andrà rimossa, così come i supporti, è quindi necessario lasciare opportuni fori nel pezzo affinché sia possibile eliminare la polvere depositata anche al suo interno (figura 4).



Figura 4: Rimozione polvere

La differenza principale tra Laser Powder Bed Fusion (LPBF) e Direct Energy Deposition (DED) riguarda il modo in cui il materiale di alimentazione viene depositato e fuso per creare il componente desiderato.

Nel LPBF, il materiale di alimentazione in polvere viene fuso strato dopo strato utilizzando un laser focalizzato su un letto di polvere. Il processo avviene

all'interno di una camera a vuoto o in un ambiente controllato per evitare contaminazioni. LPBF è spesso utilizzato per creare componenti con alta precisione dimensionale e finitura superficiale, ed è particolarmente adatto per la produzione di parti complesse con geometrie intricate. Nella DED, il materiale di alimentazione viene fuso e depositato direttamente su un substrato utilizzando una sorgente di energia concentrata, come un laser o un fascio di elettroni, questo processo non richiede un letto di polvere, il materiale da fondere viene distribuito direttamente in corrispondenza dell'area interessate, il che consente una maggiore libertà di forma e dimensioni rispetto al LPBF. La DED è spesso utilizzata per la riparazione di parti esistenti, il rivestimento superficiale e la produzione di grandi componenti, come strutture aeronautiche, i tempi di produzione nella DED sono solitamente è più veloci rispetto al LPBF ma dal punto di vista delle finiture superficiali risulta meno precisa.

In sintesi, entrambi i processi sono tecniche di fabbricazione additiva, il LPBF si concentra sulla fusione di polvere in uno strato sottile, mentre il DED si concentra sulla deposizione diretta di materiale fuso su un substrato senza l'uso di un letto di polvere.

2. Materiali metallici per assorbimento urti

Il comportamento dei materiali metallici in risposta agli urti dipende da diversi fattori, tra cui la composizione chimica del materiale in esame, la microstruttura dello stesso, la temperatura alla quale viene effettuata la prova e la velocità dell'impatto. La microstruttura di un materiale comprende la grandezza e la direzione di accrescimento dei grani, la presenza di inclusioni o difetti quali cavità, ed influisce sulla capacità di assorbire urti.

Non bisogna inoltre sottovalutare gli eventuali trattamenti termici volti a migliorare le proprietà meccaniche del materiale e finiture superficiali. Troviamo quindi diverse caratteristiche del materiale da tenere in considerazione per la realizzazione del prodotto desiderato, in particolare possiamo valutare resilienza, durezza e tenacità.

La resilienza è la capacità del materiale di assorbire energia durante la deformazione, questa energia quindi è generata da una deformazione di tipo elastica, la quale permette al materiale di recuperare la sua forma originale al rilascio del carico di prova. I materiali metallici come l'acciaio legato o le leghe di alluminio sono generalmente noti per avere buone proprietà di resilienza, rendendoli adatti per applicazioni dove è richiesta una certa flessibilità senza compromettere la resistenza.

La durezza è la resistenza di un materiale a essere penetrato o deformato. Materiali metallici più duri, come l'acciaio ad alto tenore di carbonio o leghe speciali, possono resistere meglio agli urti ad alta velocità ma potrebbero essere più fragili e quindi meno in grado di assorbire energia senza subire danni permanenti.

La tenacità è la capacità di un materiale di resistere alla frattura deformandosi sotto l'azione di una forza applicata senza arrivare a rottura, rendendo il materiale adatto per applicazioni in cui sono richieste elevate proprietà di assorbimento degli urti.

Le tecniche di fabbricazione additiva possono interessare una grande varietà di metalli, ma non tutti si prestano bene a questa tecnologia, ad esempio metalli ad alto punto di fusione come l'oro e il platino, possono essere più difficili da lavorare, perché oltre che dal punto di vista economico, eccessive temperature di fusione richiederebbero tempi di raffreddamento e solidificazione che non rispettano le specifiche di stampa, infatti la realizzazione in strati di materiale sovrapposti è possibile grazie alle alte velocità di solidificazione che permettono un progressivo accrescimento del pezzo e quindi una produttività elevata.

Nel Laser Powder Bed Fusion si preferiscono leghe metalliche come l'acciaio inossidabile, l'alluminio o il titanio, scelti per le loro proprietà di lavorazione e la loro capacità di fondere e solidificare in modo affidabile, in particolare i provini studiati sono realizzati in acciaio 316L.

2.1. Acciaio 316L

Il termine acciaio indica in maniera generica una lega tra due elementi principali ovvero ferro (Fe) e carbonio (C). Il ferro è un elemento metallico mentre il carbonio è un elemento non metallico che assolve la funzione di legante principale. Il suo contenuto percentuale oscilla tra lo 0,002% ed il 2,1%, in termini di peso, se la percentuale di carbonio presente supera il 2,1%, la lega prende il nome di ghisa.

Nel 1872 venne brevettato l'acciaio Inox, quando gli inglesi Woods e Clark scoprirono che, aggiungendo una parte di cromo alla classica lega di ferro e carbonio, si otteneva questo nuovo materiale resistente alla ruggine.

Infatti, gli acciai inossidabili o acciai inox sono per definizione leghe che grazie all'aggiunta di cromo uniscono alle proprietà meccaniche tipiche degli acciai anche una buona resistenza alla corrosione. Affinché l'acciaio possa essere classificato come inossidabile deve contenere un valore minimo di cromo pari all'11-12%, un acciaio con un'alta presenza di carbonio nella lega, risulterà più duro, ma allo stesso tempo meno duttile di uno con una bassa percentuale di carbonio. Questo tipo di acciai è in grado di passivarsi grazie al contenuto di cromo, cioè di ricoprirsi di un film protettivo molto denso e sottile, caratterizzato da uno spessore dell'ordine di grandezza di 1-10 nm, ma sufficiente a proteggere il metallo sottostante dagli attacchi corrosivi dell'ossigeno e di altri agenti chimici.

Sono presenti anche altri elementi: manganese, fosforo, zolfo, silicio, rame ed in quantità minore azoto, alluminio ed ossigeno. L'aggiunta intenzionale di ulteriori elementi come nichel, cromo, molibdeno, manganese, titanio, boro, niobio e vanadio, ci permettono di controllare le caratteristiche dell'acciaio quali: tenacità, duttilità, temprabilità, durezza, fragilità, resistenza all'usura, resistenza al calore, resistenza alla corrosione, resistenza alla trazione.

Esistono diverse tipologie di acciaio inossidabile, divise in quattro categorie e classificate secondo la loro struttura molecolare quali acciaio austenitico, martensitico, ferritico e duplex.

L'AISI 316 è una lega di acciaio inox austenitica dove AISI indica la sigla dell'Istituto Americano per Ferro e Acciaio (American Iron and Steel Institute).

Questa lega è composta da un tenore di cromo tra il 16% ed il 18%, di nichel tra l'11% e il 14% e di molibdeno tra il 2% ed il 3% utile per migliorare la resistenza alla corrosione elettrolitica da cloruri, risulta quindi particolarmente adatto all'esercizio in ambienti marini. Un altro aspetto positivo di questa lega è la saldabilità che risulta eccellente dato il basso tenore di carbonio che limita la precipitazione dei carburi di cromo.

In commercio esiste anche un'altra versione dell'acciaio AISI316 denominata 316L (low carbon) ovvero con un tenore di carbonio inferiore per impedire la precipitazione dei carburi di cromo e dunque la corrosione. Il 316L viene impiegato in numerosi settori, tra cui troviamo farmaceutico, industriale, agroalimentare ed in ambienti chimici acidi. Grazie alle sue proprietà fisico chimiche l'AISI 316L è uno degli acciai inossidabili più utilizzati per l'additive manufacturing. L'ampio utilizzo di questo acciaio per la fabbricazione additiva è dovuto a diversi fattori, come l'alta conducibilità termica, che favorisce la dissipazione del calore generato durante il processo di stampa, impedendo gradienti termici eccessivi e minimizzando gli stress termici [4].

La composizione e le proprietà meccaniche caratteristiche di un generico componente formato da acciaio austenitico AISI 316L vengono illustrate nelle seguenti tabelle 1.1 e 1.2 [5].

COMPOSIZIONE CHIMICA AISI 316L	C% (max)	Si% (max)	Mn% (max)	P% (max)	S% (max)	Cr%	N% (max)	Ni%	Mo%
	0,03	1,00	2,00	0,045	0,030	16,5-18,5	0,11	10,0-13,0	2,0-2,5

Tabella 1.1: Composizione chimica acciaio AISI 316L

PROPRIETÀ MECCANICHE AISI 316 L	Tensione di rottura (Rm)	Tensione di snervamento (Rp0,2)	Modulo elastico (E)	Allungamento a rottura %	Durezza Brinell
	500-700 MPa	200-300 MPa	200 GPa	40 %	215 HB

Tabella 1.2: Proprietà meccaniche acciaio AISI 316L

La microstruttura caratteristica che si genera per questo tipo di lega mostra una struttura prevalentemente formata da grani molto fini con regioni costituite da grani allungati (200-400 μm) orientati secondo la direzione di asportazione del calore in fase di solidificazione (figura 5).

L'acciaio 316L abbiamo visto essere di tipo austenitico, quindi presenterà una quantità dominante di fase austenitica con struttura a facce centrate (face centered cubic FCC) rispetto a quella ferritica con struttura a corpo centrato (body centered cubic BCC) confinata principalmente lungo i bordi grano [6].

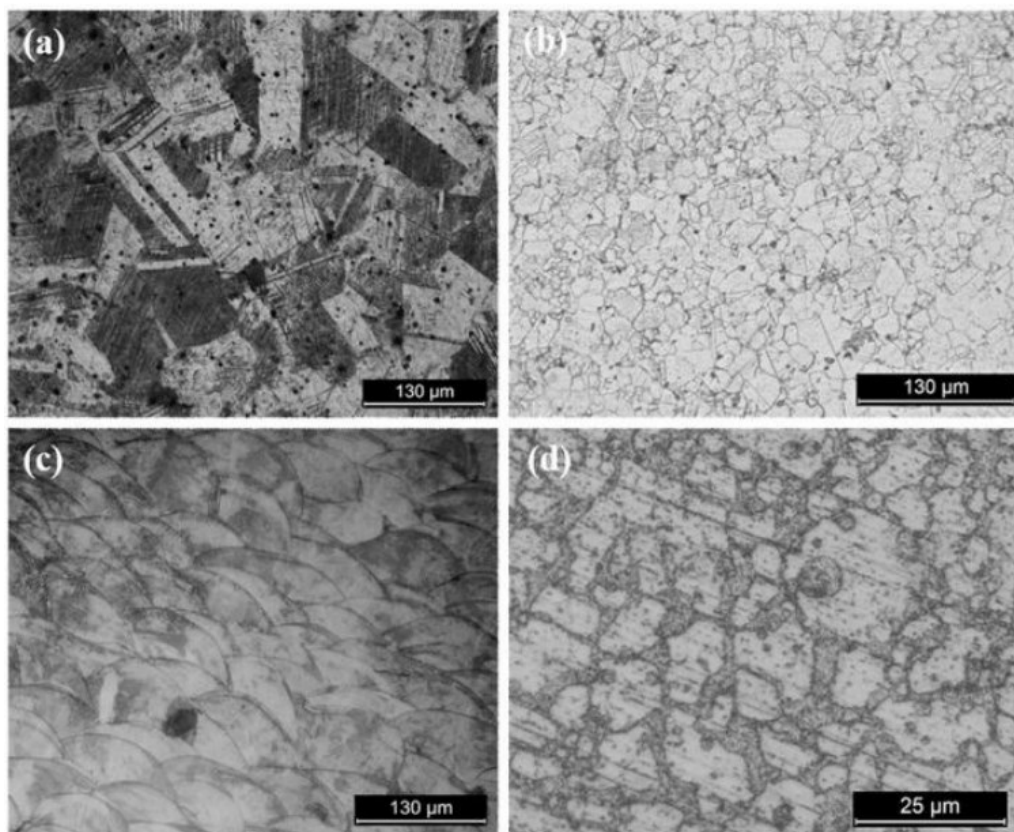


Figura 5: esempio microstrutture 316l da diverse tecniche di produzione a) Casting, b) Hot Pressing

c) LPBF con acido Nitroclorico, d) LPBF con acido Picrico e Cloridrico

2.2. Prova statica e dinamica

I due provini presi in esame sono stati sottoposti a due prove di compressione differenti, una di tipo quasi statica ed una di tipo dinamica. Le prove di compressione così come quelle di trazione sono eseguite al fine di valutare l'integrità e la sicurezza di materiali, componenti e prodotti durante diverse fasi del processo di produzione, sono inoltre utilizzate per simulare carichi di esercizio. Risulta impossibile riprodurre tutte le infinite casistiche e variabili possibili, per motivazioni legate alle dimensioni reali dei prodotti in analisi, quindi standardizzando le prove ovvero rispettando delle regole ben definite nel panorama sperimentale meccanico, è possibile ricondurci ad un modello confrontabile con altre sperimentazioni.

La prova di compressione quasi statica viene eseguita comprimendo il provino fra due superfici piane e parallele (figura 6), è definita quasi statica perché la compressione avviene in tempi molto lunghi ovvero ad una bassissima velocità di deformazione con $\dot{\epsilon}$ compreso tra 0.001 s^{-1} e 1 s^{-1} . L'avanzamento delle superfici dedite alla compressione è ottenuto dall'applicazione del carico (P) grazie a dei pistoni idraulici ed è controllata da un computer ove vediamo in output dati quali la forza applicata e l'avanzamento delle superfici, che nel caso di compressione si traduce in differenza di altezza tra inizio e fine prova.

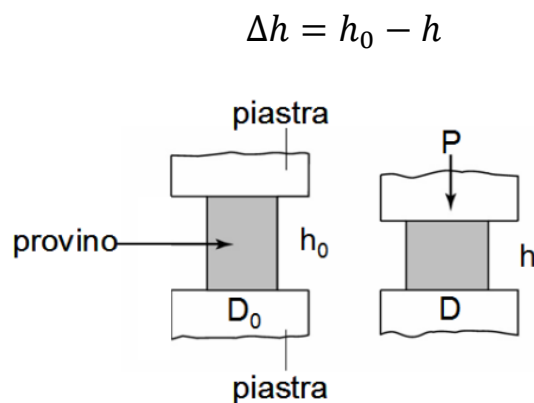


Figura 6: Prova di compressione quasi statica

La prova di compressione dinamica viene eseguita attraverso la barra di Hopkinson, un dispositivo che a differenza delle macchine di prova quasi statiche, consente di determinare le proprietà, le costanti e le caratteristiche dei materiali in condizioni dinamiche. Con la barra di Hopkinson possiamo analizzare le proprietà dei materiali durante deformazioni eseguite ad elevate velocità (Strain Rate) con $\dot{\epsilon} = 1300 \text{ s}^{-1}$. In questo modo ricaviamo curve di sforzo-deformazione eseguite ad elevate velocità di deformazione e le quali sarebbero impossibili da ottenere con le tradizionali macchine idrauliche come ad esempio quella utilizzata nella prova quasi statica.

Le proprietà dei materiali solitamente riportate nei manuali, come ad esempio la tensione di rottura o la tensione di snervamento, sono ottenute con prove di carico quasi statico. È fondamentale però conoscere anche altri parametri quali l'ampiezza, la forma e la durata dell'impulso di pressione agente sui materiali, e quindi la risposta dinamica dei materiali attraversati dall'impulso fino al collasso degli stessi ottenendo così la completa curva sforzo-deformazione. Effettuare test di materiali utilizzando la Barra di Hopkinson è di elevata importanza per dare una completa descrizione del comportamento del materiale in condizioni più prossime a quelle che sono le reali condizioni di utilizzo dello stesso e di conseguenza caratterizzare in maniera più precisa il materiale dando informazioni più dettagliate per la scelta del materiale in un determinato ambiente di lavoro. Molteplici problemi ingegneristici prevedono velocità di deformazione comprese nell'intervallo di lavoro della Barra di Hopkinson, come ad esempio nella sicurezza passiva dei veicoli, nelle applicazioni balistiche, nella verifica delle strutture soggette ad impatto, ad esplosione, fino alle operazioni legate allo scavo sotterraneo, alla ricerca sismica e alla progettazione di strutture di protezione, e molte altre applicazioni [7].

Esistono due tipologie di configurazioni si questa particolare prova: la Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) e la barra di Davies (Single pressure bar). La versione utilizzata per la nostra trattazione è la Split Hopkinson Pressure Bar (figura 7).



Figura 7: Barra di Hopkinson

La barra di Hopkinson è composta da due barre lunghe e simmetriche con una sezione trasversale uniforme, costituite dallo stesso materiale metallico, sorrette e allineate tramite dei supporti che si inseriscono su una struttura che funge da base. Le barre sono collocate una di seguito all'altra in modo tale che il provino si posizioni perfettamente al centro tra le loro estremità (figura 8).

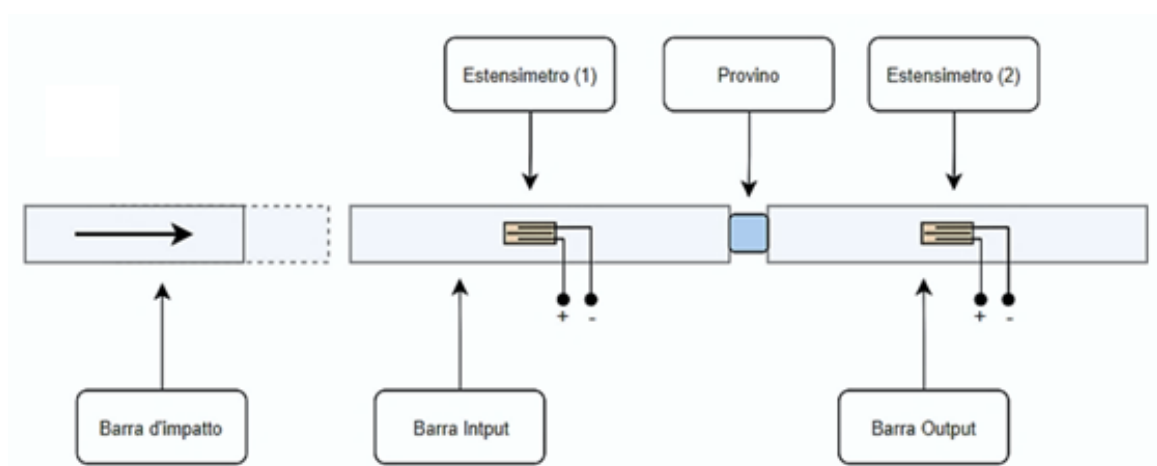


Figura 8: Schematizzazione barra di Hopkinson

La prima barra prende il nome di Input Bar, in questa passerà per primo l'impulso di pressione generando l'accelerazione della barra stessa che, essendo mobile, andrà a deformare il provino. La seconda barra chiamata Output Bar è posizionata subito dopo il provino, è l'ultima attraversata dall'impulso ed è seguita da un supporto di sicurezza che le impedisce di muoversi. Il sistema di generazione dell'impulso è costituito da una terza barra detta barra d'impatto (Striker Bar), posizionata prima della Input Bar e sfrutta un attuatore o un sistema con cannone a gas (Gas Gun) [8]. Il provino di forma cilindrica viene posizionato tra la barra di Input e quella di Output, questo riceverà l'onda d'urto trasmessa dalla barra d'impatto alla barra di input per poi restituirla in parte alla barra di input e in parte alla barra di output.

L'utilizzo di estensimetri installati sulle superfici della Input Bar e della Output Bar permettono di studiare la propagazione delle onde nelle barre e risalire al comportamento del materiale del provino, misurando le deformazioni provocate dall'impulso d'urto. Attraverso il sistema di acquisizione dati possiamo controllare, registrare e analizzare i dati dell'onda di tensione nelle barre.

Il principio di funzionamento si basa sulla generazione di un'onda di tensione-deformazione e la sua propagazione attraverso i componenti dell'apparato. L'impulso, che si propaga lungo i diversi elementi che costituiscono la struttura della barra di Hopkinson, viaggiando a velocità elevatissima, si trasmette al provino che subisce deformazioni plastiche, spesso fino a rottura. In particolare, questo impulso d'urto corre lungo la prima barra e quando raggiunge l'interfaccia Input Bar-Provino una parte dell'impulso viene riflesso dall'estremità della barra; l'altra parte attraversa il campione di materiale e la barra di Output. Dallo studio della propagazione delle onde nelle barre si risale

al comportamento del materiale del provino e con gli estensimetri installati sulle superfici della Input Bar e della Output Bar si misurano le deformazioni provocate dall'impulso d'urto [7].

3. Procedure sperimentali

In laboratorio sono stati analizzati entrambi i provini in acciaio 316L, ovvero quello che ha subito la prova di compressione statica e quello sottoposto a prova di compressione dinamica. In particolare, questi provini sono stati realizzati mediante Laser Powder Bed Fusion e prima della prova presentano le medesime caratteristiche strutturali e dimensionali. La seguente descrizione riguardante la procedura di preparazione del campione metallico è stata eseguita in egual modo per entrambi i provini studiati.

3.1. Preparazione metallografica

La preparazione metallografica viene eseguita al termine delle prove di compressione al fine di analizzare le caratteristiche del provino dopo la deformazione, inizia con il taglio tramite una mola lungo il piano XY ovvero il piano perpendicolare alla direzione Z di accrescimento del provino al momento della stampa (figura 9).

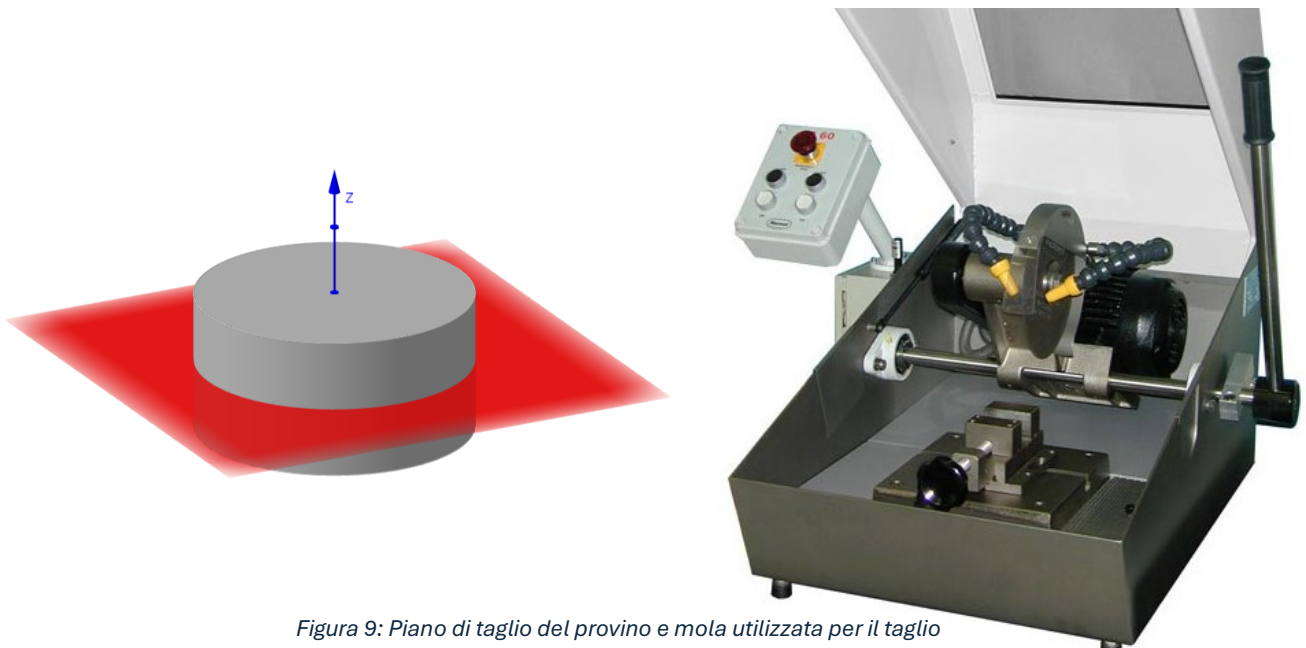


Figura 9: Piano di taglio del provino e mola utilizzata per il taglio

Il provino tagliato viene inglobato in resine al fine di migliorarne la maneggevolezza e poter eseguire le successive fasi di preparazione, si utilizza quindi un'inglobatrice a caldo (figura 10), dove il pezzo di lega metallica viene inglobata con della resina termoplastica tramite un processo di polimerizzazione a caldo. Il pezzo tagliato viene poi inserito nella macchina inglobatrice ruotato di 90°, così che alla fine del processo ci troveremo ad analizzare la faccia XZ (figura 11a).



Figura 10: Inglobatrice a caldo

Segue il processo di assottigliamento meccanico, dove utilizzando una lappatrice a dischi rotanti equipaggiati con carte abrasive levighiamo la superficie metallica. Le carte abrasive in particolare sono costituite da carburi di silicio di diverse granulometrie medie per $inch^2$ (mesh). Su tali carte è indicata la densità media dei carburi di silicio: una bassa densità indica un

minor numero di carburi, i quali però saranno di dimensione media più grande, risulta quindi una carta molto aggressiva e decisamente abrasiva. Al contrario, le carte ad alta densità di carburi di silicio avranno una numerazione più alta ed i carburi saranno caratterizzati da minori dimensioni. Questi passaggi consentono di iniziare il lavoro di assottigliamento con una abrasione più aggressiva, al fine di raggiungere il centro del provino in maniera rapida per poi arrivare gradualmente a carte con grani più fini, quindi le carte utilizzate sono impiegate nel seguente ordine: 600, 1200, 2000 e 4000.

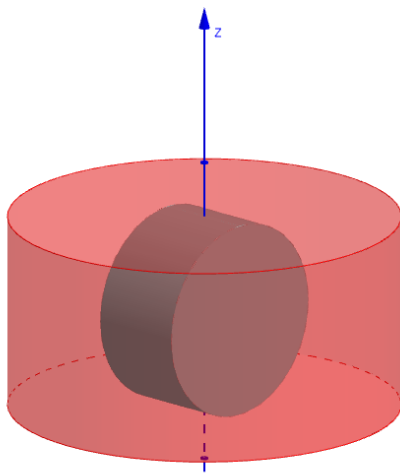


Figura 11a: Provino prima dell'assottigliamento

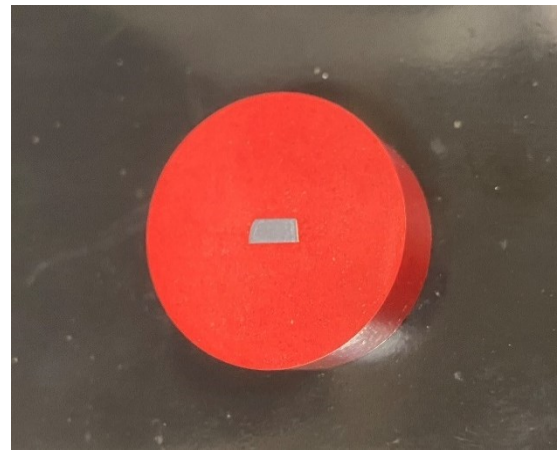


Figura 11b: Faccia XY provino dopo l'assottigliamento

Durante l'assottigliamento è necessario seguire un orientamento ben definito; infatti, nell'utilizzo di una carta abrasiva è importante mantenere il provino nella stessa orientazione al fine di ottenere graffi orientati tutti nella stessa direzione. Passando da una carta con granulometria maggiore ad una con grani più fini, si ruota il provino di 90 gradi al fine di eliminare completamente i graffi precedenti (figura 11b).

Durante il processo prima di passare da una carta abrasiva all'altra è possibile controllare la corretta esecuzione osservando il provino attraverso un

microscopio ottico. I graffi dell'ultima carta sono poi eliminati con l'impiego della lucidatrice (figura 12). In questa particolare macchina troviamo un disco rotante sul quale viene incollato un panno lucidante cosparso di lubrificante e pasta diamantata che consente di ottenere una superficie lucida a specchio.



Figura 12: Lucidatrice

Possiamo poi osservare il campione con un microscopio ottico ove vediamo in risalto i vuoti e cavità presenti della microstruttura della lega metallica.

In particolare, nel microscopio ottico elettronico la sorgente luminosa emette raggi di lunghezza d'onda λ compresa tra $400 \div 700 \text{ nm}$ che vengono riflessi da uno specchio verso il condensatore, un sistema di lenti con la funzione di concentrare i raggi luminosi sull'oggetto da esaminare. I raggi che colpiscono il campione sono raccolti dalle lenti dell'obiettivo, ovvero un sistema di lenti convergenti a corta focale che esegue un primo ingrandimento e proietta l'immagine verso l'oculare. L'oculare è un secondo sistema di lenti che raccoglie l'immagine dell'obiettivo e la ingrandisce ulteriormente proiettandola poi verso l'occhio dell'operatore per l'osservazione. L'ingrandimento del microscopio ottico elettronico varia tra $1000 \div 2000x$ limite dovuto alla lunghezza d'onda λ della luce visibile. Il microscopio ottico utilizzato per

questa trattazione ha una configurazione invertita rispetto al tradizionale microscopio, questo significa che la fonte di luce e gli obiettivi sono situati sotto il campione (figura 13).

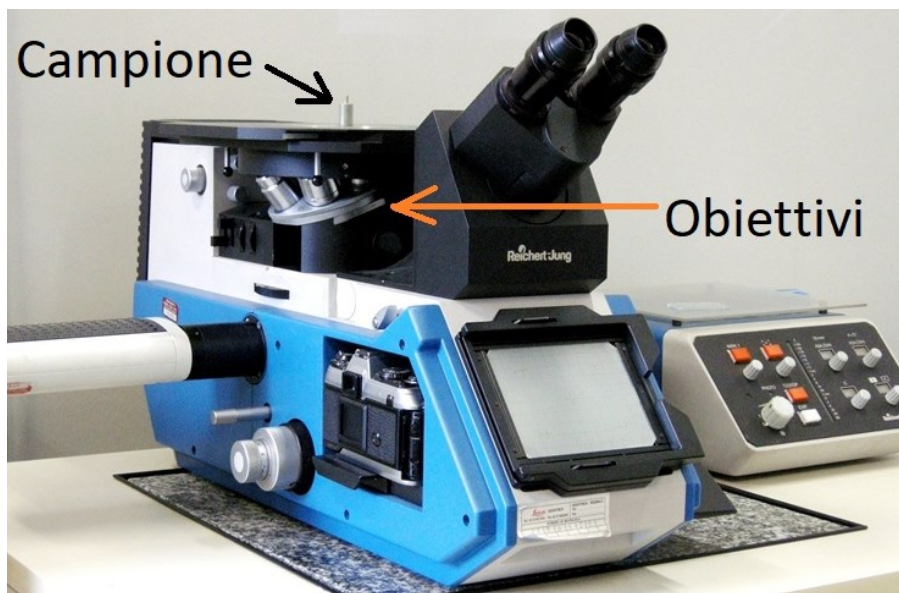


Figura 13: Microscopio ottico elettronico

Per facilitare la visualizzazione del campione inseriamo una telecamera all'interno del microscopio elettronico al fine di effettuare le osservazioni direttamente dallo schermo del computer, potendo così effettuare delle acquisizioni a diversi ingrandimenti (figure 14a e 14b).

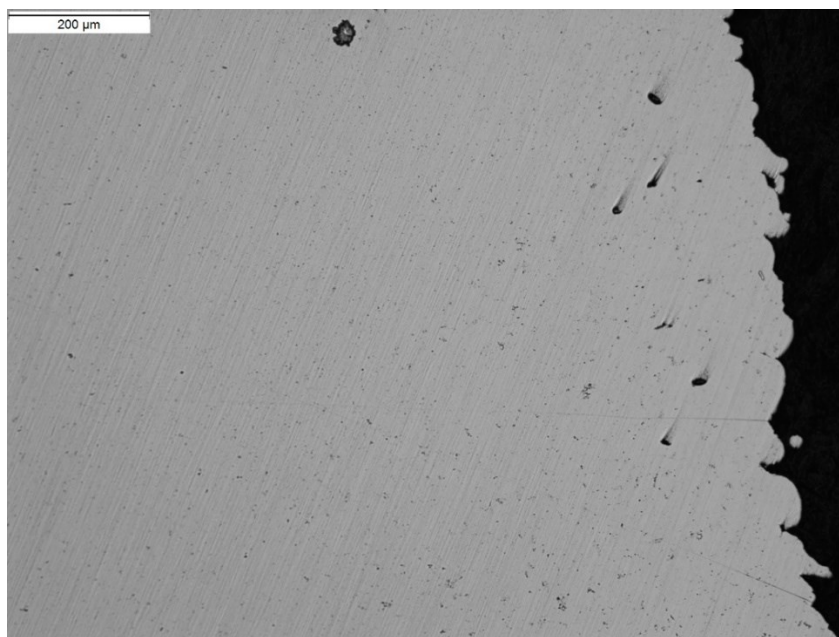


Figura 14a: Ingrandimento 10x microstruttura AISI 316L

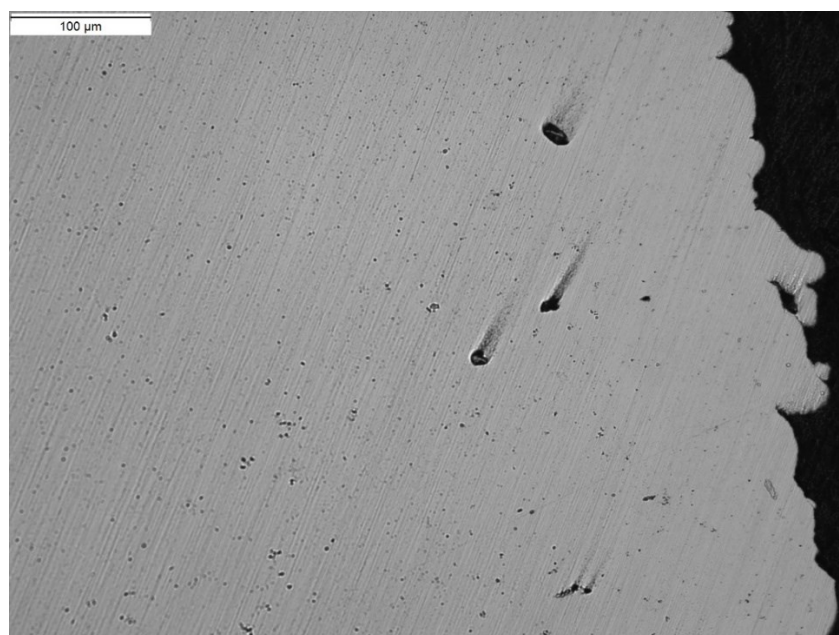


Figura 14b: Ingrandimento 20x microstruttura AISI 316L

3.2. Attacco chimico

L'attacco chimico mette in risalto dettagli della microstruttura del materiale perché corrode le discontinuità, tra cui bordi di grano, carburi, grafite e strutture allotropiche (figura 15). Un attacco chimico è effettuato mediante l'impiego di un acido ed un solvente; sono inoltre influenti la temperatura e l'umidità dell'ambiente ove si effettua l'attacco chimico e il tempo impiegato per completare l'operazione. Il tempo di applicazione e permanenza degli acidi sulla superficie del metallo è di estrema importanza in quanto questi penetrano e corrodono le discontinuità; quindi, maggior tempo si lascia agli acidi per agire e più risaltanti saranno i dettagli. Esiste però un limite di tempo oltre il quale il prolungato contatto con gli acidi altererebbe la superficie facendola risultare inutilizzabile.

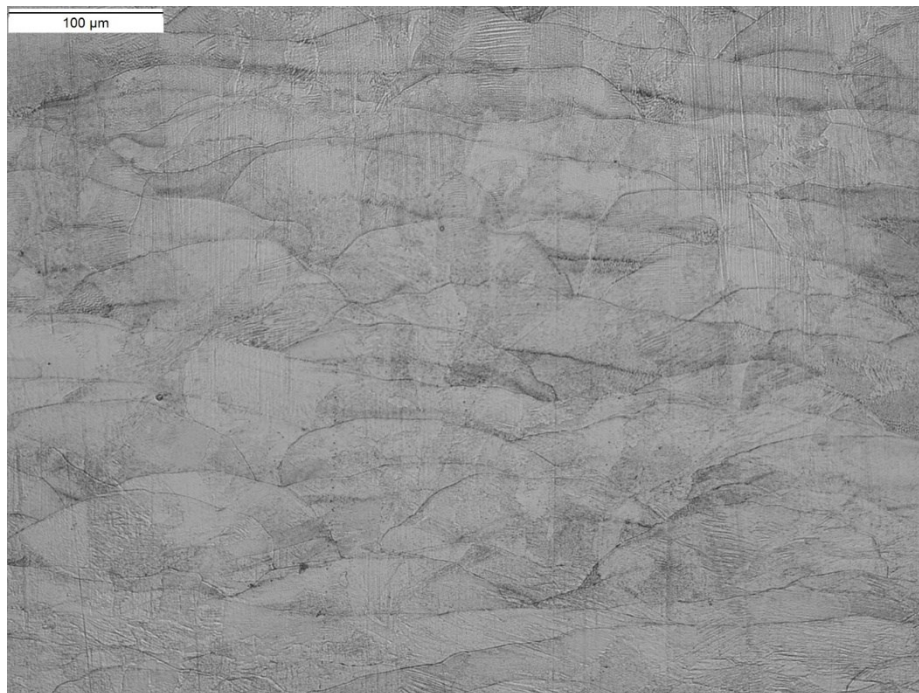


Figura 15: Superficie provino dopo attacco chimico

3.3.Prova microdurezza Vickers

Sui campioni di interesse sono state svolte delle prove di microdurezza Vickers, con l'obiettivo di analizzare la durezza del materiale ovvero la resistenza alla penetrazione ed ottenere un indice che ne identifichi appunto i punti di durezza [9]. I test di durezza rispetto a qualsiasi altro test meccanico vengono eseguiti più frequentemente per via della loro semplicità ed economicità. Il test non è distruttivo, ma determina semplicemente il rilascio di un'impronta superficiale. Tale prova viene svolta tramite una macchina apposita, ovvero il microdurometro mostrato in figura 16, in cui è presente un penetratore a forma di piramide retta a base quadrata (tipo Vickers) la cui punta di diamante esercita un carico pari a 25 *gf* sul campione e mantenuto per un tempo di 10 s. Tali valori sono quelli utilizzati per le prove inerenti a questa tesi, ma possono essere modificati a seconda delle caratteristiche del campione e del materiale metallico oggetti di studio

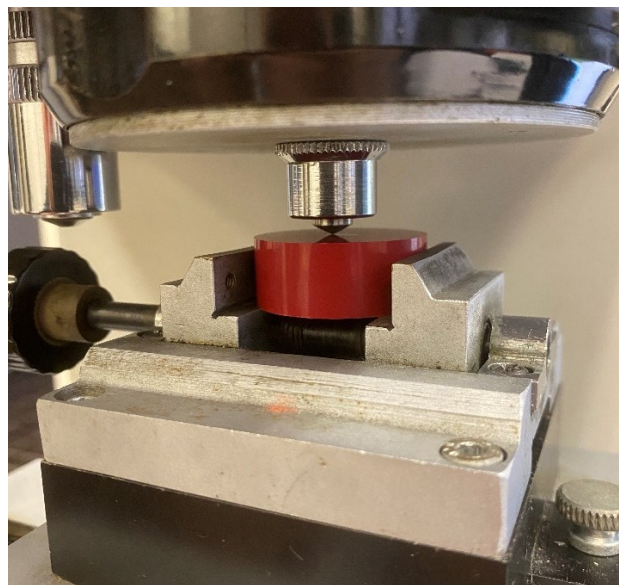


Figura 16: Macchina prova microdurezza Vickers

Il processo viene ripetuto per un elevato numero di volte nei punti caratteristici del provino ovvero lungo i bordi e al centro, e per ogni prova viene lasciata un'impronta di forma quadrata che tramite una telecamera viene osservata ed analizzata sullo schermo del computer. Tramite un software di misurazione, tracciamo graficamente le due diagonali dell'impronta piramidale al fine di misurarne la lunghezza, il software poi ci restituisce il valore della diagonale media (figura 17).

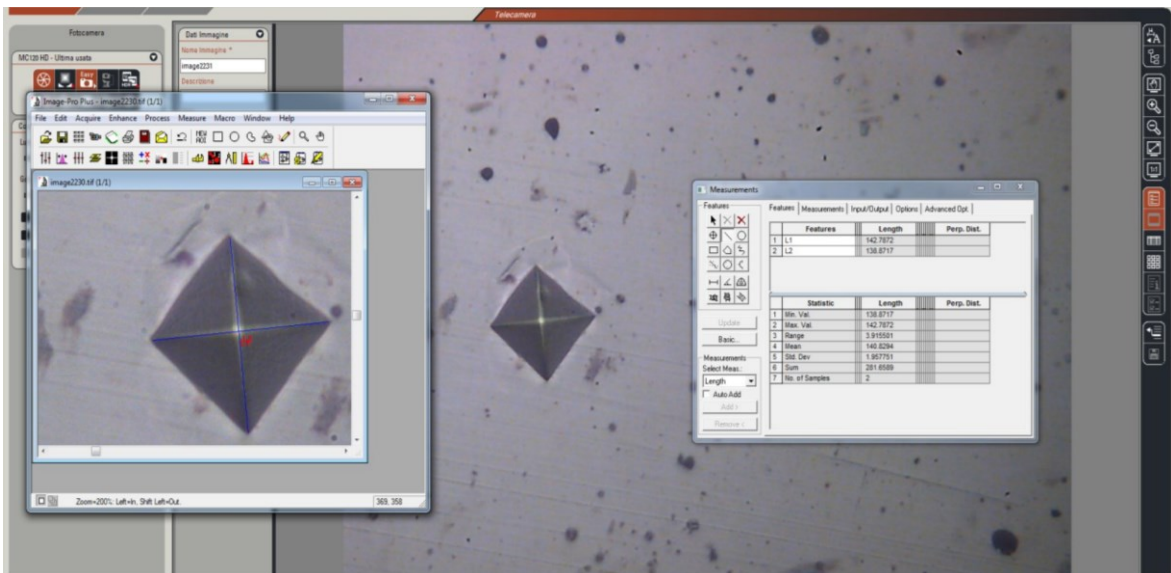


Figura 17: Software per la misura delle diagonali delle impronte

Riportiamo i valori delle diagonali medie di tutte le impronte eseguite, in un file Excel (figura 18) dove abbiamo inserito la seguente formula che ci permette di calcolare la durezza, ed inoltre troviamo la conversione in *MPa* e *GPa*.

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad 0,102 = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

Dove F indica il carico di prova che noi abbiamo impostato a 25 gf mentre d indica la diagonale media dell'impronta.

CALCOLO MICRODUREZZA				TABELLA DI CONVERSIONE			
Carico applicato		25	gf	Media HV	#####		
Diagonale	HV	MPa	GPa	Vickers (120 chilogrammi)	Brinell (sfera da 10 millimetri, un carico da 3000 chilogrammi)	Rockwell C (cono da 120 gradi 150 chilogrammi)	Rockwell B (1/16 " sfera 100 chilogrammi)
54	250	2452	2,45	-	800	72	-
49	304	2986	2,99	1220	780	71	-
47	330	3238	3,24	1170	760	70	-
50	292	2867	2,87	1114	745	68	-
48	328	3221	3,22	1060	725	67	-
48	324	3174	3,17	1021	712	66	-
50	292	2867	2,87	940	682	65	-
49	309	3028	3,03	905	668	64	-
51	281	2755	2,75	867	652	63	-
66	171	1677	1,68	803	626	62	-
48	321	3147	3,15	775	614	61	-

Figura 18: Foglio Excel per il calcolo delle microdurezze

4. Risultati e discussione

Per completare lo studio, vengono esposti ed analizzati i dati rilevati dalle prove effettuate sui campioni, integrate con le immagini pre e post attacco chimico in modo da analizzare i bordi di grano nelle zone di maggior concentrazione dei vuoti. In particolare, sono state analizzate le curve di tensione e deformazione derivanti dalle prove di carico effettuate sui provini in relazione alla velocità di deformazione. Un aumento della velocità di deformazione è porta solitamente ad un aumento della resistenza alla deformazione σ . I dati riportati dalle sperimentazioni effettuate sui provini in esame hanno evidenziato che nonostante le pronunciate differenze di velocità di deformazione tra prova quasi statica e prova dinamica, non si manifesta un sostanziale/accentuato incremento delle tensioni. Si nota la presenza di un picco di tensione iniziale per il provino sottoposto a prove dinamiche, dovuto a fenomeni inerziali che si verificano in test ad alta velocità e che porta all'incremento della tensione di snervamento, mentre la regione di deformazione plastica per entrambi i provini è sostanzialmente sovrapponibile.

Sono state poi analizzate le impronte effettuate nelle prove di microdurezza Vickers e valutate mediante l'utilizzo di software. Tramite un file Excel sono stati riportati tutti i valori di durezza Vickers trovati in ogni singolo punto e da qui si è potuto calcolare la media totale della durezza ed inoltre la media e deviazione standard lungo le linee orizzontali e verticali. I campioni sono stati posizionati sulla macchina seguendo lo stesso schema, e le misurazioni sono state effettuate seguendo lo standard in figura 19.

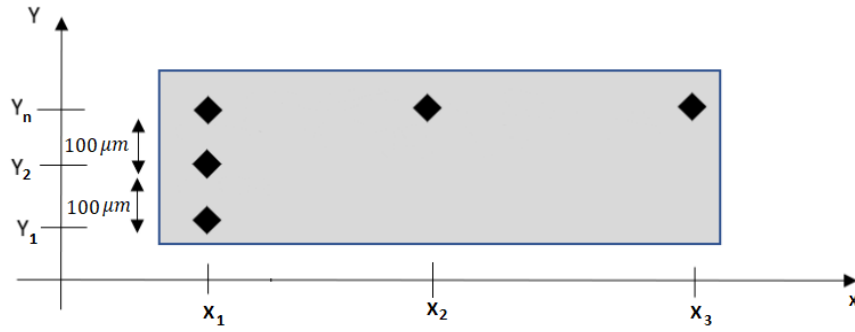


Figura 19: Schema distanziamento misurazioni

In particolare, sul lato corto del provino, individuato dall'asse delle ordinate Y, sono state effettuate 23 impronte nelle posizioni estreme ed al centro come individuato dai tre punti di coordinate X. Di seguito si riportano inizialmente i risultati ottenuti dalla prova Vickers sul provino che ha subito una compressione di tipo quasi statica (figure 20a e 20b); in seguito vengono mostrati i risultati della stessa prova per il provino che ha subito la prova dinamica (21a e 21b).

Provino sottoposto a prova quasi statica - Faccia XY

	Y1	Y2	Y3	Media	Dev. Standard
X1	292	266	271	276	13,6837
X2	266	248	276	263	14,3337
X3	314	196	289	266	62,1969
X4	242	310	305	286	37,5788
X5	273	269	239	260	18,8457
X6	290	220	237	249	36,3050
X7	212	273	306	264	47,5173
X8	308	322	233	287	47,7477
X9	335	329	277	313	31,9997
X10	272	308	300	293	18,9870
X11	288	274	281	281	6,8901
X12	256	246	273	258	13,5699
X13	287	282	252	274	19,0186
X14	263	284	266	271	11,6509
X15	264	339	281	295	39,1099
X16	302	302	258	288	25,2939
X17	317	263	282	287	27,3119
X18	245	308	286	280	31,8755
X19	281	272	296	283	12,1467
X20	301	274	265	280	18,7668
X21	240	280	315	279	37,4512
X22	280	272	283	278	5,7767
X23	260	279	254	264	13,3342
Media	278	279	275	MEDIA	277
Dev. Standard	29	33	22		

Figura 20a: Foglio Excel durezza Vickers campione prova quasi statica

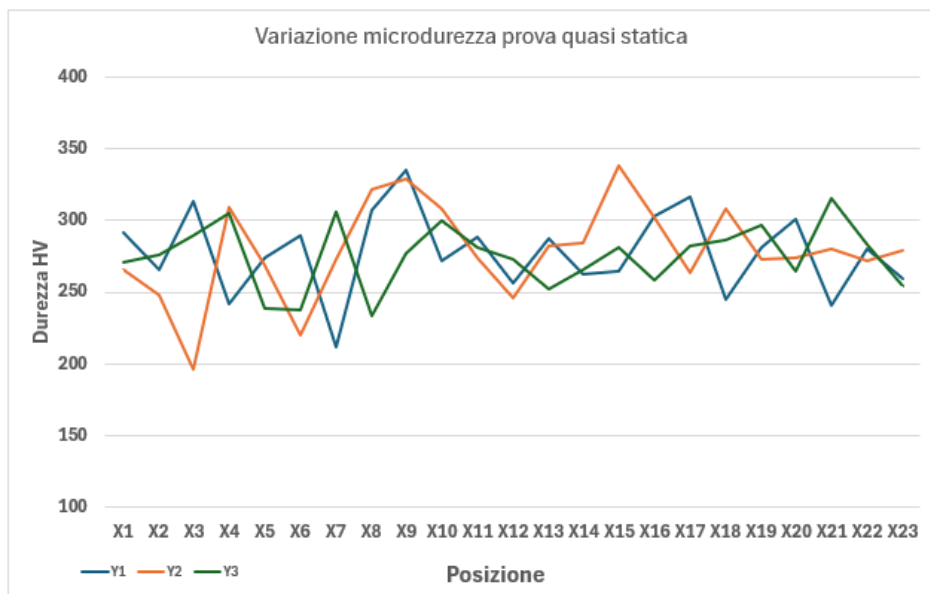


Figura 20b: Rappresentazione grafica durezza Vickers campione prova quasi statica

Provino sottoposto a prova dinamica - Faccia XY

	Y1	Y2	Y3	Media	Dev. Standard
X1	250	317	284	283	33,2328
X2	304	290	289	295	8,5569
X3	330	309	295	311	17,8528
X4	292	302	291	295	5,8583
X5	328	247	322	299	45,3122
X6	324	285	319	309	20,8982
X7	292	334	234	287	50,5162
X8	309	222	296	276	47,0963
X9	281	309	326	305	22,9637
X10	171	316	280	256	75,6332
X11	321	292	286	300	18,5768
X12	310	303	280	297	15,4053
X13	303	319	305	309	8,7130
X14	211	277	286	258	40,9661
X15	294	265	289	283	15,8500
X16	320	285	274	293	23,8783
X17	283	335	292	303	27,7934
X18	269	285	286	280	9,4885
X19	359	324	302	328	29,1074
X20	280	246	260	262	17,2250
X21	322	239	304	289	43,4825
X22	215	288	257	253	36,5814
X23	304	273	290	289	15,5600
Media	290	290	289	MEDIA	290
Dev. Standard	43	31	21		

Figura 21a: Foglio Excel durezza Vickers campione prova dinamica

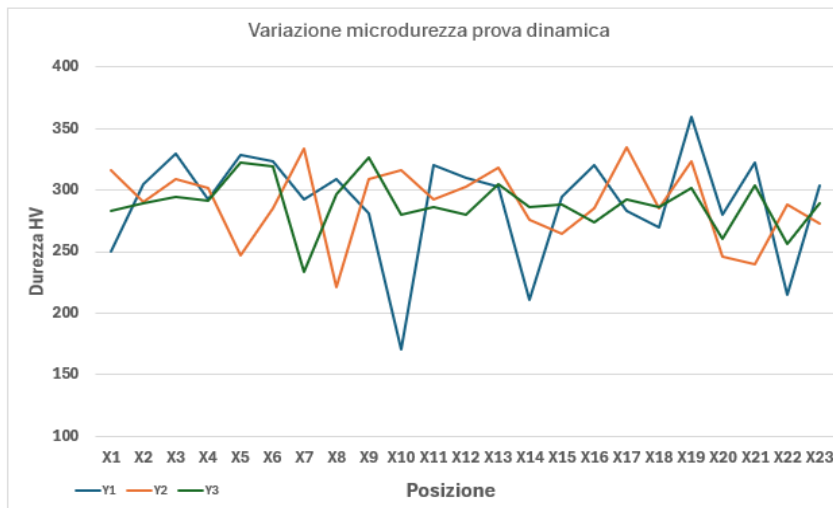


Figura 21b: Rappresentazione grafica durezza Vickers campione prova dinamica

I risultati di microdurezza ottenuti dalle prove Vickers di entrambi i provini non sono particolarmente discostanti tra loro se non per qualche piccola eccezione. Infatti, entrambi presentano valori di microdurezza elevati e le medie dei valori minimi e massimi relativi sono sostanzialmente equiparabili, con alcuni valori di durezza leggermente maggiori per il provino sottoposto a prova dinamica. Questo risultato poteva essere già dedotto già dall'analisi delle curve tensione deformazione ricavate dalle prove effettuate sui campioni, le quali risultano equiparabili.

La differenza più importante rilevata tra i diversi provini analizzati è sita nelle caratteristiche microstrutturali e geometriche (a livello macroscopico). Si nota infatti una sostanziale differenza tra i due provini che hanno subito due diverse prove di carico, una prova quasi statica (figure da 22 a 28) ed una di tipo dinamica (figure da 29 a 33). In particolare, il provino sottoposto a deformazione dinamica presenta un elevato numero di microcavità ed una geometria variata rispetto alle dimensioni iniziali. È infatti possibile vedere anche ad occhio nudo come i bordi dello stesso siano decisamente deformati andando a definire una forma irregolare, diversamente da quanto osservabile nel provino sottoposto a prova quasi statica. La maggiore velocità di deformazione ha giocato un ruolo fondamentale nel cambiamento di forma del provino preso in esame.

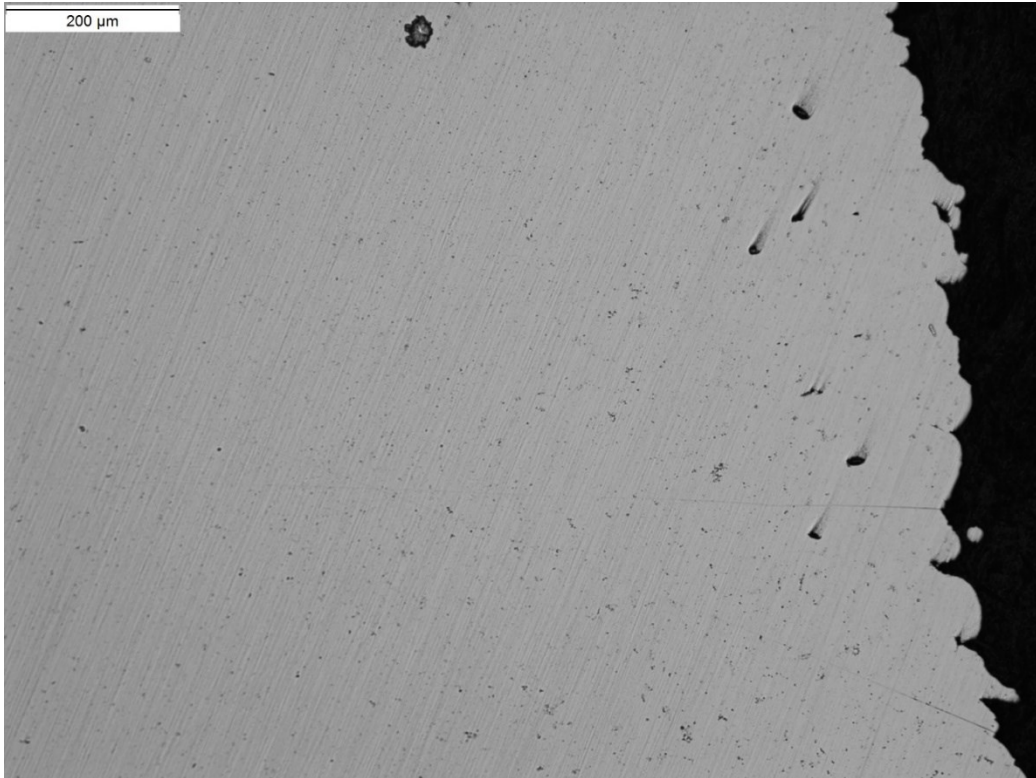


Figura 22: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 10x AISI 316L statica

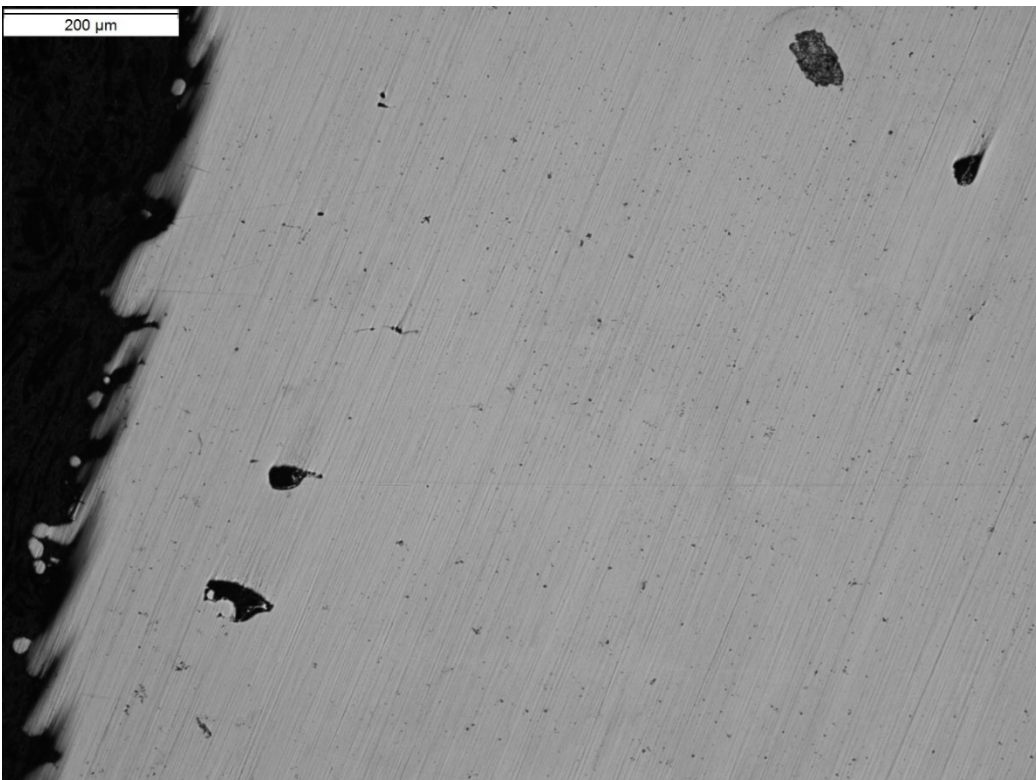


Figura 23: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 10x AISI 316L statica

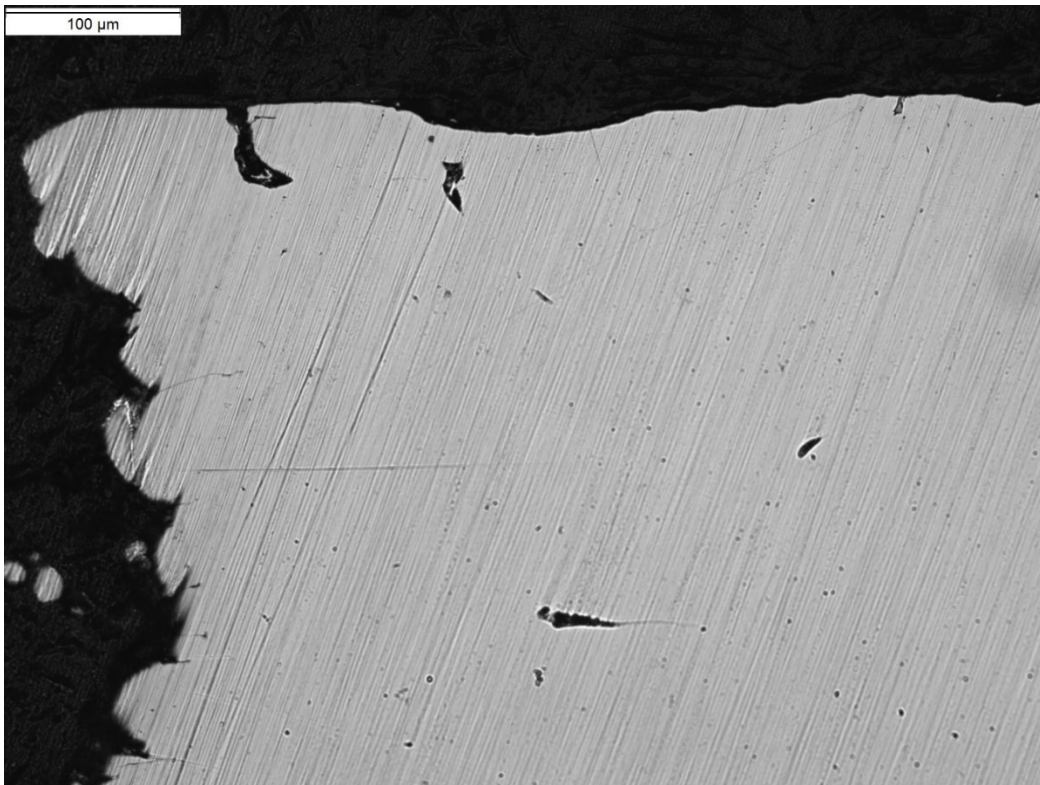


Figura 24: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 20x AISI 316L statica

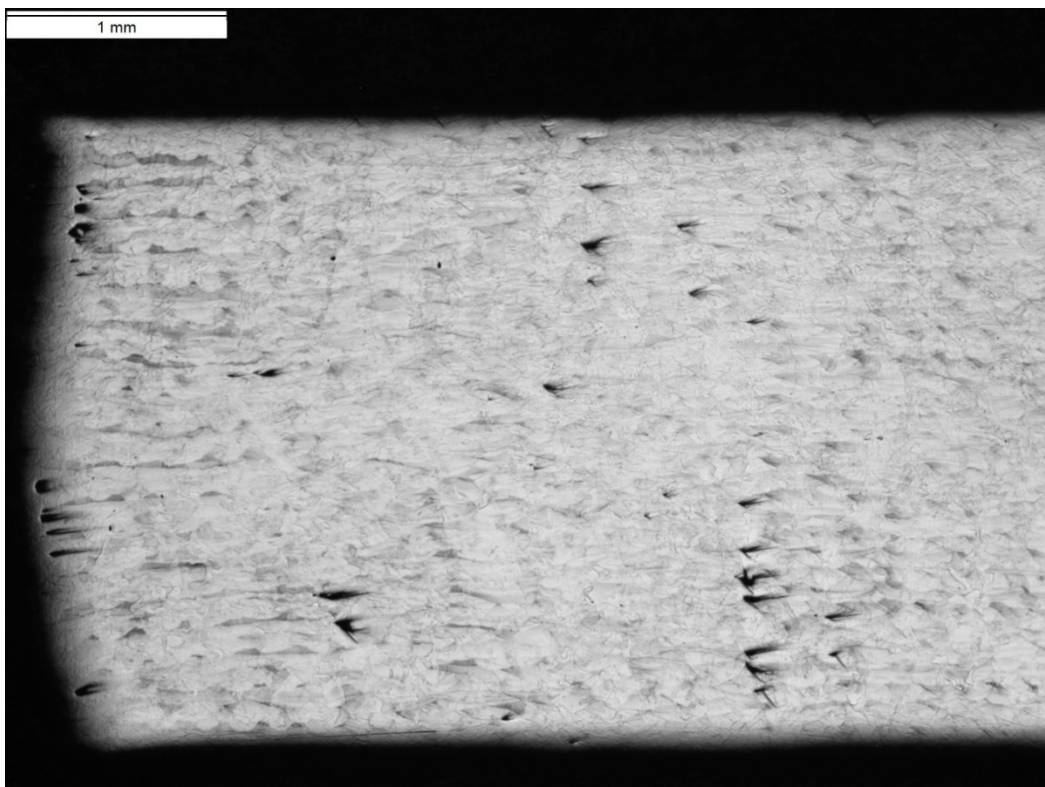


Figura 25: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 2,5x AISI 316L statica

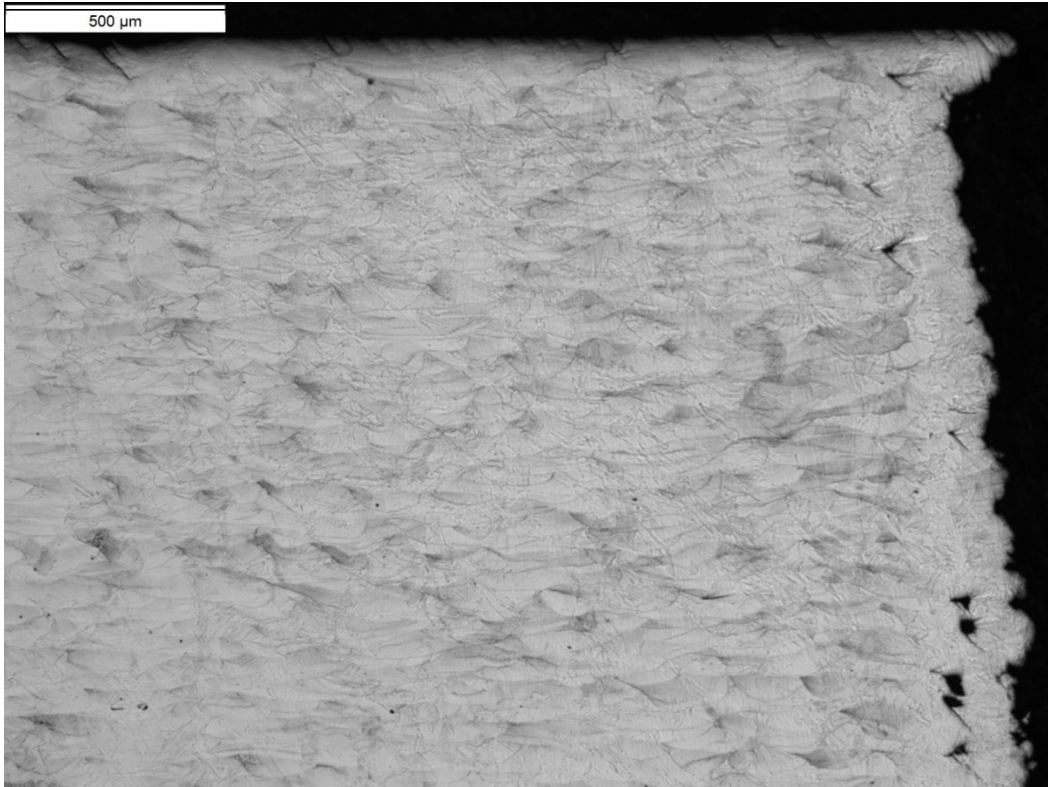


Figura 26: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 5x AISI 316L statica

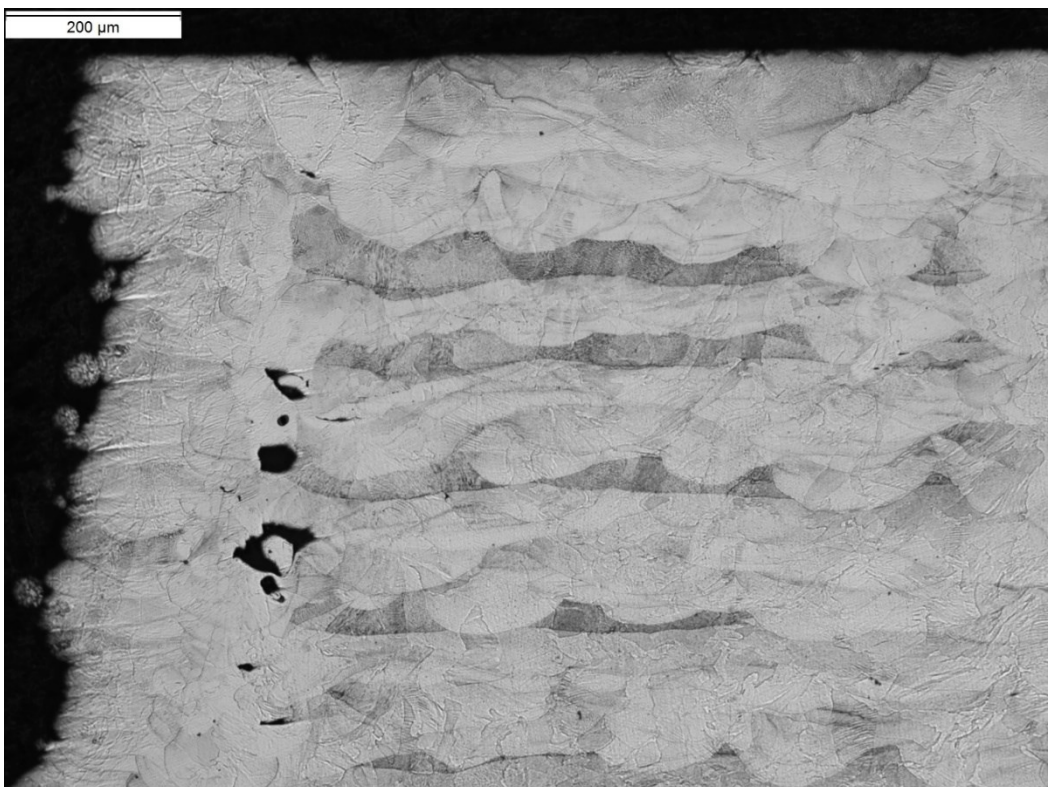


Figura 27: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 10x AISI 316L statica

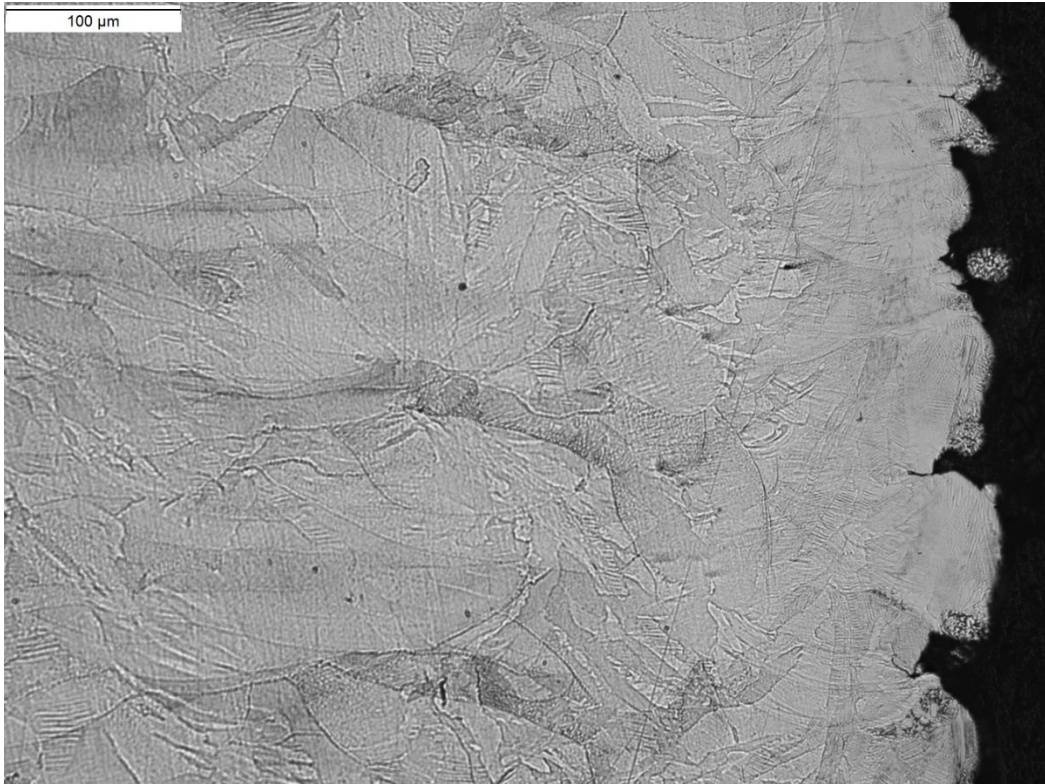


Figura 28: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 20x AISI 316L statica

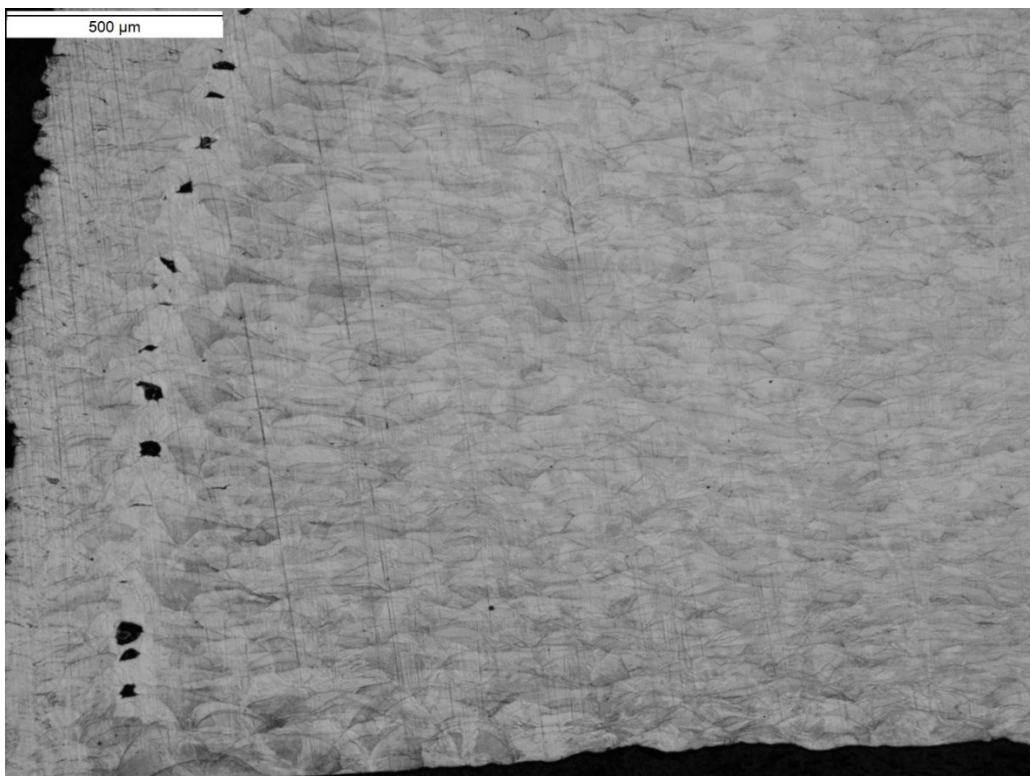


Figura 29: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 5x AISI 316L dinamica

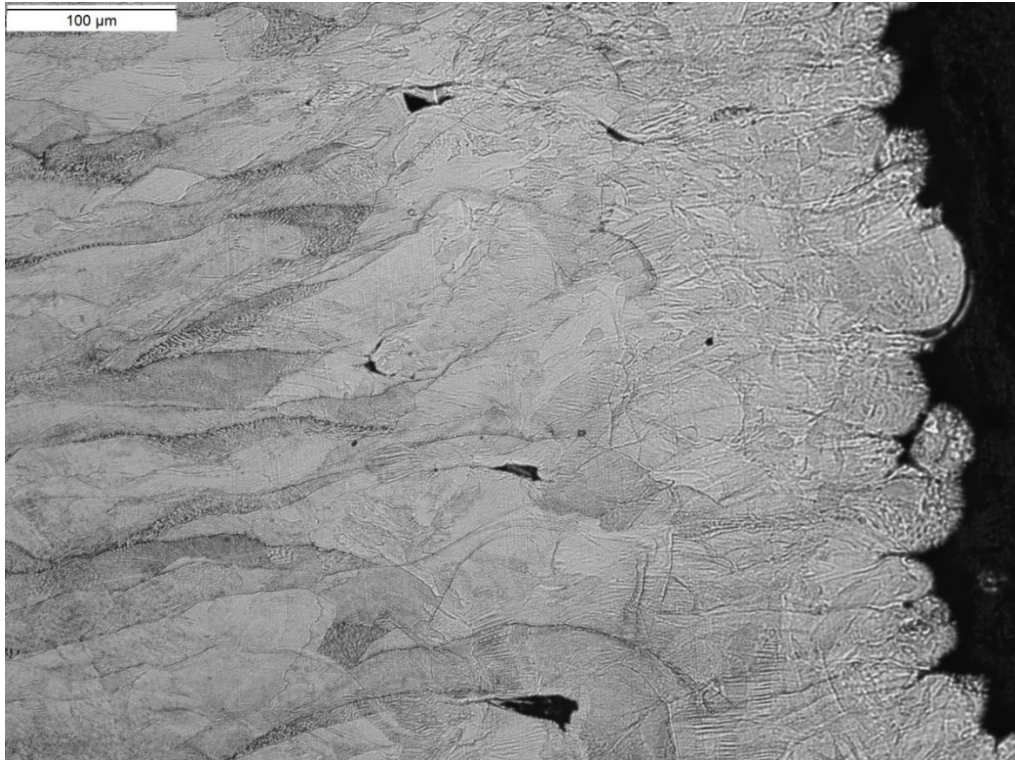


Figura 30: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 10x AISI 316L dinamica

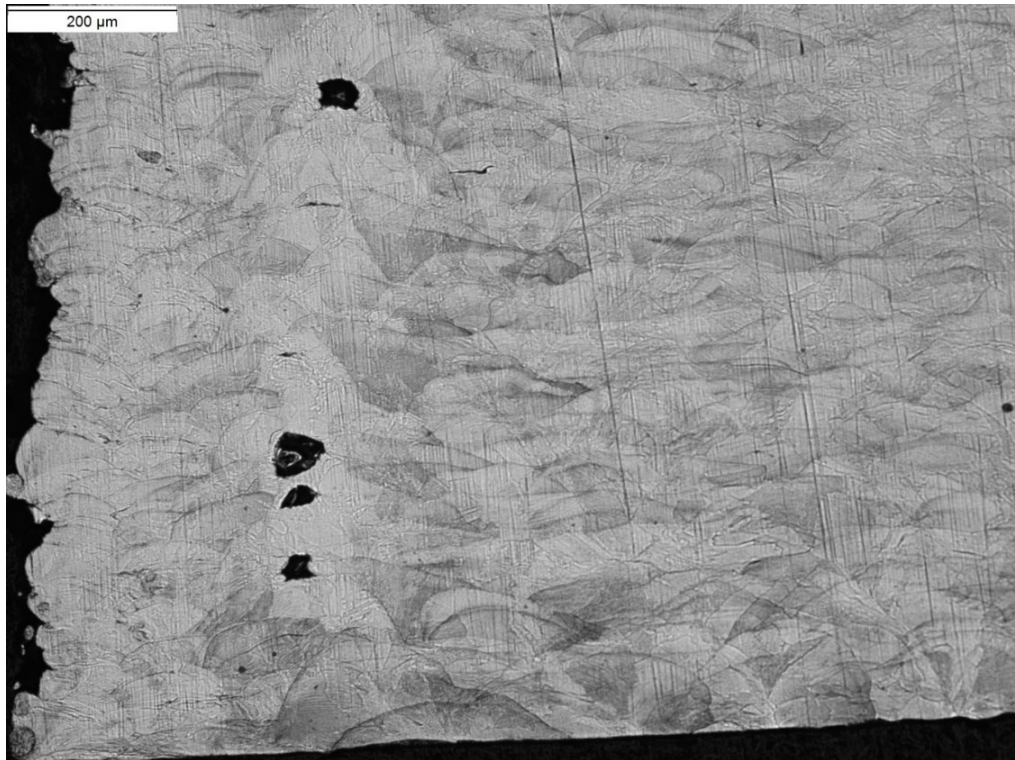


Figura 31: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 20x AISI 316L dinamica



Figura 32: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 20x AISI 316L dinamica

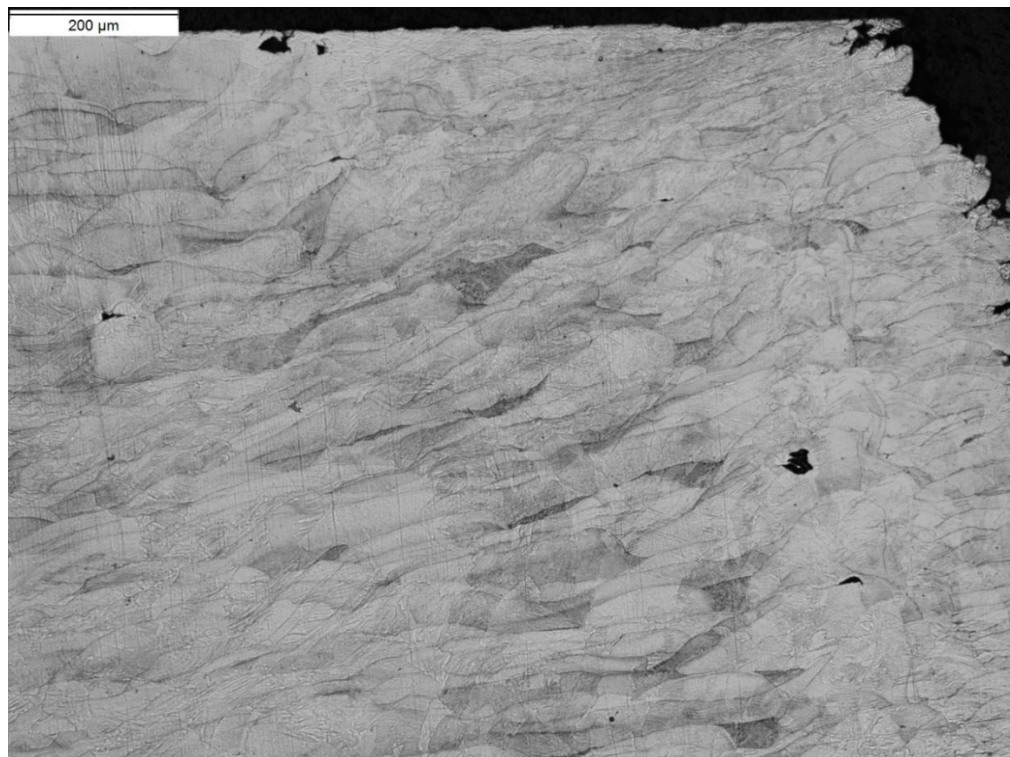


Figura 33: Microscopio ottico elettronico ingrandimento 20x AISI 316L dinamica

I risultati ottenuti forniscono importanti indicazioni sulla relazione tra la densità delle strutture fabbricate tramite Laser Powder Bed Fusion in acciaio inossidabile 316L e la loro resistenza agli impatti. Solitamente strutture ottenute tramite LPBF presentano problemi di porosità. Questi risultati suggeriscono che sia necessario ottimizzare i parametri di processo durante la fabbricazione tramite LPBF per ottenere strutture con una densità elevata e quindi migliori proprietà meccaniche. Ciò potrebbe includere l'ottimizzazione dei parametri quali energia del laser, velocità di scansione e miglioramento della distribuzione del materiale in polvere.

Conclusioni

Nell'ambito di questa tesi di laurea, abbiamo condotto un'analisi dettagliata sul comportamento delle strutture in acciaio inossidabile AISI 316L fabbricate tramite una tecnologia innovativa di additive manufacturing chiamata laser powder bed fusion (LPBF) ed è stata valutata la risposta a prove di impatto. Attraverso la nostra ricerca, abbiamo esaminato due diversi provini sottoposti a prove di compressione di tipo quasi statico e dinamico, allo scopo di valutarne le prestazioni e le caratteristiche di resistenza nell'impiego di strutture. In primo luogo, si è analizzato tutto il processo di manifattura additiva dalla polvere metallica sino alla realizzazione del prodotto finito, al fine di individuare le principali caratteristiche influenti sulla microstruttura dell'acciaio. Sono stati poi descritti i materiali per assorbimento urti, in particolare l'acciaio inossidabile AISI 316L, per poi passare alle prove di compressione di tipo quasi statica e dinamica che i provini hanno affrontato. Dopo aver approfondito le sperimentazioni effettuate in laboratorio, si sono svolte le prove di microdurezza Vickers così da testare le proprietà meccaniche dei provini presi in esame, in particolare abbiamo trovato in media dei valori di circa 300 HV che risultano dei valori di durezza molto elevati. Per un più approfondito studio dal punto di vista della composizione chimica si riporta ad ulteriori e più specifiche analisi

Abbiamo osservato come le strutture prodotte mediante LPBF abbiano dimostrato una notevole capacità di sopportare carichi di impatto, confermando la loro idoneità per applicazioni in cui la resistenza e l'assorbimento di urti è cruciale. Inoltre, il confronto tra i due provini ha fornito preziose informazioni sulla variazione delle proprietà geometriche in relazione alle diverse condizioni di carico applicate sui componenti.

Riferimenti bibliografici

- [1] K. S. Prakash, «Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing An Overview,» 2018.
- [2] Ahn, «Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art,» *Springer Link*, 2021.
- [3] C. Costantino, «Nuovo metodo di gas atomizzazione per ottenere polveri composite più performanti, caratterizzazione delle polveri e verifica di processabilità in macchina SLM,» 2022.
- [4] D. D'Andrea, «Additive Manufacturing of AISI 316L Stainless Steel: A Review,» 2023.
- [5] L. Ricca, «Caratterizzazione elettrochimica di campioni in acciaio inox austenitico AISI 316L prodotti mediante tecnica di manifattura additiva,» 2021.
- [6] M. Ziętała, «The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping,» 2016.
- [7] A. Tronelli, «Progetto di un sistema gas-gun per modifica della Barra di Hopkinson,» 2020.
- [8] A. Sulser, «Struttura per barre di Hopkinson,» 2019.
- [9] S. Alcini, «Bound Metal Deposition: caratterizzazione della tecnologia additiva dalla materia prima al prodotto finito,» 2021.