



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**CARATTERIZZAZIONE DI UN ACCIAIO PRODOTTO
CON TECNICHE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA**

**CHARACTERIZATION OF A STEEL PRODUCED BY
ADDITIVE MANUFACTURING TECHNIQUES**

Relatore

Prof. Stefano Spigarelli

Tesi di Laurea di

Youssef Ebrahim Emam Ebrahim

A.A. 2020 / 2021

Sommario

1. Lavorazioni additive	4
1.1 Considerazioni generali sulla fabbricazione additiva	4
2. COS'è L'ADDITIVE MANUFACTURING nei giorni d'oggi	7
2.1 Principali tecnologie di additive	9
2.2 La tecnologia DED	10
3. Prova sperimentale in laboratorio	13
3.1 Scopo della tesi	13
3.2 Acciaio 316L	14
3.3 composizione chimica dell'acciaio	14
3.4 Trattamento termico	16
3.4.1 trattamenti termici negli acciai	17
3.4.2 Trattamento termico di ricottura	17
3.4.3 Trattamento termico di omogenizzazione	18
3.4.4 Trattamento termico dei nostri provini	18
3.5 Inglobamento	19
3.5.1 I diversi tipi di resina	20
3.5.2 Resine a freddo della serie 600	20
3.5.3 Resine a caldo	20
3.6 Lucidatura dei provini	23
3.6.1 Lucidatura manuale	23
3.6.2 Lucidatura automatica	23
3.7 Attacco chimico	25

3.8 Microscopio metallografico	27
3.9 Prova della Microdurezza	28
3.9.1 I fattori che influenzano la durezza	29
3.9.2 Prova di microdurezza nella mia sperimentazione	31
3.9.3 Calcolo della durezza vickers	33
3.10 Analisi dei vuoti	36
4. Conclusione	39
5. Bibliografia	44

1. Lavorazioni additive

Nella storia della produzione, e in particolare delle lavorazioni meccaniche, i processi ad asportazione di truciolo sono stati quelli più utilizzati, e da qualche decennio essi vengono chiamati processi di lavorazione sottrattivi non tanto per tener conto della rimozione di materiale che si verifica nel processo ma per distinguerli dalle nuove tecniche di fabbricazione per strati che vengono chiamate lavorazioni additive per i modi di fabbricazione, che avvengono mediante successive aggiunte di strati di materiale.

Queste tecniche nascono negli USA nella seconda metà degli anni 80 del secolo scorso, in particolare quando nel 1986 Charles W.Hull depositò il brevetto per un "Apparatus for production of three-dimensional Objects by Stereolithography (apparato per la produzione tridimensionali mediante stereolitografia)" indicando con il termine STEREOLOGRAFIA: un metodo e le relative attrezzature per realizzare oggetti solidi attraverso la stampa di sottili strati, uno sopra l'altro di un materiale polimerizzabile, per esempio attraverso una radiazione UV. Una delle prime applicazioni di questi processi fu la prototipazione rapida (RP), intesa come una nuova tecnica per la fabbricazione di prototipi, che fino a questo momento trovavano nelle lavorazioni tradizionali l'unica tecnica di fabbricazione, capace di ridurre i costi di industrializzazione e i tempi di sviluppo (time to market) di un prodotto[1].

1.1 Considerazioni generali sulla fabbricazione additiva

L'originalità delle tecniche di fabbricazione additive che sono identificate con la sigla LM, che possono essere più chiare utilizzando la fig.1.1.

Nel ciclo di produzione tradizionale che utilizza una moderna macchina utensile a controllo numerico la matematica del particolare oggetto da produrre (CAD) viene trasferita a una elaborazione successiva (CAM) che servirà a generare il part program che trasferito alla macchina utensile, permetterà di effettuare sul pezzo grezzo le necessarie operazioni di trasformazione. Entrambi questi passaggi richiedono tempi necessari al loro espletamento piuttosto lunghi e in più personale particolarmente specializzato[1].

Anche nel caso della fabbricazione per strati, il file CAD deve subire un'elaborazione, tal operazione si chiama pre-processing Fig.1.1, ed e' piu semplice e veloce, quindi richiede meno tempo perche' non passa per il processo di CAM per generare il Part-Program per la macchina a CN. la macchina con la quale successivamente verra' generato il particolare e' silenziosa, pulita, in grado di operare in condizioni non sorvegliate e in generale non richiede un'ambiente particolare in cui operare, invece per la macchina utensile e' il contrario.

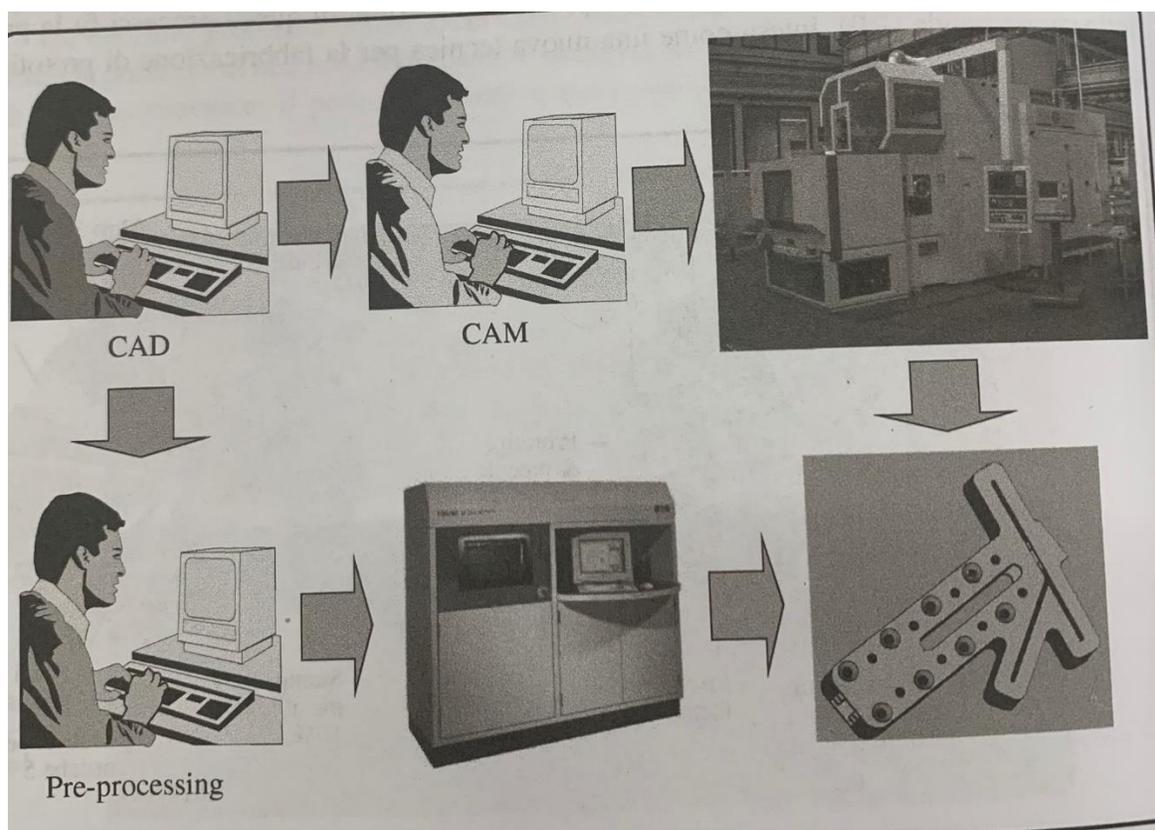


Fig.1.1 Confronto tra lavorazione di asportazione di truciolo e lavorazioni additive.

Altro elemento importante, ai fini della rapidità del processo di LM, è relativo al materiale grezzo che è in forma (per esempio polvere o liquido) e non come nel caso delle lavorazioni tradizionali, un grezzo la cui forma e dimensione è legata alla forma e dimensione del pezzo da produrre.

Mentre nella modalità tradizionale l'intero ciclo dell'acquisto del grezzo al pezzo finito per una certa complessità, richiederà da qualche giorno a qualche settimana, invece nella caso della tecnica di fabbricazione per strati richiederà da qualche ora a una decina di ore di funzione delle dimensioni del pezzo e non cambia tanto anche se il pezzo è molto complesso.

L'idea della fabbricazione per strati è basata sul taglio del particolare oggetto con una serie di piani paralleli ricavando altrettante sezioni. Le singole sezioni Fig.1.1a verranno poi fisicamente riprodotte dal processo di fabbricazione secondo il processo fisico con cui si opera.

Per semplificare e comprendere il concetto si può semplificare il ragionamento pensando di ritagliare le singole sezioni da un foglio di carta poi incollarle una sull'altra nel corretto ordine, e naturalmente per ottenere una buona riproduzione del particolare la distanza tra un piano e l'altro deve essere uguale allo spessore dello strato.[1]

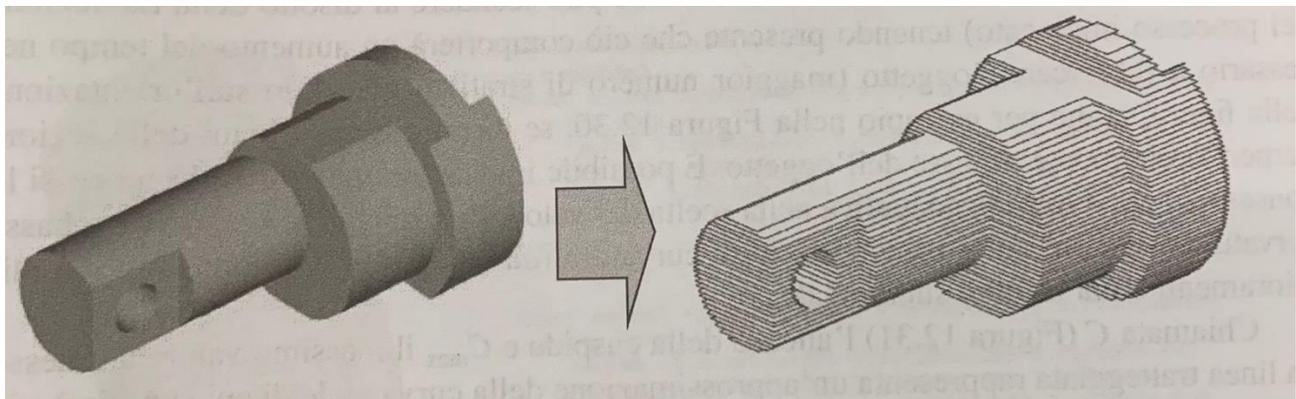


Fig. 1.1a fabbricazione per strati.

2. Cos'è l'additive manufacturing nei giorni d'oggi

È un termine usato per parlare dei concetti di:

- Rapid prototyping
- Rapid tooling
- Rapid manufacturing

Allo scopo di identificare le tre principali destinazioni di utilizzo di questa tecnologia. È una famiglia di tecnologie basate sul principio di funzionamento della **stratificazione progressiva di materiale** su livelli sovrapposti lungo l'asse Z come già detto nella sezione precedente, al fine di ottenere un oggetto tridimensionale.

Viene realizzata sovrapponendo singoli strati di materiale che vengono generati con metodi diversi in base alla tecnologia applicata[2].



Fig.2 passaggi di produzione usando una tecnica additiva.

➤ **Rapid prototyping**

È l'insieme di tecniche industriali che hanno lo scopo di realizzazione fisica del prototipo, in tempi brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto (CAD). Prima la costruzione era affidata ad artigiani o modellisti con aumento dei costi e dei tempi di realizzazione. Quindi questi processi vengono idealizzati con l'obiettivo di ridurre sia i costi di realizzazione che i tempi di costruzione del prototipo stesso.



Fig.2 Passaggi tecnica rapid prototyping.

➤ **Rapid tooling**

È una tecnica che consente, in tempi molto più rapidi, di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico.

➤ **Rapid manufacturing**

Si intende la produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente. Contrariamente a quello che avviene nel Rapid Prototyping, con il Rapid Manufacturing non viene realizzato alcun modello, ma sicuramente prodotti finali per l'utilizzo in condizioni reali[2].

2.1 Principali tecnologie di additive

Tecnologie additive suddivise in tre macro aree, basate sulle caratteristiche di consistenza della materia prima:

- **POLVERI:** tecniche basate sulla sinterizzazione o fusione delle polveri (attraverso laser o fascio di elettroni) o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo.
- **SOLIDI:** tecniche che prevedono l'incollaggio stratificato di fogli o l'estrusione di un materiale solido o semi solido.
- **LIQUIDI:** tecniche di fotopolimerizzazione tramite lampade UV o di stampaggio a getto.

La scelta di una specifica tecnologia si base ad una serie di parametri, quali:

- tipo di materiale
- resistenza meccanica del pezzo
- finitura superficiale desiderata del pezzo
- velocità di produzione
- investimento necessario
- costo finale

2.2 La tecnologia DED

Il processo di deposizione diretta costruisce la sua struttura basandosi sulla fusione di un materiale metallico che consiste in polvere o in filo metallico, usando una fonte di energia che e' il calore concentrato come per esempio il laser.

Tramite un ugello la fonte di calore viene concentrata in un punto preciso e si crea un bagno di fusione superficiale sul materiale di base, in fine si crea una traccia di materiale rapidamente solidificata.

Questo processo viene usato disolito per aggiungere materiale a pezzi e componenti gia' esistenti creando un rivestimento, questo fa vedere che la deposizione diretta ha un' elevata flessibilita' progettuale e questo per esempio non e' consentito dalla tecnologia a letto di polvere[3].

Gli elementi che costituiscono una lavorazione laser per processi di deposizione diretta sono :

➤ **Testa di deposizione:**

Questa testa integra un ugello che contiene la polvere o il filo montato su un sistema a piu' assi, in certi casi contiene anche dei sensori e un sistema ottico. Viene utilizzata per lasciare il materiale sul substrato grazie ai giunti che creano il movimento del robot a questo punto possiamo muoversi e posizionare in uno spazio tridimensionale[3].

➤ **Sistema di focalizzazione:**

E' una lente che permette di focalizzare su una parte precisa del nostro pezzo su cui si fa la lavorazione e questo e' un fattore molto importante per la precisazione del processo[3].

➤ **Sorgente laser in fibra attiva:**

E' il dispositivo che genera il fascio con le caratteristiche desiderate. Tenendo conto che i fattori che riguardano il fascio laser sono dipendenti dalla sorgente come la potenza del fascio, la lunghezza d'onda della radiazione e l'emissione continua o impulsata che possono influenzare la nostra lavorazione[3].

➤ **Adduttore:**

Utilizzando il gas inerte ci permette di trasportare i polveri di metallo all'interno della nostra macchina.

➤ **Spingifilo:**

Aiuta a posizionare l'ugello nella zona di lavoro precisa e desiderata, e questo viene realizzato rettificando il filo d'asporto depositato su una bobina che viene spinto in maniera costante verso l'ugello.

➤ **Unità di raffreddamento:**

Tramite quest'unità si può fare lo smaltimento del calore sviluppato dalla sorgente durante l'operazione, quest'unità viene chiamata anche chiller. L'operazione si effettua tramite l'uso dell'acqua fredda che si applica sulla fibra e sulle ottiche, che sono le zone soggette al surriscaldamento[3].

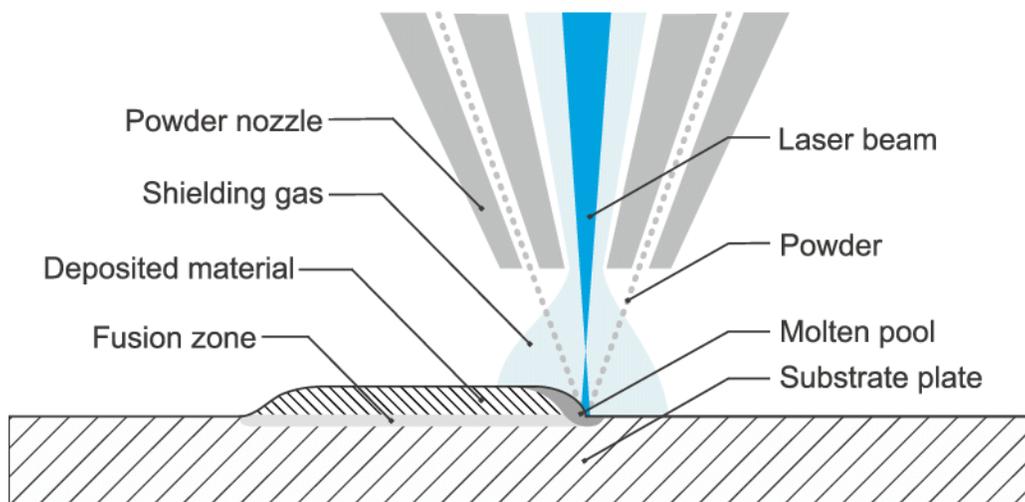


Fig.2.2 Il processo di deposizione diretta.

2.2 Vantaggi dell'additive

- Massima liberta' in fase di progettazione per esempio permette di realizzare forme complesse e difficile da realizzare con altre tecniche[2].
- Massima leggerezza del componente grazie alla possibilita' di mettere il materiale solo dove serve[2].
- Massima personalizzazione dell'oggetto
- Nessun costo per la realizzazione di stampi, utensili ed attrezzature di produzione.
- Riduzione dei costi e dei tempi dal disegno al prototipo.
- Riduzione dei set up per passare dalla lavorazione di un prodotto a quello successivo.
- Indipendenza dei costi produzione dalla quantita' da produrre, perche' questo per esempio e un fattore molto importante per quanto riguarda le macchine utensili[2]
- Abbattimento degli sfridi di produzione.

3. Prova sperimentale in laboratorio

La parte sperimentale della tesi e' stata eseguita in laboratorio di metallurgia dopo aver prodotto I provini di acciaio 316L realizzati tramite la tecnica di additive manufacturing Directed Energy Deposition (DED).

Quindi I passaggi della prova sperimentale sono :

- Produzione dei campioni con l'additive manufacturing
- Trattamento termico eseguito sui due campioni
- Tagliare il disco sulla fresa per avere i provini
- Inglobamento dei campioni
- Lucidatura e lappatura dei campioni
- Attacco chimico
- Valutazione della formazione dei grani e studio delle caratteristiche metallografiche sul microscopio ottico
- Prova della microdurezza
- Studio analisi dei vuoti

3.1 Scopo della tesi

Lo scopo della tesi e' quello di studiare le proprieta' e le caratteristiche metallografiche dei due provini di acciaio 316L prodotto dalle tecniche additive, vedendo se ci sono differenze nelle strutture e come sono formati I grani, perche' sono trattati termicamente in maniera diversa l'uno dall'altro che viene poi spiegato nella parte relativa al trattamento termico, in piu' la tesi studia la microdurezza e l'analisi dei vuoti dei nostri provini.

3.2 Acciaio 316L

Gli acciai inox(inossidabili), sono famosi della loro proprieta' di passivazione e anche della loro alta resistenza alla corrosione.

Nella nostra sperimentazione e' stato usato l'acciaio inox 316L che e' un tipo dalla famiglia di acciaio AISI 316 con la differenza dell'aggiungere L che rappresenta il basso tenore di carbonio(low carbon), infatti disciolto nelle leghe di acciaio inox 316 la quantita' di carbonio e' quasi uguale al 0,07 mentre nell'acciaio 316L e' solo il 0,03.

Invece il resto della composizione chimica delle due leghe 316 e 316L sono uguali rappresentati in FIG.3.2.

COMPOSIZIONE CHIMICA - VALORE MASSIMO								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	Mo	N
AISI 316	0,07	2,0	1,0	16,5-18,5	8-13	0,04	2-2,25	0,11
AISI 316L	0,03	2,0	1,0	16,5-18,5	8-13	0,04	2-2,25	0,11

FIG.3.2

3.3 Composizione chimica dell'acciaio 316L e 316.

In generale nella produzione di componenti che richiedono raccordi, per esempio in certi casi con i tubi in cui si passano liquidi e sono soggetti alla corrosione, vengono usati gli acciai inox di 316, cosi evitiamo la corrosione in questi parti[4].

Nelle figure 4a e 4b si possono vedere i due provini di acciaio 316L prodotti in laboratorio su cui si eseguono le prove.



Fig.4a.Provino n1 di acciaio 316L prodotto tramite la tecnica di additive manufacturing.

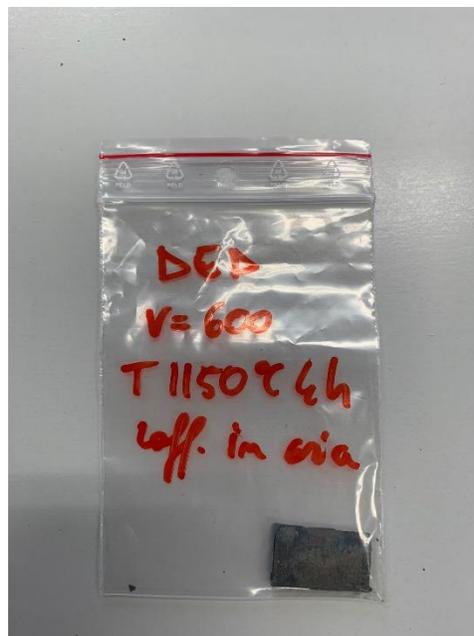


Fig.4a.Provino n2 di acciaio 316L prodotto tramite la tecnica di additive manufacturing.

3.4 Trattamento termico

E' un processo termico realizzato in certi condizioni e sotto certi gradi di temperatura, dopo questo trattamento si fanno i raffreddamenti che sono varie in funzione all'uso del nostro metallo, perche' eseguendo il raffreddamento con un certo modo possiamo variare totalmente la nostra struttura cristallina e quindi anche le proprieta' del nostro provino[5].

Per capire bene l'effetto dei trattamenti termici sulla struttura della lega metallica, e' necessario conoscere il diagramma di stato della lega stessa. Pero non e' sufficiente solo il diagramma di stato perche' un fattore molto importante che puo' variare i risultati della struttura e' la velocita' del tempo di raffreddamento[5].

Questa velocita di raffreddamento influenza la natura stessa della struttura con possibilita di dare anche costituenti meta stabili come i martensiti negli acciai assenti nel digramma di stato[5].

3.4.1 Trattamenti termici negli acciai

I trattamenti termici sono suddivisi in 2 categorie :

a. Trattamenti termici con transizione di fase come per esempio:

- Ricottura
- Normalizzazione
- Tempra
- Martempering
- Tempra bainitica
- Austempering

b. Trattamenti termici senza transizione di fase e in questo caso si opera al di sotto della temperatura eutettoidica, per esempio:

- I. Ricottura di addolcimento
- II. Rinvenimento
- III. Distensione

La differenza fra i trattamenti termici con e senza transizione di fase dipende dalla temperatura eutettoidica, se si opera sotto la temperatura eutettoidica siamo nel caso dei trattamenti senza transizione di fase, e il contrario con la transizione di fase si opera al di sopra della temperatura eutettoidica.

3.4.2 Trattamento termico di ricottura

Per poter spiegare l'omogenizzazione che è un tipo di trattamento di ricottura prima introduciamo il processo di ricottura completa, detta anche ricottura che viene eseguita sugli acciai dotati di punti di trasformazione e consiste in :

- Riscaldamento fino a $AC3+25-50^\circ$ oppure $AC1 + 50-70^\circ$;
- Mantenimento nella stessa posizione per circa 1 ora ogni 30-50mm di spessore;
- Raffreddamento lento in forno ($5-50^\circ C/h$) fino alla formazione stabile di ferrite, perlite o carburi per acciai al carbonio o debolmente legati vuol dire fino a $600^\circ C$, per acciai molto legati anche $300^\circ C$; in seguito si può raffreddare il pezzo più rapidamente in aria.

I punti negativi in questo tipo di trattamento termico sono:

- la durata di tempo molto lunga
- la formazione della struttura che è grossolana
- la formazione della struttura non ben definita

3.4.3 Trattamento termico di omogenizzazione

Nel caso del trattamento termico di omogenizzazione l'operazione consiste nel mantenere il nostro metallo parecchie ore a temperatura $T = AC3 + 100 - 200^{\circ}C$, questo mantenimento causa perdite di ossidazione elevate e ingrossamento della grana cristallina a causa del surriscaldamento, questo problema dopo viene risolto usando il trattamento termico di normalizzazione[5].

Il processo di omogenizzazione e' costoso e in generale non si effettua a meno che ce la necessita di effettuarlo, e si usa con gli acciai ad alta qualita che hanno anche un costo elevato[5].

Il risultato del processo di omogenizzazione e' quasi uguale al processo di ricottura generale, pero' e' piu' vantaggioso quando abbiamo bisogno di sciogliere fasi fragili presenti nel nostro pezzo, per esempio nel caso dei carburi eutectici grossolani che dopo aver subito le lavorazioni a caldo, vengono infragiliti dopo le lavorazioni a caldo[5].

3.4.4 Trattamento termico dei provini

Nel mio caso I due campioni su cui si fa la sperimentazione sono stati sottoposti ad un trattamento termico di omogenizzazione a $1150^{\circ}C$, uno per 2 ore e l'altro per 4 ore , che dopo nella parte di paragone fra I risultati dei due campioni si vedono le differenze delle caratteristiche metallografiche se ci sono.

3.5 Inglobamento

Il processo di inglobamento di un campione metallografico aiuta ad usare il provino in diversi processi come per esempio il processo di lucidatura e altri processi.

Per esempio si usa sia con la lucidatura manuale che quella automatica, per esempio nel caso della lucidatura automatica aiuta a collegare tutti i nostri campioni in una porta campioni.

Nel caso della mia sperimentazione abbiamo usato la macchina di inglobamento(fig.4.4) con inglobatura a caldo con tempo totale dell'operazione di 12minuti di cui 7 per l'inglobamento e 5minuti per il raffreddamento.

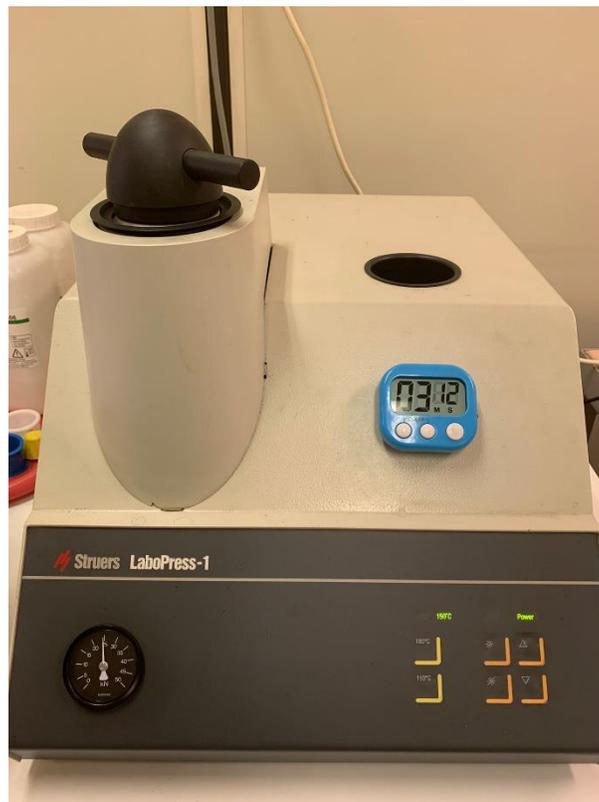


Fig.4.4

3.5.1 I diversi tipi di resina

Ci sono diversi tipi di resine basandosi sul tipo di inglobamento se viene eseguito a freddo o a caldo.

Le resine variano in base al processo se viene eseguito a freddo o a caldo.

3.5.2 Resine a freddo della serie 600

➤ **Resina 601.2**

Resina trasparente monocomponente molto fluida, scarso coefficiente di ritiro[6].

➤ **Resina 605**

Resina metilmetacrilica, polimerizza molto rapidamente, resiste ai principali tipi di attacco chimico[6].

➤ **Resina 607-2**

Resina in poliestere modificato, coefficiente di ritiro inferiore allo 0,2%, ideale per i materiali molto duri[6].

3.5.3 Le resine a caldo

➤ **Resina 602**

Un resina fenolica di colore verde con cariche organiche e minerali, utilizzate per inglobare materiali di ogni tipo per i normali controlli.

➤ **Resina 606**

Una resina acrilica trasparente, utilizzata in primo luogo quando si desidera visualizzare l'evoluzione della pre-lucidatura di un campione. Adatta a materiali di ogni genere[6].

➤ **Resina 603**

Una resina epossidica di colore nero con elevate cariche organiche. La durezza molto elevata e l'assenza di coefficiente di ritiro ne fanno una resina ideale per le inglobature destinate all'esame dei bordi.

Questo tipo di resina e' quello usato nella mia sperimentazione con una resina fenolica indicata in fig.4a.

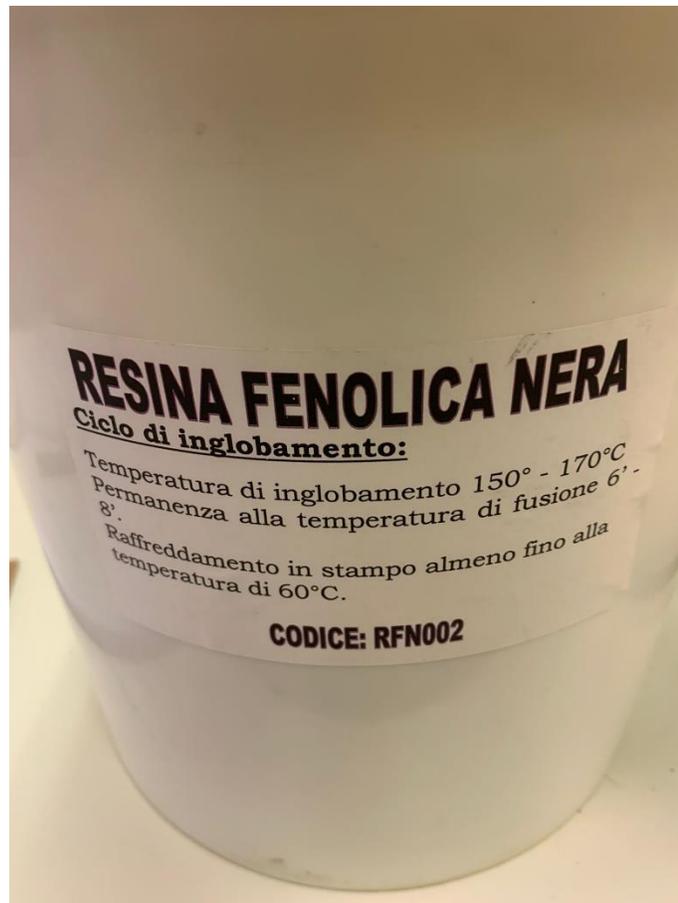


Fig.4a

In fig.4b si vedono i provini della sperimentazione dopo l'inglobatura.



Fig.4b provino 316L TT2H asse xy yz

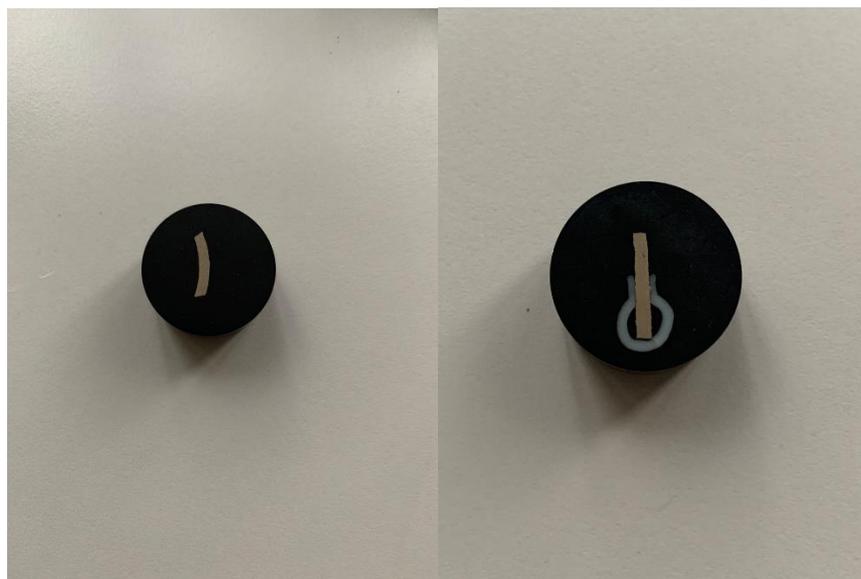


Fig.4b provino 316L TT4H asse xy yz.

3.6 Lucidatura dei provini

Il processo di lucidatura e' quello che rende la superficie lucida di un oggetto, in modo tale che il corpo in questione brilli di luce riflessa con una finitura superficiale molto alta.

Il processo di lucidatura puo essere effettuato in 2 modi diversi :

3.6.1 Lucidatura manuale

Questo tipo di lucidatura viene effettuato manualmente applicando il nostro provino rivestito dalla resina sulla carta abrasiva costituita da granuli che variano in dimensione per esempio le carte abrasive usate nella nostra sperimentazione sono : P180,P320,P600,P1200,P2500,P4000.

I nostri provini sono stati lucidati su queste carte abrasive iniziando con la P180 che ha dei granuli grossi che servono per eseguire la spianatura meccanica andando alla P4000 che ha I granuli piu' fini, concludendo dopo con il processo di lappatura che viene considerata l'ultima fase della finitura superficiale, in questo processo Si utilizzano dischi di tessuto, con una sospensione di polveri abrasive o paste o spray contenenti granuli di diamante.

Nelle fig.4.5.1 possiamo vedere la macchina della lucidatura usata nella nostra sperimentazione e la lappatrice manuale.

3.6.2 Lucidatura automatica

Questo tipo di lucidatura viene effettuato automaticamente montando I nostri provini su dei basi forati come si vede in fig.4.5.2.

Il vantaggio della lucidatura automatica e' che ci risparmia molto tempo in paragone a quella manuale ed e' piu' precisa.

Nel caso della nostra sperimentazione e' stata usata prima la lucidatura manuale per togliere tutti i graffi dai nostri provini controllando ogni tanto sul microscopio ottico se ci sono ancora I graffi per poter fare l'attacco chimico.

Dopo i tentativi di lucidare I nostri provini sulla lucidatura manuale si vedevano ancora I graffi, per quello ci siamo passati alla lucidatura automatica ottenendo dopo I provini piu lucidati e precisi per eseguire l'attacco chimico cosi vediamo la formazione dei grani.



Fig. 4.5.1 macchina di lucidatura manuale.



Fig 4.5.1 macchina di lappatura.



Fig. 4.5.2 macchina di lucidatura automatica.

3.7 Attacco chimico

L'attacco chimico si effettua su una superficie metallica, ci aiuta ad evidenziare la struttura cristallina per effetto della corrosione selettiva attivata dai reattivi chimici usati sulle zone superficiali.

Viene effettuato applicando la nostra composizione chimica sul provino come si vede in fig.4.6, e dopo andare a vedere le strutture metallografiche sul microscopio come per esempio in caso di una lega di Ferrite 500X e Ferrite e perlite, 0,16%C 500X fig.4.6a e b.



Fig. 4.6 applicazione della composizione chimica nel caso della nostra sperimentazione.



Fig.4.6a Struttura metallografica della Ferrite 500X.
0,16%C 500X.



Fig.4.6a Ferrite e perlite,

La composizione dei reattivi chimici è formulata in base alla natura della lega metallica o delle fasi da mettere in risalto, nel nostro caso la composizione chimica era :

15 ML HCL + 10 ML HN03 + 1 ML ACET

Che sono 15 millilitri di acido cloridrico + 10 millilitri di acido nitrico + 1 millilitro di acido acetico

Nelle figure 4.6c,d,e,f si possono vedere le superfici dei provini della nostra sperimentazione messi a fuoco sotto il microscopio ottico prima e dopo l'attacco chimico.

3.8 Microscopio metallografico

Tutti i microscopi hanno come componenti fondamentali un obiettivo ed un oculare, la distanza fra oculare e obiettivo che viene osservato e' invariabile in qualsiasi tipo di microscopio, la messa a fuoco dell'obiettivo da osservare e studiare avviene attraverso spostamento del sistema ottico utilizzato[7].

Il provino si appoggia su una lastrina di vetro ed illuminato dal basso tramite un sistema di lenti con la funzione di inviare all'obiettivo la quantità di luce adatta alle sue caratteristiche ottiche

Il microscopio ottico è utilizzato per l'osservazione micrografica della struttura dei metalli e delle leghe.

L'osservazione micrografica viene effettuata illuminando i provini per riflessione.

In fig.4.7 si puo' vedere il microscopio usato nella nostra sperimentazione.

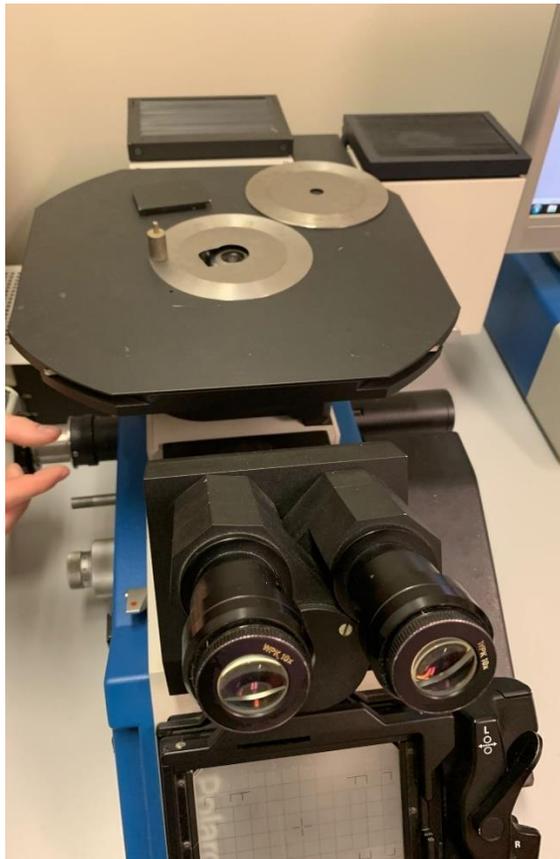


Fig. 4.7 microscopio ottico usato nella nostra sperimentazione

3.4 Prova della microdurezza

la prova della microdurezza e' un processo principale per studiare e sviluppare i diversi materiali nel settore della ricerca come nella nostra sperimentazione che e' una ricerca su questo tipo di acciaio 316L prodotto dall'additive manufacturing[8].



Fig.3.9

Eseguendo questa prova possiamo determinare tutti i valori di durezza che sono molto importanti per la differenziazione dei materiali come scambi di materiali e per chiarire eventi dannosi in caso di analisi dei danni.

La prova di durezza e' un processo veloce da applicare e non e' distruttivo perche' le superfici dei nostri provini rimangono quasi gli stessi come nella nostra sperimentazione, le nostre impronte hanno una lunghezza quasi invisibile.

Con questo metodo di prova, da una parte è possibile definire rapporti qualitativi con altre proprietà dei materiali (ad es. resistenza, durezza, densità) o il comportamento dei materiali in presenza di determinate sollecitazioni (ad es. resistenza all'usura)[8].

➤ Come si definisce la durezza ?

La durezza è la resistenza meccanica del nostro provino alla penetrazione meccanica di un altro corpo più duro che sarebbe un penetratore ad una certa forma.

Il materiale più duro in natura è il diamante ed è quello utilizzato come penetratore.

La definizione di durezza si differenzia dalla definizione di resistenza, che rappresenta la resistenza di un materiale a deformazione e separazione[8].

3.9.1 I fattori che influenzano la durezza

La durezza non può essere definita come una proprietà fondamentale del materiale, però esiste un intervallo di durezza all'interno si muovono i diversi materiali.

La durezza dello stesso materiale può variare o potrebbe essere modificata dal calore, per esempio un provino sottoposto ad un certo trattamento termico, assume un valore di durezza diverso da quello di prima, che di solito tende ad essere più alto[8].

Non si può dire che il valore di durezza è fisso. Infatti il valore di durezza misurato da una prova dipende da :

- il metodo di prova selezionato
- la forza di prova applicata al penetratore
- il tempo di permanenza del penetratore nel materiale
- la geometria del penetratore
- la geometria del pezzo

In fig.5.2 possiamo vedere la differenza tra i vari tipi di prove che hanno forme diverse l'una dall'altra.

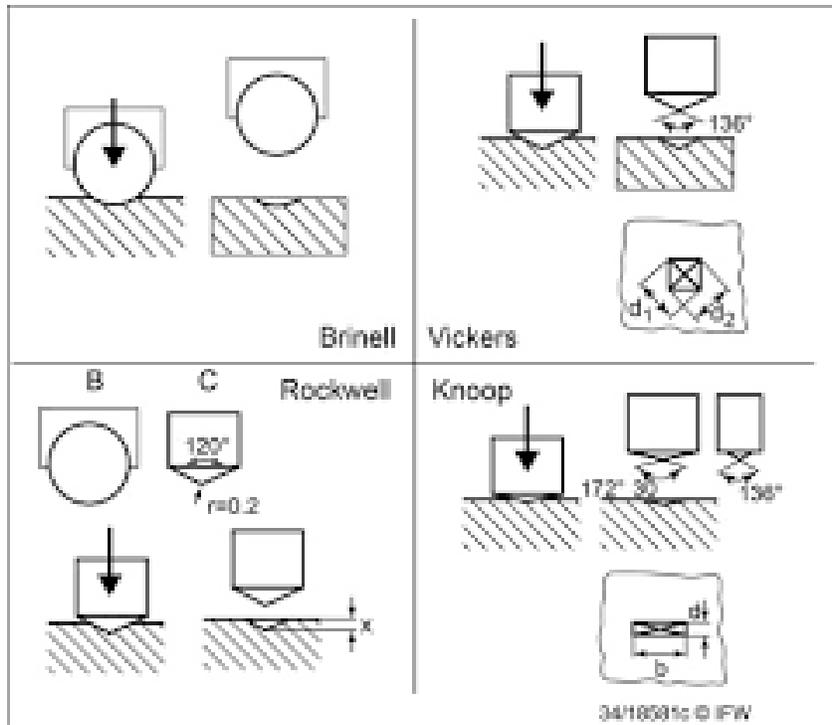
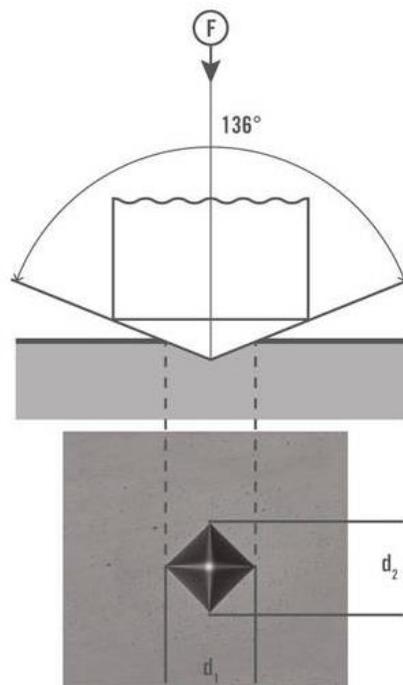


Fig. 5.2



3.9.2 prova di durezza Vickers nella nostra sperimentazione

Nella prova di durezza Vickers, un metodo ottico, si misura la dimensione dell'impronta lasciata dal penetratore ovvero le diagonali dell'impronta. Nei metodi di misura della profondità di penetrazione, si misura invece la profondità di penetrazione causata dal penetratore[8].

Maggiore è l'impronta lasciata dal penetratore sulla superficie del nostro provino a una forza di prova definita, più il materiale testato è morbido.

Nel caso della mia sperimentazione la forza applicata dal penetratore e' di 500gf e il tempo di permanenza del penetratore sulla superficie del provino e' di 10 secondi, in fig.5.3.1 si puo vedere la foto del nostro Microduremetro impostato per eseguire la prova della microdurezza.



Fig.5.3.1 Microduremetro remet hx1000

Nella nostra sperimentazione sono state fatte le impronte lugo i nostri provini, eseguendo circa 20 serie su tutti i 4 provini, con una serie costituita da 3 impronte 2 vicino al bordo e una in mezzo come si vede in figura 5.3.2a,b,c.

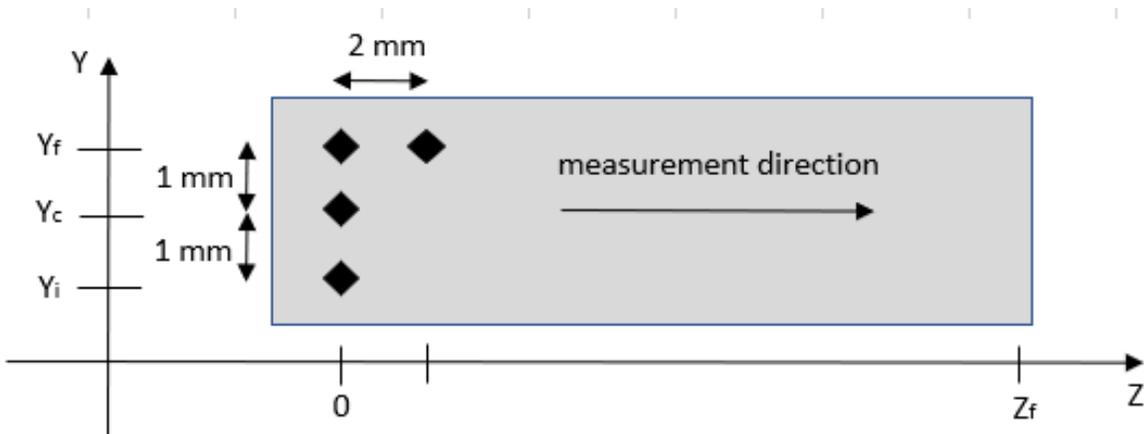


Fig 5.3.2a.



Fig 5.3.2b.



Fig 5.3.2c.

Nel metodo Vickers le impronte devono essere ottenute in modo che vi sia una distanza sufficiente dal margine del provino (bordo) e tra le singole impronte.

3.9.3 Calcolo della durezza Vickers

il risultato della durezza vickers si ottiene calcolando il quoziente fra la forza si prova e la la superficie dell'impronta applicata sul nostro provino, questa superficie dell'impronta si calcola prendendo il valore medio delle due diagonali calcolati in millimetri perche la forma dell'impronta non ha una specifica forma a causa dei vuoti nel materiale, questo si vede nelle foto delle diverse impronte prese nella nostra sperimentazione Fig.5.3.1.0[8].

Nel caso della nostra sperimentazione e' stato usato il programa leica per rilevare le dimensioni della diagonale di ogni impronta, e in fig.5.3.1.1 si possono vedere le linea blu che rappresentano la lunghezza della diagonale che dopo facendo la media, si ottiene il nostro valore che viene messo in tabella su excel nella parte diagonale, cosi ricaviamo la HV MPA e GPA, questa tabella si vede in fig.5.3.1.2.

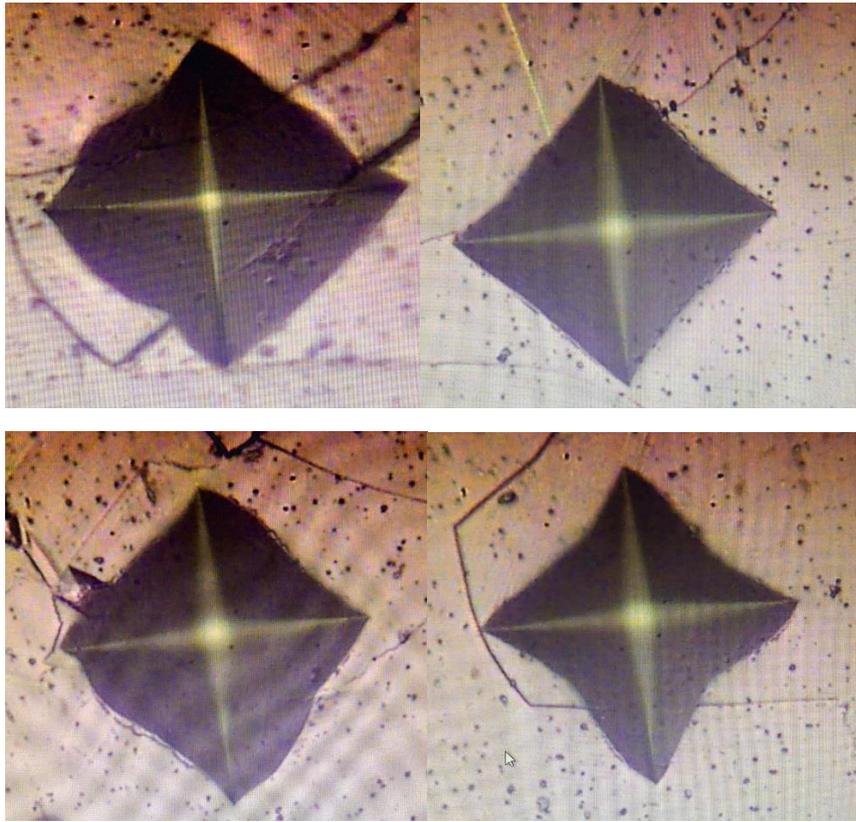


Fig.5.3.1.0.

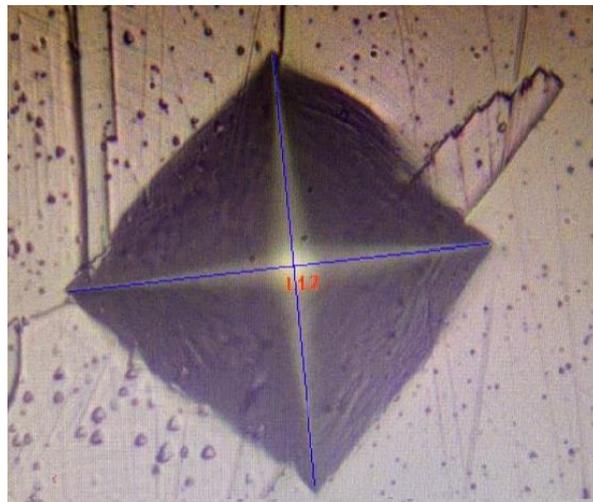


fig.5.3.1.1

CALCOLO MICRODUREZZA

Carico applicato	500	gf	
Diagonale	HV	MPa	GPa
316.2374	148	1454	1.45
320.1575	145	1419	1.42
319	146	1429	1.43
319.973	145	1421	1.42
303.2023	161	1582	1.58
323.0212	142	1394	1.39
312.4152	152	1490	1.49
309.0713	155	1523	1.52
309.371	155	1520	1.52
322.2506	143	1401	1.40
306.5045	158	1548	1.55
307.07	157	1543	1.54
317.6711	147	1441	1.44
308.5024	156	1528	1.53
308.5024	156	1528	1.53
326.5919	139	1364	1.36
308.5136	156	1528	1.53
314.2454	150	1473	1.47

TABELLA DI CONVERSIONE

Media HV	155.6		
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 10 chilogrammi)
-	800	72	-
1220	780	71	-
1170	760	70	-
1114	745	68	-
1060	725	67	-
1021	712	66	-
940	682	65	-
905	668	64	-
867	652	63	-
803	626	62	-
775	614	61	-
746	601	60	-
727	590	59	-
694	576	57	-
649	552	56	-
639	545	55	-
606	529	54	-
587	514	53	1:

Fig.5.3.1.2. in questa tabella so vedono tutti i valori medie della diagonale che uasando la tabella di conversione possiamo ricavare i diversi valori di HV MPA GPA, in questo caso e' del provino 316L DED v600 TT2h asse yz.

3.10 Analisi dei vuoti

Usando il microscopio ottico siamo riusciti ad avere degli immagini della nostre struttura cristallina dei 4 provini con gli assi xy yz per ogni provino. Per ogni asse abbiamo 6 immagini della struttura cristallina in cui possiamo vedere i vuoti sul nostro provino, questi vuoti vanno rilevati con il programma imagej che ci conta esattamente tutti i vuoti che stanno sulla nostra superficie, in figura 3.10a,b possiamo vedere il paragone fra l'immagine della superficie dal microscopio ottico e l'immagine dopo utilizzando imagej.

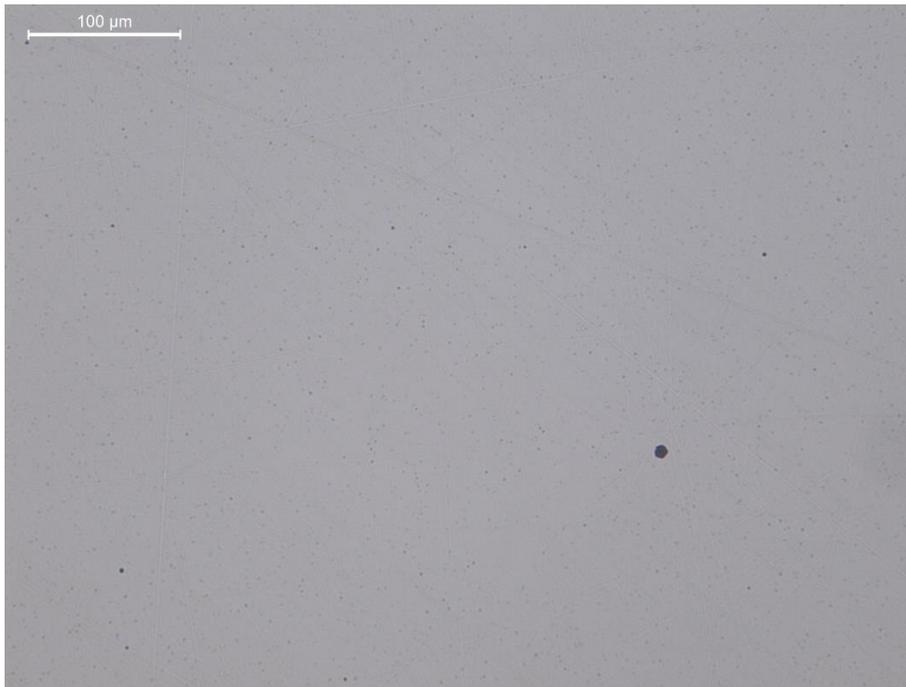


Fig.3.10 immagine dei vuoti prima di essere analizzata da imagej per vedere chiaramente i vuoti.

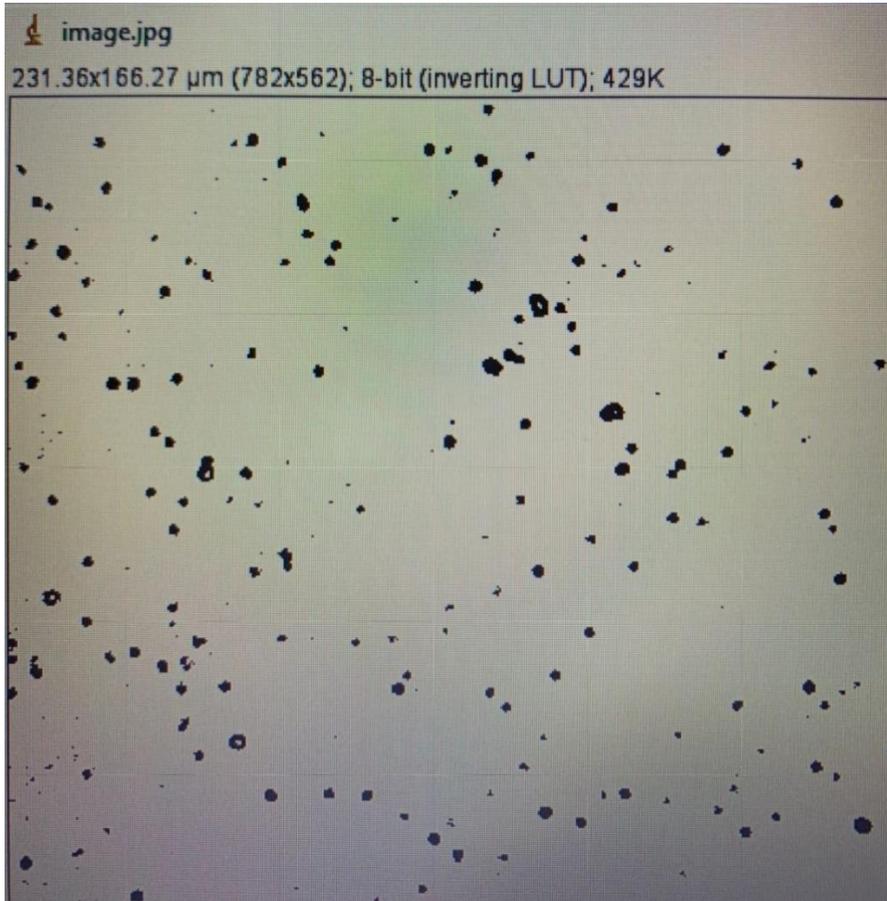


Fig.3.10 immagine dei vuoti dopo di essere analizzata da imagej per vedere chiaramente i vuoti.

Per ogni immagine della nostra struttura cristallina viene calcolata la percentuale dei vuoti che si ottiene dividendo l'area totale dei vuoti che è data dalla somma delle aree di ogni singolo vuoto, sulla area dell'immagine in micro. Come per esempio in figura 3.10c si vede la percentuale totale dei vuoti del nostro provino 316L trattato termicamente a 2 ore piano xy.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	ANALISI DEI VUOTI 316L DED V600 TT2H XY												% MEDIA DEI VUOTI 0.235479167						
2	IMMAGINE N°1 20X1		IMMAGINE N°2 20X1		IMMAGINE N°3 20X1		IMMAGINE N°4 20X1		IMMAGINE N°5 20X1		IMMAGINE N°6 20X1								
3	N° VUOTO	AREA(µm²)	N° VUOTO	AREA(µm²)	N° VUOTO	AREA(µm²)	N° VUOTO	AREA(µm²)	N° VUOTO	AREA(µm²)	N° VUOTO	AREA(µm²)							
4	1	0.788	1	0.266	1	0.946	1	1.392	1	0.792	1	0.87							
5	2	1.138	2	0.797	2	0.86	2	0.696	2	0.792	2	2.088							
6	3	0.438	3	0.177	3	2.408	3	0.087	3	0.088	3	0.174							
7	4	1.926	4	0.089	4	0.946	4	0.087	4	0.088	4	0.087							
8	5	1.313	5	0.089	5	0.774	5	0.087	5	0.088	5	0.174							
9	6	0.263	6	0.443	6	3.182	6	0.174	6	2.201	6	2.61							
10	7	1.138	7	12.046	7	0.946	7	0.087	7	0.352	7	0.609							
11	8	1.215	8	0.089	8	0.172	8	0.087	8	1.761	8	0.087							
12	9	0.438	9	0.62	9	2.236	9	0.087	9	0.088	9	0.609							
13	10	0.525	10	0.177	10	2.064	10	0.087	10	0.88	10	2.872							
14	11	0.525	11	0.089	11	0.602	11	0.087	11	0.088	11	0.174							
15	12	0.438	12	2.657	12	2.666	12	0.174	12	0.088	12	0.174							
16	13	1.488	13	0.886	13	0.688	13	0.174	13	0.44	13	0.174							
17	14	0.613	TOT AREE VUOTI (µm²) 18.425		14	1.892	14	0.087	14	2.73	14	0.087							
18	15	1.663	AREA IMMAGINE(µm²) 17775.47		15	0.086	15	0.087	15	0.528	15	0.435							
19	16	1.663	% VUOTI 0.001		16	2.494	16	0.174	16	0.176	16	1.305							
20	17	0.175			17	1.806	17	0.087	17	0.176	17	1.914							
21	18	0.7			18	1.72	18	0.087	18	0.088	18	1.305							
22	19	0.963			19	1.29	19	0.261	19	1.957	19	0.087							
23	20	0.088			20	4.042	20	0.435	20	0.352	20	0.087							
24	21	0.875			21	2.752	21	0.696	21	0.088	21	3.916							
25	22	1.488			22	2.494	22	0.087	22	1.849	22	0.174							
26	23	0.7			23	0.086	23	0.174	23	1.985	23	1.131							
27	24	1.313			24	0.086	24	0.087	24	0.088	24	1.044							
28	25	0.088			25	1.892	25	0.087	25	0.088	25	0.087							
29	26	0.788			26	1.72	26	0.087	26	0.088	26	0.609							
30	27	0.613			27	2.064	27	0.174	27	0.264	27	1.914							
31	28	1.838			28	0.086	28	0.261	28	2.465	28	1.74							
32	29	1.313			29	0.172	29	0.87	29	0.088	29	0.87							
33	30	0.525			30	0.086	30	6.004	30	1.233	30	1.044							
34	31	1.488			31	1.548	31	3.829	31	0.088	31	2.436							
35	32	0.613			32	0.086	32	0.087	32	0.176	32	0.087							
36	33	0.175			33	2.58	33	2.61	33	0.088	33	12.095							
37	34	0.088			34	1.29	34	0.087	34	0.704	34	2.523							
38	35	1.05			35	0.688	35	0.087	35	0.088	35	1.566							

Fig.3.10c che indica una media dei vuoti del provino con una percentuale di 0.23547.

4. Conclusione

Alla fine della nostra sperimentazione abbiamo studiato le caratteristiche metallografiche dei nostri provini e abbiamo visto le differenze fra i due campioni che consistono in :

1. Differenza della prova della microdurezza dei nostri provini di acciaio 316L prodotto dall'additive manufacturing, uno trattato termicamente a 2 ore e l'altro a 4 ore. questo e' rappresentato in figure 5a,b,c,d.

n.	Valori diametro medio d'impronta			Relativi valori di micro-durezza (HV)			Valore medio di durezza (HV)	Deviazione standard	Deviazione dalla media	Valore finale misurazione (HV)
1	333.3579	305.6605	326.844	133.50	158.79	138.87	143.7	13.32	7.7	143.7 ± 23.1
2	310.5052	319.2932	323.029	153.87	145.52	142.17	147.2	6.03	3.5	147.2 ± 10.4
3	331.288	314.8672	305.547	135.17	149.64	158.91	147.9	11.96	6.9	147.9 ± 20.7
4	313.2389	305.2524	294.946	151.20	159.21	170.53	160.3	9.72	5.6	160.3 ± 16.8
5	310.6946	309.0715	299.812	153.68	155.30	165.04	158.0	6.14	3.5	158.0 ± 10.6
6	288.1787	287.2575	299.462	178.64	179.78	165.43	174.6	7.98	4.6	174.6 ± 13.8
7	277.9357	284.9111	296.945	192.05	182.76	168.24	181.0	12.00	6.9	181.0 ± 20.8
8	291.6906	289.8302	303.388	174.36	176.61	161.17	170.7	8.34	4.8	170.7 ± 14.4
9	283.139	285.6739	299.902	185.05	181.78	164.94	177.3	10.79	6.2	177.3 ± 18.7
10	295.0000	280.1817	302.292	170.47	188.98	162.35	173.9	13.65	7.9	173.9 ± 23.6
11	292.9927	288.823	295.423	172.81	177.84	169.98	173.5	3.98	2.3	173.5 ± 6.9
12	285.434	286.3441	302.254	182.09	180.93	162.39	175.1	11.06	6.4	175.1 ± 19.1
13	293.0783	277.8392	309.647	172.71	192.18	154.72	173.2	18.73	10.8	173.2 ± 32.4
14	310.5048	299.7257	311.2	153.87	165.14	153.18	157.4	6.71	3.9	157.4 ± 11.6
15	296.9448	294.8614	313.287	168.24	170.63	151.15	163.3	10.63	6.1	163.3 ± 18.4
16	319.8923	316.7789	302.769	144.97	147.84	161.83	151.5	9.02	5.2	151.5 ± 15.6
17	309.2037	311.3842	315.981	155.17	153.00	148.58	152.3	3.36	1.9	152.3 ± 5.8
18	306.6828	304.5105	320.937	157.73	159.99	144.03	153.9	8.64	5.0	153.9 ± 15.0
19	317.0225	320.9367	292.1677	147.61	144.03	173.79	155.1	16.25	9.4	155.1 ± 28.1
20	321.6144	302.7693	299.8150	143.42	161.83	165.04	156.8	11.66	6.7	156.8 ± 20.2

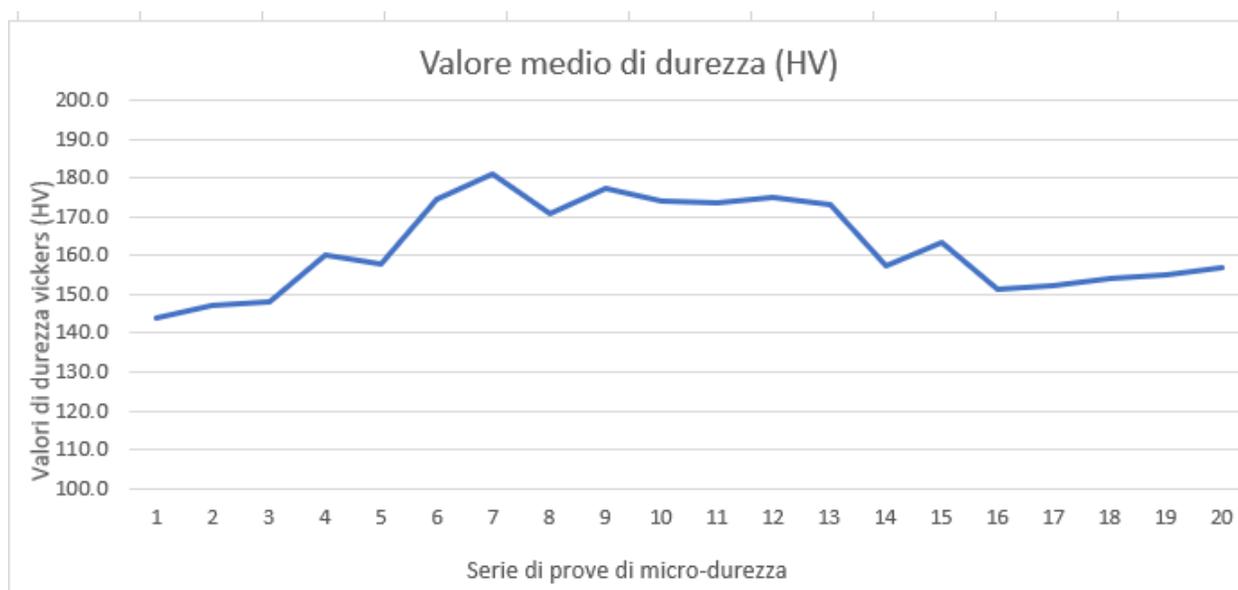


Fig.5a rappresentazione dei valori di durezza e deviazione standard del provino 316L trattato termicamente a 2 ore asse XY.

n.	Valori diametro medio d'impronta			Relativi valori di micro-durezza (HV)			Valore medio di durezza (HV)	Deviazione standard	Deviazione dalla media	Valore finale misurazione (HV)	
1	316.2374	320.1575	319.017	148.34	144.73	145.77	146.3	1.86	1.1	146.3	± 3.2
2	319.973	303.2023	323.021	144.90	161.37	142.18	149.5	10.39	6.0	149.5	± 18.0
3	312.4152	309.0713	309.371	151.99	155.30	155.00	154.1	1.83	1.1	154.1	± 3.2
4	322.2506	306.5045	307.07	142.86	157.91	157.33	152.7	8.53	4.9	152.7	± 14.8
5	317.6711	308.5024	308.502	147.01	155.87	155.87	152.9	5.12	3.0	152.9	± 8.9
6	326.5919	308.5136	314.245	139.09	155.86	150.23	148.4	8.54	4.9	148.4	± 14.8
7	309.1419	310.1158	305.591	155.23	154.26	158.86	156.1	2.43	1.4	156.1	± 4.2
8	311.4597	311.5063	300.687	152.93	152.88	164.08	156.6	6.45	3.7	156.6	± 11.2
9	308.6168	311.9389	302.679	155.76	152.46	161.93	156.7	4.81	2.8	156.7	± 8.3
10	313.6724	311.8034	301.642	150.78	152.59	163.05	155.5	6.62	3.8	155.5	± 11.5
11	305.1585	324.9312	298.379	159.31	140.51	166.63	155.5	13.47	7.8	155.5	± 23.3
12	298.3787	298.8586	307.559	166.63	166.10	156.83	163.2	5.51	3.2	163.2	± 9.5
13	324.758	300.3348	297.251	140.66	164.47	167.90	157.7	14.83	8.6	157.7	± 25.7
14	303.6534	299.6834	294.347	160.89	165.18	171.23	165.8	5.19	3.0	165.8	± 9.0
15	310.4142	315.1111	303.64	153.96	149.41	160.91	154.8	5.79	3.3	154.8	± 10.0
16	298.8123	316.8081	303.64	166.15	147.81	160.91	158.3	9.45	5.5	158.3	± 16.4
17	318.584	303.6799	303.635	146.17	160.86	160.91	156.0	8.50	4.9	156.0	± 14.7
18	303.7702	312.1543	298.38	160.77	152.25	166.63	159.9	7.23	4.2	159.9	± 12.5
19	304.6361	316.1566	306.115	159.86	148.42	158.32	155.5	6.21	3.6	155.5	± 10.8
20	310.9822	302.7693	304.595	153.40	161.83	159.90	158.4	4.42	2.6	158.4	± 7.7

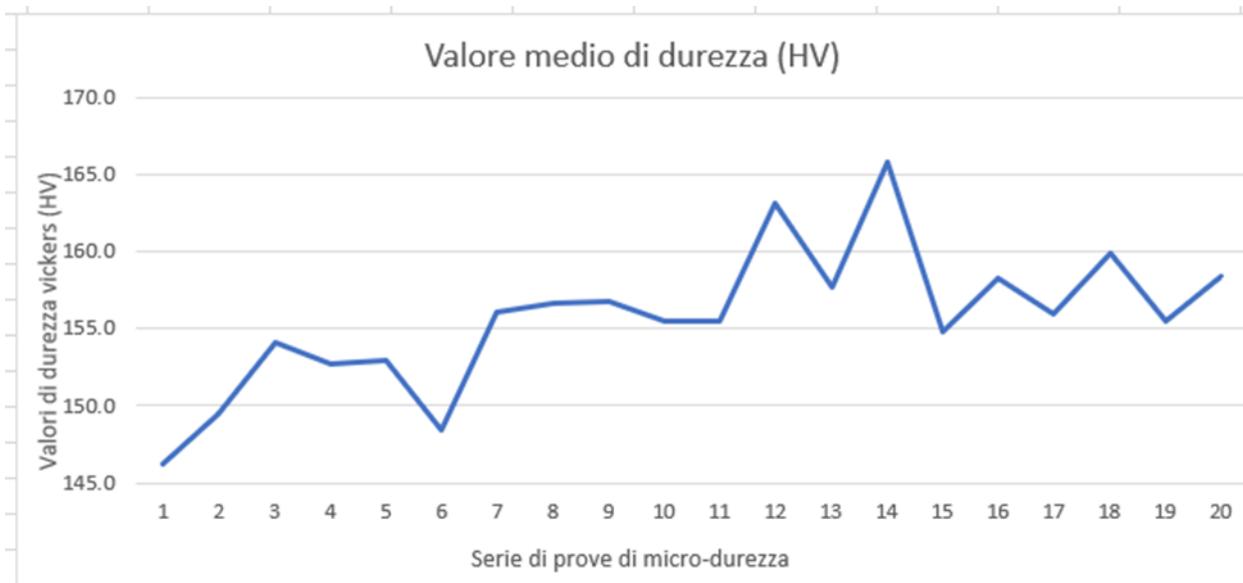


Fig.5a rappresentazione dei valori di durezza e deviazione standard del provino 316L trattato termicamente a 2 ore asse YZ.

n.	Valori diametro medio d'impronta			Relativi valori di micro-durezza (HV)			Valore medio di durezza (HV)	Deviazione standard	Deviazione dalla media	Valore finale misurazione (HV)	
1	315.2403	319.2893	337.537	149.28	145.52	130.21	141.7	10.10	5.8	141.7	± 17.5
2	316.241	321.0172	308.078	148.34	143.96	156.30	149.5	6.26	3.6	149.5	± 10.8
3	307.0243	309.5049	320.283	157.38	154.87	144.62	152.3	6.76	3.9	152.3	± 11.7
4	315.2847	314.3734	306.923	149.24	150.11	157.48	152.3	4.53	2.6	152.3	± 7.8
5	311.748	310.5518	312.995	152.65	153.82	151.43	152.6	1.20	0.7	152.6	± 2.1
6	314.4207	325.4523	304.591	150.06	140.06	159.90	150.0	9.92	5.7	150.0	± 17.2
7	312.1295	317.2414	297.47	152.27	147.41	167.65	155.8	10.57	6.1	155.8	± 18.3
8	323.4497	311.5529	295.9	141.80	152.84	169.43	154.7	13.91	8.0	154.7	± 24.1
9	303.5486	311.5529	296.035	161.00	152.84	169.28	161.0	8.22	4.7	161.0	± 14.2
10	309.5492	311.2818	295.908	154.82	153.10	169.43	159.1	8.97	5.2	159.1	± 15.5
11	295.3798	300.29	294.556	170.03	164.52	170.98	168.5	3.49	2.0	168.5	± 6.0
12	304.5917	311.371	297.08	159.90	153.02	168.09	160.3	7.55	4.4	160.3	± 13.1
13	298.2474	317.1051	301.216	166.78	147.53	163.51	159.3	10.30	5.9	159.3	± 17.8
14	299.0436	307.6849	295.798	165.89	156.70	169.55	164.0	6.62	3.8	164.0	± 11.5
15	307.5482	308.6403	304.727	156.84	155.74	159.76	157.4	2.08	1.2	157.4	± 3.6
16	300.169	314.1954	304.635	164.65	150.28	159.86	158.3	7.32	4.2	158.3	± 12.7
17	320.0168	320.5401	320.538	144.86	144.39	144.39	144.5	0.27	0.2	144.5	± 0.5
18	324.0656	309.167	323.117	141.26	155.21	142.09	146.2	7.82	4.5	146.2	± 13.5
19	323.4499	308.9382	324.065	141.80	155.44	141.26	146.2	8.03	4.6	146.2	± 13.9
20	337.3558	302.4278	315.286	130.35	162.20	149.24	147.3	16.02	9.2	147.3	± 27.7

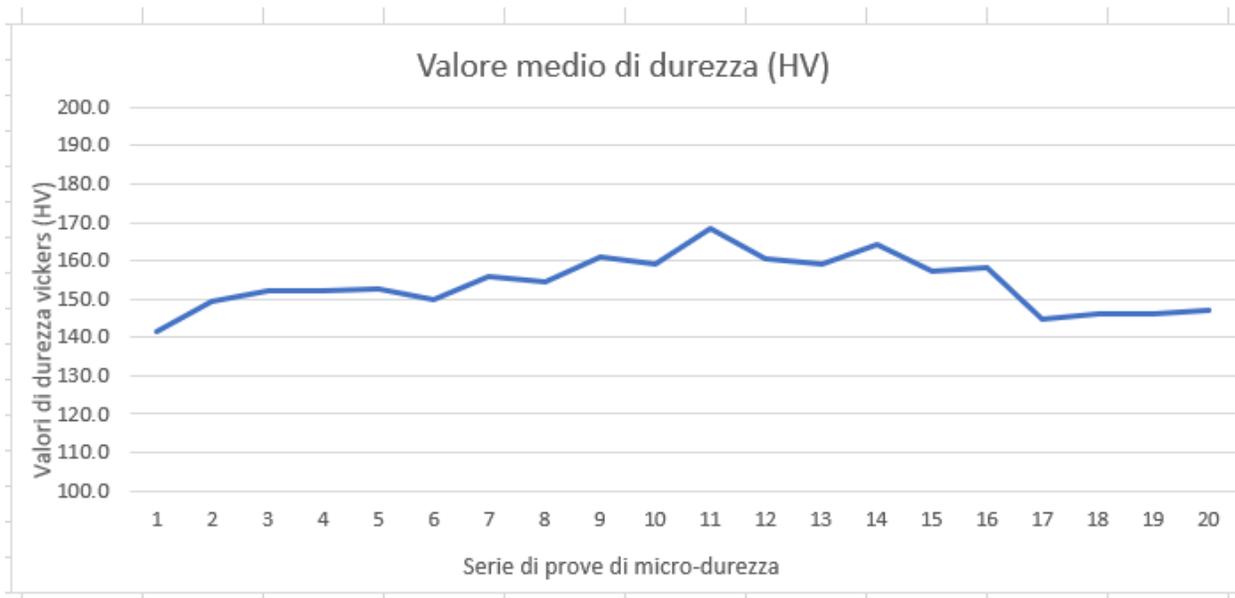


Fig.5a rappresentazione dei valori di durezza e deviazione standard del provino 316L trattato termicamente a 4 ore asse XY.

n.	Valori diametro medio d'impronta			Relativi valori di micro-durezza (HV)			Valore medio di durezza (HV)	Deviazione standard	Deviazione dalla media	Valore finale misurazione (HV)
1	300.3345	308.0725	305.026	164.47	156.31	159.45	160.1	4.12	2.4	160.1 ± 7.1
2	299.8118	310.5098	303.387	165.04	153.87	161.18	160.0	5.68	3.3	160.0 ± 9.8
3	291.0394	301.861	298.812	175.14	162.81	166.15	168.0	6.38	3.7	168.0 ± 11.0
4	270.4395	301.861	290.256	202.84	162.81	176.09	180.6	20.39	11.8	180.6 ± 35.3
5	273.9223	292.9936	283.916	197.71	172.81	184.04	184.9	12.47	7.2	184.9 ± 21.6
6	286.169	278.5212	284.695	181.15	191.24	183.04	185.1	5.36	3.1	185.1 ± 9.3
7	286.169	294.9461	285.049	181.15	170.53	182.58	178.1	6.58	3.8	178.1 ± 11.4
8	268.6993	288.2588	288.254	205.48	178.54	178.54	187.5	15.55	9.0	187.5 ± 26.9
9	363.7054	273.3519	295.759	112.15	198.54	169.60	160.1	43.97	25.4	160.1 ± 76.2
10	279.1795	277.7905	298.334	190.34	192.25	166.68	183.1	14.24	8.2	183.1 ± 24.7
11	280.6109	295.8592	295.99	188.40	169.48	169.33	175.7	10.97	6.3	175.7 ± 19.0
12	284.3882	300.2023	289.081	183.43	164.61	177.52	175.2	9.62	5.6	175.2 ± 16.7
13	296.3785	282.4367	262.284	168.89	185.97	215.65	190.2	23.66	13.7	190.2 ± 41.0
14	282.3875	297.2092	268.445	186.04	167.95	205.86	186.6	18.97	11.0	186.6 ± 32.9
15	276.2197	285.0794	260.062	194.44	182.54	219.35	198.8	18.78	10.8	198.8 ± 32.5
16	300.169	282.1858	285.049	164.65	186.30	182.58	177.8	11.58	6.7	177.8 ± 20.1
17	320.0168	320.5401	288.254	144.86	144.39	178.54	155.9	19.58	11.3	155.9 ± 33.9
18	324.0656	309.167	295.759	141.26	155.21	169.60	155.4	14.17	8.2	155.4 ± 24.5
19	298.4499	308.9382	302.065	166.55	155.44	162.59	161.5	5.63	3.3	161.5 ± 9.8
20	300.3558	302.4278	310.286	164.45	162.20	154.09	160.2	5.45	3.1	160.2 ± 9.4

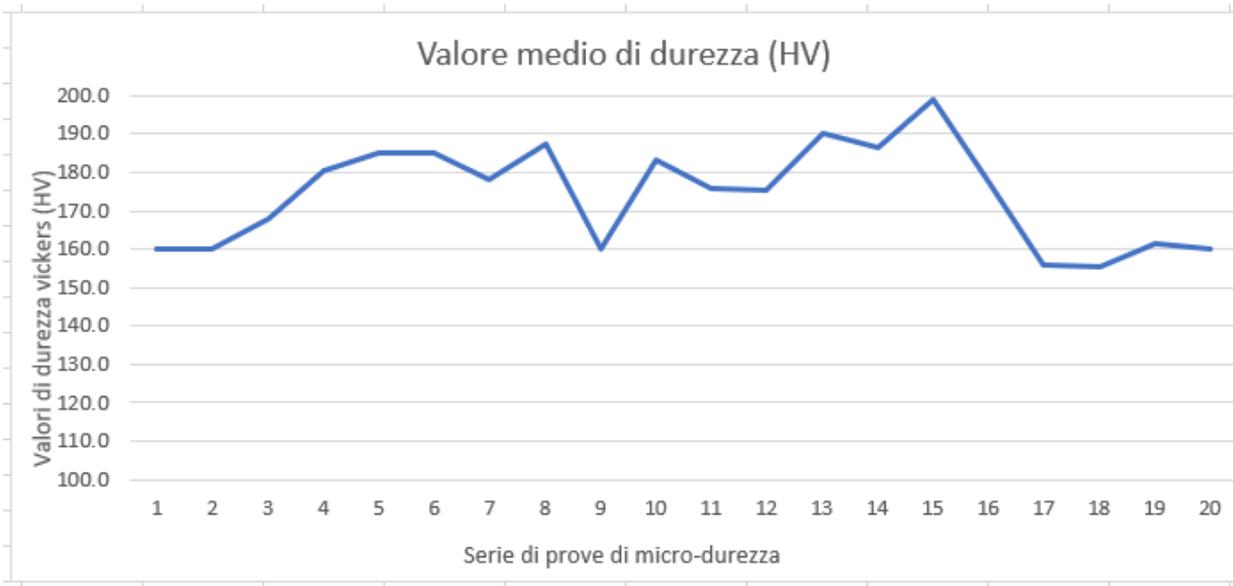


Fig.5a rappresentazione dei valori di durezza e deviazione standard del provino 316L trattato termicamente a 4 ore asse YZ.

2. Differenza della prova degli analisi dei vuoti dei nostri provini di acciaio 316L prodotto dall'additive manufacturing, uno trattato termicamente a 2 ore e l'altro a 4 ore.

- % Media dei vuoti del provino di acciaio 316L trattato termicamente a 2 ore :

- Asse XY= 0.235479167

- Asse YZ= 0.010373333

- % Media dei vuoti del provino di acciaio 316L trattato termicamente a 4 ore :

- Asse XY= 0.283413

- Asse YZ= 0.0107

4. Bibliografia

[1] Santochi Marco, “Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione” no. 2000.

[2] Filippo Gabrielli, Ippolito Rosolino, “Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche”, no. 1 giugno 2012.

[3] Che cos'è la tecnologia DED:

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

[4] Differenza fra acciaio inox 316 e 316L:

<https://www.frabo.com/ita/media-center/focus-on/differenza-fra-acciaio-inox-aisi-316-e-aisi-316/>

[5] i diversi tipi di trattamento termico:

<https://www.sim-cdm.it/it/principali-trattamenti-termici/>

[6] Che cos'è l'inglobamento:

<http://www.asteclamplan.it/IT/metallografia/inglobatura.htm>

[7] Costituenti microscopio ottico:

<https://www.zetalab.it/offerte-microscopi-nozioni-html/>

[8] prova di durezza:

<https://www.emcotest.com/it/il-mondo-della-prova-di-durezza/nozioni-sulla-durezza/teoria-della-prova-di-durezza/fondamenti-della-prova-di-durezza-77/prova-di-durezza-un-metodo-di-prova-dei-materiali-297/#:~:text=Prova%20di%20durezza%2C%20un%20metodo%20di%20prova%20dei%20materiali,-Oggi%20la%20prova&text=Con%20questo%20metodo%20di%20prova,resistenza%20all'usura>