



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Studio di acciai inossidabili fabbricati con la tecnologia additiva di fusione a letto di polvere

Study of stainless steels fabricated by powder bed fusion additive manufacturing technology

Relatore: Chiar.ma
Prof. Eleonora Santecchia

Tesi di Laurea di:
Simone Di Placido

A.A. 2019/2020

Sommario

Introduzione.....	4
1 Acciai inossidabili	5
1.1 Definizione	5
1.2 Diagramma Fe-C	6
1.3 Caratteristiche.....	8
1.3.1 Caratteristiche fisiche	8
1.3.2 Caratteristiche meccaniche	9
1.4 Saldabilità.....	11
1.5 Approfondimento sugli acciai austenitici	13
1.5.1 Acciaio inox 304.....	13
1.5.2 Acciaio inox 316/316L	16
1.6 Confronto.....	17
2 Additive Manufacturing di materiali metallici	20
2.1 Manifattura additiva	20
2.2 Procedimento	23
2.2.1 Progettazione 3D	23
2.2.2 Fase pre-stampa	24
2.2.3 Fase di stampa 3D	25
2.2.4 Fase post-processo	26
2.3 Principali tecnologie.....	27
2.3.1 Binder Jetting.....	27
2.3.2 Fused Deposition Modeling (FDM)	28
2.3.3 Photopolymer Jetting o Material Jetting.....	29
2.3.4 Laminated Object Manufacturing (LOM)	29

2.3.5 Powder Bed Fusion.....	30
2.3.6 Direct Energy Deposition	31
2.3.7 Digital Light Processing	32
2.3.8 Liquid Deposition Modeling	33
2.4 Acciaio 316L processato con tecnologie additive	33
2.4.1 Microstruttura	34
2.4.2 Proprietà meccaniche.....	35
3 Risultati e discussione	37
3.1 Obiettivo	37
3.2 Preparazione campioni	37
3.2.1 Scelta del campione e prelievo	37
3.2.2 Inglobatura.....	38
3.2.3 Assottigliamento meccanico.....	39
3.2.4 Lucidatura.....	40
3.2.5 Attacco chimico.....	41
3.3 Metodologie applicate	42
3.3.1 Microscopia ottica	42
3.3.2 Prova di microdurezza Vickers.....	43
3.4 Campioni analizzati	46
3.4.1 Acciaio AISI 316L: orientazione YZ	46
3.4.2 Acciaio AISI 316L: orientazione XY	49
3.4.3 Pozza fusa	50
3.4.4 Distribuzione gaussiana.....	52
3.5 Risultati.....	54
Conclusioni.....	56

Ringraziamenti	58
Sitografia e Bibliografia	59

Introduzione

La tecnologia di Additive Manufacturing, negli ultimi tempi, viene molto utilizzata in ambienti industriali; lo studio di tale tecnica applicata a uno dei materiali più comuni, l'acciaio inossidabile, ci consente di specializzare l'analisi e approfondire le caratteristiche più importanti di esso. In questa trattazione si è voluto studiare in particolare la tecnica di fusione a letto di polvere (Powder bed fusion) con sorgente laser applicata agli acciai, incentrando poi il focus su un campione cubico di acciaio inossidabile AISI 316L.

Inizialmente viene fatta una panoramica generale sugli acciai inossidabili, analizzando la classificazione secondo il punto di vista della metallurgia, le caratteristiche principali e la saldabilità. Segue poi nel capitolo un approfondimento su due classificazioni specifiche: l'acciaio inox AISI 304 e l'acciaio AISI 316/316L, analizzandone le varie applicazioni.

Il secondo capitolo presenta l'Additive Manufacturing; tecnologia rilevante di cui viene analizzata la teoria, i principi di funzionamento e le principali tecniche utilizzate attualmente, per poi inquadrare proprietà e microstruttura dell'acciaio inossidabile AISI 316L, processato con tecnologie additive.

Nella parte conclusiva, viene evidenziato il lavoro svolto durante l'attività di tirocinio: descrizione delle conoscenze teoriche preliminari, delle procedure affrontate in laboratorio per la preparazione dei campioni e delle strumentazioni utilizzate per le prove. Infine, nella parte conclusiva, vengono presentati e discussi i risultati ottenuti dai test svolti nella trattazione.

1 Acciai inossidabili

In questo capitolo affronteremo la teoria degli acciai inossidabili introducendo dei concetti base della metallurgia, fondamentali per uno studio e una ricerca accurata. In particolare, proseguendo la trattazione, approfondiremo gli acciai 304 e 316/316L.

1.1 Definizione

Inizialmente possiamo vedere come si classificano questi materiali, andando a fornire la definizione; lo facciamo prendendo come riferimento quella indicata dalla norma UNI EN 10020:2001, che indica gli acciai inossidabili come acciaio (ovvero come lega ferro-carbonio) con un tenore di cromo superiore al 10,5 % e un tenore di carbonio inferiore all'1,2 %. È proprio questo tenore di cromo quello che conferisce la resistenza alla corrosione, caratterizzante queste tipologie di materiali. Un'altra normativa, la UNI EN 10088-1:2005 offre un'ulteriore suddivisione sulla base di particolari caratteristiche che determinate designazioni arrivano a sviluppare. Si parla infatti di resistenza all'ossidazione a caldo (*heat resisting steel*) e resistenza allo scorrimento (*creep resisting steel*) e resistenza alla corrosione (*corrosion resisting steel*); questi ultimi rappresentano gli acciai inossidabili più diffusi, quelli con cui abbiamo più a che fare. Gli acciai inossidabili vengono suddivisi in diverse categorie qui di seguito riportate, insieme ad un esempio di acciaio appartenente alla categoria indicata:

- Acciai inossidabili martensitici ~ AISI 430
- Acciai inossidabili ferritici ~ AISI 410
- Acciai inossidabili austenitici ~ AISI 304

- Acciai inossidabili austeno-ferritici (duplex) ~ ‘2205’
- Acciai inossidabili indurenti per precipitazione

Come si evince dalla classificazione, gli acciai inossidabili possono essere distinti sulla base della struttura cristallina che assumono durante la solidificazione. Per esempio, gli acciai inossidabili ferritici sono tali perché presentano una struttura ferritica, i martensitici una struttura martensitica e così via per tutti gli altri. Ora analizzeremo come fanno acciai inossidabili, appartenenti alla stessa tipologia, a presentare strutture metallurgiche così diverse.

1.2 Diagramma Fe-C

La risposta ci viene fornita dal diagramma ferro-carbonio: uno degli argomenti propedeutici allo studio dei metalli ferrosi e delle loro proprietà, indispensabile per la comprensione e l’analisi dei cambiamenti di stato delle leghe metalliche ferrose. Il grafico rappresenta le strutture di equilibrio delle leghe ferro-carbonio appartenenti alle famiglie di acciaio e ghisa. Gli acciai, come già detto, sono leghe formate da ferro e carbonio (anche se spesso intervengono altri elementi di lega in quantità molto variabili) ed è proprio la percentuale di carbonio a determinare una prima classificazione degli stessi. Distinguiamo infatti:

- *Acciai ipoeutettoi*: con tenore di carbonio $< 0,77\%$.
- *Acciai eutettoi*: con tenore di carbonio $= 0,77\%$.
- *Acciai ipereutettoi*: con tenore di carbonio $> 0,77\%$, fino a un massimo del $2,11\%$ (oltrepassato questo limite si parla di ghisa).

Altro aspetto da sottolineare è che il contenuto stechiometrico del carbonio della cementite non superi il 6,69% in peso, quindi la graduazione nell'asse delle ascisse si ferma in corrispondenza di questo valore, mentre l'asse delle ordinate ha come riferimento la temperatura. Nel diagramma ferro-carbonio sono rappresentate le varie fasi delle leghe; per esempio, il ferro puro in natura non esiste, ma allo stato solido si presenta in tre distinte forme allotropiche, ad ognuna delle quali corrisponde, per l'appunto, una fase:

- ✚ Fase α : ferrite
- ✚ Fase γ : austenite
- ✚ Fase δ : ferrite delta

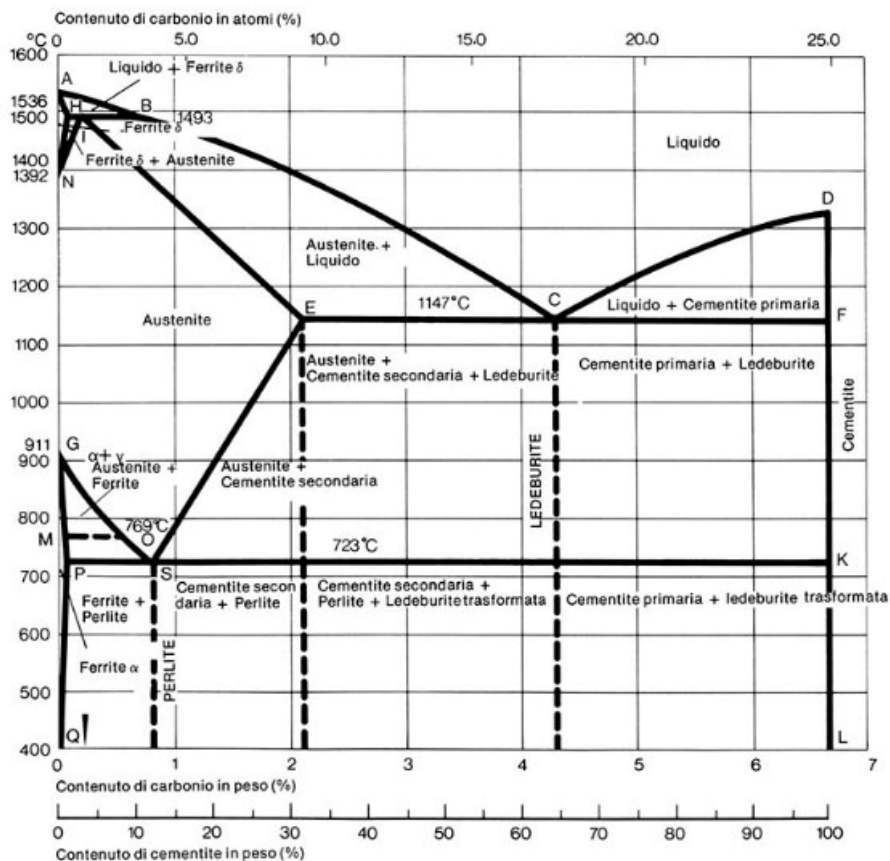


Figura 1.1 Diagramma Fe-C

Nella porzione di diagramma superiore (Figura 1.1), oltre la fase delta, è rappresentata la fase liquida del metallo. La parte intermedia raffigura lo stato del metallo liquido in equilibrio con il solido, mentre la sezione inferiore illustra il comportamento del metallo solido al variare della temperatura.

1.3 Caratteristiche

Gli acciai inossidabili consentono di disporre di una vasta gamma di proprietà fisiche e meccaniche. Queste caratteristiche possono essere utilizzate in eterogenee situazioni applicative, di cui alcune sono illustrate nei sottostanti paragrafi.

1.3.1 Caratteristiche fisiche

Il peso specifico è variabile a seconda della diversa composizione chimica ed è compreso tra $7,7 \text{ g/cm}^3$ per i tipi martensitici e ferritici e $8,06 \text{ g/cm}^3$ per gli austenitici. Per la conducibilità termica c'è da tener presente che gli acciai a struttura ferritica e martensitica conducono meglio il calore rispetto agli acciai austenitici: anche la resistività elettrica è fortemente differenziata tra gli austenitici, dove è più elevata che negli altri tipi. È anche da considerare il coefficiente di dilatazione termica: gli austenitici dilatano molto con la temperatura, rispetto agli altri inossidabili. Infine, diversa è anche la permeabilità magnetica relativa; le famiglie martensitiche e ferritiche sono sostanzialmente ferromagnetiche, mentre quella austenitica è amagnetica. Per le prime, questa caratteristica fisica non è molto influenzata dall'incrudimento per deformazione a freddo, mentre gli austenitici risentono molto di più di questo fenomeno.

1.3.2 Caratteristiche meccaniche

Le caratteristiche meccaniche sono differenti a seconda dei diversi tipi e possono essere sintetizzate come segue. Gli acciai austenitici non sono suscettibili ad innalzare le loro caratteristiche mediante tempra, conseguentemente hanno qualità resistenziali non elevate. Sono capaci, però, di innalzare anche di molto la loro resistenza mediante incrudimento per deformazione plastica a freddo, elevando il carico di rottura; questo fenomeno è molto sfruttato proprio nello stampaggio a freddo di questi materiali. Posseggono inoltre elevate caratteristiche di resistenza a fatica. Quella agli urti è molto alta, sia a temperatura ambiente, sia a temperature molto basse. Anche gli acciai ferritici non sono suscettibili di trattamento di tempra e conseguentemente presentano caratteristiche resistenziali non elevate. L'incrudimento per deformazione plastica a freddo incrementa anche in questo caso le caratteristiche di resistenza, ma in misura minore rispetto agli austenitici. I tipi martensitici offrono le migliori caratteristiche di resistenza meccanica fra gli acciai inossidabili, quando sono messi in opera allo stato bonificato (tempra e rinvenimento). Nella Tabella 1.1 sottostante sono state elencate alcune delle caratteristiche fisiche e meccaniche tra le più significative dei principali acciai inox più utilizzati.

Tipo di acciaio (AISI)	Peso specifico (g/cm^3)	CARATTERISTICHE FISICHE-MECCANICHE		
		Conducibilità termica ($cal/cm^{\circ}C s$)	Coeff. di dilatazione termica medio ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}C^{-1}$)	Carico di rottura (kg/mm^2) R
301	8,06	0,039	16,9	60 ÷ 75
303 303 Se	8,06	0,039	17,3	50 ÷ 75
304	8,06	0,039	17,3	55 ÷ 70
304 L	8,06	0,039	17,3	53 ÷ 68
309	8,06	0,037	15	55 ÷ 70
309 S	8,06	0,037	15	53 ÷ 68
310	8,06	0,034	15,9	55 ÷ 70
310 S	8,06	0,034	15,9	53 ÷ 68
316	8,06	0,039	16	55 ÷ 70
316 F	8,06	0,034	16,5	59 ÷ 70
316 L	8,06	0,039	16	53 ÷ 68
321	8,06	0,038	16,6	55 ÷ 70
347	8,06	0,038	16,6	55 ÷ 70

Tipo di acciaio (AISI)	CARATTERISTICHE FISICHE-MECCANICHE		
	Carico di snervamento (kg/mm^2) $R_{p(0,2)}$ min	Allungamento a rottura (%)	Durezza HRB max
301	22	45	92
303 303 Se	22	40	/
304	20	45	95
304 L	18	45	96
309	23	40	97
309 S	21	40	98
310	23	40	99
310 S	21	40	100
316	21	40	101
316 F	27	60	102
316 L	20	40	103
321	21	40	104
347	21	40	105

Tabella 1.1 - Caratteristiche di alcuni acciai

1.4 Saldabilità

Possiamo definire che cos'è la saldabilità dell'acciaio e da quali fattori dipende: si tratta dell'attitudine dell'acciaio stesso a legarsi, tramite l'impiego delle tecniche di saldatura, a elementi di materiali diversi (saldatura eterogenea) o dello stesso materiale (saldatura autogena). Essendo una proprietà dell'acciaio, non è una grandezza fisica misurabile ed è strettamente legata alle caratteristiche finali volute. In base all'applicazione del metallo, si può prediligere una certa resistenza meccanica, un'alta tenacità o una determinata permeabilità magnetica. Generalmente, un acciaio dall'alta saldabilità, ha le seguenti caratteristiche fondamentali:

- resistenza meccanica, adeguata all'utilizzo
- alta tenacità e sopportazione dei carichi di lavoro
- mancanza di difetti superficiali e interni quali ossidi, porosità, incollature, ecc...

Per garantire il rispetto di tali caratteristiche vanno considerate le condizioni e la procedura con la quale si intende saldare (saldabilità operativa), le proprietà della struttura saldata (saldabilità costruttiva) e le trasformazioni chimico-fisiche che avvengono nella struttura dell'acciaio stesso (saldabilità metallurgica). Quest'ultima condiziona pesantemente gli altri due fattori, rendendo necessario identificare tre zone critiche nel giunto di saldatura (Figura 1.2):

- *Zona termica alterata, ZTA*: è il punto che subisce direttamente il riscaldamento, ad una temperatura tra i 700° e i 750°.
- *Zona sotto cordone, ZSC*: è il punto più vicino alla Zona Fusa, che subisce un riscaldamento superiore ai 750°.

- *Zona Fusa, ZF*: è il punto in cui avviene il mescolamento tra il metallo d'apporto e il metallo base, dove avvengono le variazioni chimiche più importanti.

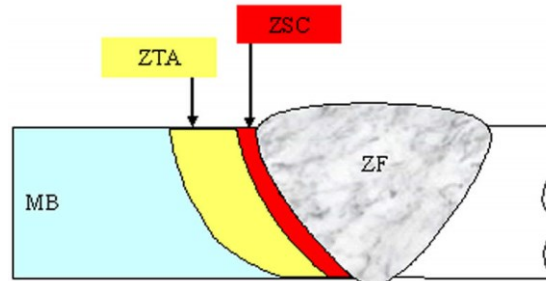


Figura 1.2 - Schema delle tre zone critiche nel giunto

La capacità di un acciaio di mantenere, entro certi limiti, i valori di durezza nella ZTA è considerato un indice di *saldabilità metallurgica*: come già menzionata, essa dipende dalla composizione chimica dell'acciaio stesso, dalla temprabilità e dalla velocità di raffreddamento. La composizione chimica dell'acciaio determina le variazioni strutturali che avvengono nella Zona Termica Alterata e viene espressa attraverso un indice, definito carbonio equivalente (CE). La saldabilità dell'acciaio diminuisce notevolmente all'aumentare del coefficiente CE e dello spessore del cordone di saldatura, mentre cresce con l'apporto termico specifico. Fino al contenuto dello 0,30 % di carbonio la saldabilità è ritenuta buona, tra lo 0,30 % e lo 0,50 % è ancora accettabile nonostante richieda alcune precauzioni, mentre oltre lo 0,50 % anche tutte le precauzioni possibili possono risultare inutili come garanzia del lavoro finito.

Saldare l'acciaio inox, quindi, è sempre possibile quando quest'ultimo possiede caratteristiche ben precise. La saldatura è un procedimento complesso e di gran precisione,

la conoscenza dei materiali è indispensabile per garantire una lavorazione finita di alta qualità.

1.5 Approfondimento sugli acciai austenitici

Di seguito approfondiremo alcune delle caratteristiche e peculiarità di due tipologie principali di acciai, l'acciaio inox 304 e inox 316/316L, di cui riportiamo le designazioni nella Tabella 1.2 seguente:

DESIGNAZIONE AST AST DESIGNATION	DESIGNAZIONE EUROPEA EUROPEAN DESIGNATION	DESIGNAZIONE AMERICANA AMERICAN DESIGNATION
304	X5CrNi18-10/ 1.4301	UNS S30400/ Type 304

DESIGNAZIONE AST AST DESIGNATION	DESIGNAZIONE EUROPEA EUROPEAN DESIGNATION	DESIGNAZIONE AMERICANA AMERICAN DESIGNATION
316	X5CrNiMo17-12-2/ 1.4401	UNS S31600/ Type 316
316L	X5CrNiMo17-12-2/ 1.4404	UNS S31603/ Type 316L

Tabella 1.2 - Designazioni degli acciai

1.5.1 Acciaio inox 304

L'acciaio AISI 304, 18%Cr-8%Ni, è il capostipite degli acciai inossidabili austenitici ed è caratterizzato da un'ottima resistenza alla corrosione, eccellente duttilità, formabilità e ottima saldabilità, grazie anche alle ampie possibilità di finitura superficiale con cui può essere fornito, tra cui decorato e verniciato, è utilizzato in una grande varietà di applicazioni: da oggetti casalinghi ed elettrodomestici, da temperatura criogeniche a 900

°C e in serbatoi per prodotti chimici. Di seguito viene riportata l'analisi chimica nella Tabella 1.3:

ELEMENTI / ELEMENTS (%)	C	Cr	Ni	Mo	ALTRI / OTHERS
304 AST valori tipici / typical values	0.04	18.2	8.1	-	-
1.4301 EN 10088-2 valori limite / limit values	≤0.07	17.5+19.5	8.0+10.5	-	-
S30400 ASTM A240 valori limite / limit values	≤0.07	17.5+19.5	8.0+10.5	-	-

Tabella 1.3 - Analisi chimica: Acciaio inox 304

Le caratteristiche fisiche-meccaniche sono consultabili nella Tabella 1.1, a comparazione con le altre tipologie. L'acciaio inossidabile 304 AST ha una buona resistenza alla corrosione nei più comuni ambienti corrosivi, ma non è indicato per quelle applicazioni in cui c'è rischio di attacco intergranulare (in cui si consiglia l'utilizzo della variante 304L, con minore tenore di carbonio). Presenta una buona resistenza alla corrosione atmosferica in ambiente rurale e può essere applicato a contatto con l'acqua dolce. In generale, una regolare pulizia delle superfici esposte (se applicabile) è utile per conservare l'aspetto originale del materiale. L'acciaio 304 presenta una buona resistenza alla corrosione ad un'ampia gamma di prodotti chimici, tra cui, per esempio, acido formico (in tutte le concentrazioni a temperatura ambiente) e acido nitrico (in concentrazione fino al 65 % a temperature comprese tra 20 e 60 °C). L'acciaio inossidabile 304 è inoltre idoneo al contatto con gli alimenti (vino, birra, latte, succo di frutta ecc.).

Allo stato ricotto l'acciaio inox 304 può essere facilmente lavorato con tutti i processi standard (piega, imbutitura, stiramento ecc.). Qualsiasi lavorazione aumenta la resistenza e la durezza del materiale e può renderlo leggermente magnetico. Alcune lavorazioni sono

eseguite più facilmente a temperatura elevata. Sono inoltre disponibili per questo acciaio delle varianti con formabilità migliorata (valori di indice Erichsen e LDR più alti); tali materiali sono particolarmente adatti alle operazioni di formatura a freddo che combinano lo stiramento allo stampaggio profondo.

L'acciaio inox 304 ha un'eccellente saldabilità in tutti i più comuni processi di saldatura (saldatura a resistenza, a punti, HF, GTAW, GMAW, ad elettrodo rivestito o in gas con filo, a fascio di elettroni, plasma e laser). Per i lamierini sottili, normalmente non è necessario l'utilizzo del materiale di apporto mentre nel caso di lamiere più spesse si raccomanda l'utilizzo del 308/308L o del 309L in caso di saldatura fra materiali diversi (ad es. saldatura 304/acciaio al carbonio o 304/acciai inossidabili ferritici). I gas protettivi comunemente utilizzati sono: Ar, Ar + 2% O₂ , Ar + 5% H₂ , Ar + 2% CO₂ (solo se non è un problema un aumento del tenore di carbonio). In generale non è necessario il trattamento post-saldatura, nei casi in cui c'è rischio di *stress corrosion cracking* può essere effettuato un trattamento di distensione.

Dopo deformazione a freddo (incrudimento) e saldatura (rischio di corrosione intergranulare nel giunto saldato), un trattamento termico a 1050-1100 °C seguito da raffreddamento in acqua consente di solubilizzare i carburi, ricristallizzare la struttura ed eliminare gli stress interni. Dopo la ricottura è necessario il trattamento di decapaggio (intervento chimico atto a rimuovere gli ossidi superficiali presenti sulla superficie di acciaio inossidabile quali scorie, polveri,) e passivazione (fenomeno di natura elettrochimica che può rallentare o impedire completamente la reazione di corrosione dei materiali metallici, che altrimenti questi ultimi subirebbero).

1.5.2 Acciaio inox 316/316L

L'acciaio inox AISI 316 è un acciaio austenitico, contenente cromo-nichel-molibdeno. Le caratteristiche generali del prodotto sono simili a quelle dell'acciaio 304 (ottima duttilità e saldabilità) con un aumento della resistenza alla corrosione generalizzata, pitting e crevice; determinante il quantitativo di molibdeno, che conferisce una maggiore resistenza alla corrosione causata dai cloruri. Anche le caratteristiche di questo acciaio lo rendono adatto all'utilizzo in ambienti aggressivi, e lo rende utilizzabile in un ampio range di temperature: dalle temperature criogeniche fino a 800-850 °C. La variante a basso contenuto di carbonio (316L) minimizza la precipitazione dei carburi nei processi di saldatura. Troviamo in Tabella 1.4 l'accurata analisi chimica:

ELEMENTI / ELEMENTS (%)	C	Cr	Ni	Mo	ALTRI / OTHERS
316 AST valori tipici / typical values	0.06	16.7	10.6	2.1	-
1.4401 EN 10088-2 valori limite / limit values	≤0.07	16.5+18.5	10+13	2+2.5	-
S31600 valori limite / limit values	≤0.08	16+18	10+14	2+3	-
316L AST valori tipici / typical values	0.03	16.7	10.3	2.1	-
1.4404 EN 10088-2	≤0.03	16.5+18.5	10+13	2+2.5	-
S31603 valori limite / limit values	≤0.03	16+18	10+14	2+3	-

Tabella 1.4 - Analisi chimica: Acciai inox 316/316L

Come per l'acciaio inox 304, le caratteristiche fisiche-meccaniche di questi due acciai sono esaminabili nella Tabella 1.1. In generale l'acciaio 316 ha una buona resistenza alla corrosione intergranulare, la variante 316L, grazie al ridotto contenuto di carbonio, è particolarmente resistente a questo tipo di attacco corrosivo. Esso non è suscettibile alla corrosione sotto tensione in presenza di H₂S (NACE A B), mentre è suscettibile a questo

attacco corrosivo in presenza cloruri (ASTM G36). L'acciaio 316 è resistente alla corrosione generalizzata anche in presenza di H₂SO₄. Per quel che ne riguarda la formabilità, allo stato ricotto, può essere facilmente lavorato con tutti i processi standard (piega, imbutitura, stiramento ecc.). L'acciaio 316 è facilmente saldabile ed è adatto a tutti i processi di saldatura convenzionali (plasma, GTAW, GMAW, resistenza, laser, ecc.). Per la saldatura di sezioni sottili ($\leq 2.5\text{mm}$) non è necessario l'utilizzo del materiale d'apporto. Per gli spessori più alti si consiglia l'utilizzo delle tecnologie GTAW, GMAW, plasma, e del 316L/316LSi/317L come materiale d'apporto. Per quanto concerne l'atmosfera protettiva, si consiglia l'utilizzo di Ar / Ar + 5% H₂ per le tecnologie GTAW e Plasma, Ar +2% CO₂ / Ar + 2% CO₂ + 1% H₂ per il processo GMAW. In generale non è richiesto il trattamento termico post-saldatura. Per recuperare la resistenza a corrosione del materiale si suggerisce di eseguire un trattamento di descagliatura chimica/meccanica del cordone seguito da passivazione. L'acciaio 316 non è induribile per trattamento termico. Dopo deformazione a freddo (incrudimento) e saldatura (rischio di corrosione intergranulare nel giunto saldato), un trattamento termico a 1050-1100°C seguito da raffreddamento in acqua consente di solubilizzare i carburi, ricristallizzare la struttura ed eliminare gli stress interni. Dopo la ricottura è necessario il trattamento di decapaggio e passivazione.

1.6 Confronto

Di seguito riportiamo un'analisi, per confrontare i due acciai. La maggiore resistenza alla corrosione da parte dei cloruri è una specifica importante per l'acciaio inox 316, in quanto lo rende adatto, per esempio, all'uso nel campo della carpenteria navale. Il 304, resistente ma non quanto il 316, viene usato solitamente per la realizzazione di cucine, lavelli, posate,

cappe e tutti gli oggetti correlati. In pratica, il primo è adatto al “lavoro duro” e l’altro è idoneo per rispondere alle nostre esigenze quotidiane.

Oltre a questo, sempre parlando di differenza tra acciaio inox 304 e 316, è utile considerare che il primo è ottimo sia per l’uso in ambienti interni che per l’utilizzo nelle aree outdoor. Tuttavia, non se ne consiglia l’uso nei luoghi in cui il livello di inquinamento è elevato (come le zone industriali, i porti, gli stabilimenti dove si lavorano o si utilizzano prodotti chimici, etc.). D’altra parte, l’AISI 316 ha il molibdeno dalla sua parte che, seppur implementato in percentuali ridotte, riesce comunque a fare la differenza (come già citato in precedenza) permettendo a questo acciaio di rivelarsi idoneo in tutte quelle situazioni in cui il 304 è sconsigliato. Il 316 è ottimo persino in tutti gli stabilimenti dove si lavora con gli alimenti, proprio perché propone una valida resistenza ai cloruri, e quindi anche agli acidi. È adatto per quasi ogni tipo di applicazione nel settore alimentare e, più in particolare, per la realizzazione di contenitori e macchinari usati nell’industria conserviera e nell’ambito della ristorazione (Figura 1.3).



Figura 1.3 - Attrezzature per la ristorazione in acciaio inox

Nonostante l'AISI 316 risulti più resistente rispetto al 304, prestare attenzione alla sua manutenzione regolare è fondamentale. In caso contrario, non si esclude la formazione della ruggine (anche se solo in quantità minime). Anche l'acciaio inox 304 va tenuto sotto controllo, soprattutto quando usato in luoghi dove l'acido cloridrico è presente (o usato in modo frequente) o quando viene implementato in zone marittime, dove sabbia, vento e umidità giocano un ruolo invasivo nei confronti del materiale stesso e del suo aspetto originario. Queste caratteristiche determinano una fondamentale importanza nel momento in cui si va progettando determinate strutture e/o oggettistica, nel contemporaneo.

2 Additive Manufacturing di materiali metallici

Nello svolgersi della trattazione, seguirà un capitolo dedicato all'Additive Manufacturing, per poi analizzare proprietà e microstrutture di campioni di acciaio 316L processati con le tecnologie additive.

2.1 Manifattura additiva

Le richieste sempre più complesse da parte dei progettisti hanno spinto i tecnologi ad approcciarsi sempre più alla rivoluzione dell'additive manufacturing (manifattura additiva). Essa si distingue dalle tradizionali tecnologie di lavorazione perché non asporta materiale dal grezzo (come avviene nella classica manifattura sottrattiva: tornitura, fresatura, ecc.) ma ottiene particolari tridimensionali molto complessi, attraverso il deposito progressivo di strati di materiale continuo su superficie di lavoro. (Figura 2.1)

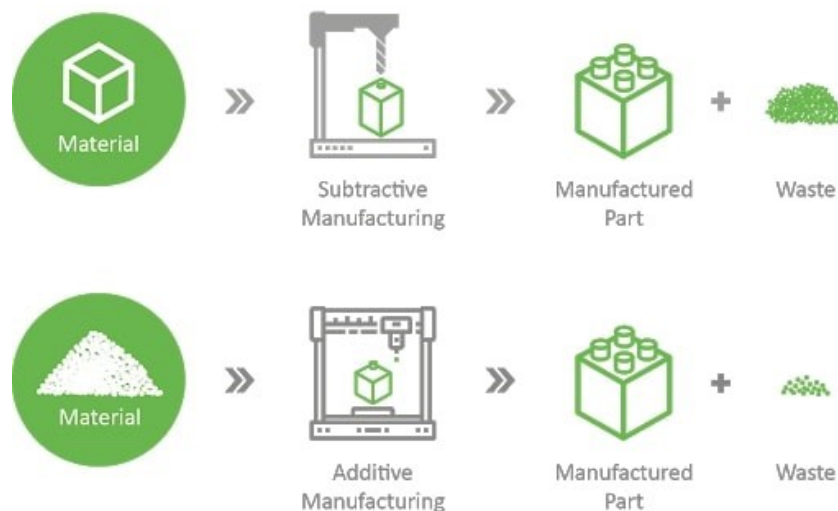


Figura 2.1 – Differenze di ciclo tra Additive Manufacturing (AM) e Subtractive Manufacturing (SM)

L'additive manufacturing è diventato una tecnica produttiva consolidata per molte attività manifatturiere e non solo, che si sono impegnate in investimenti importanti in quest'ottica. La maggior parte ne ha fatto una scommessa con lo scopo di apprenderne i reali benefici, seppur con un costo iniziale molto elevato. Ad oggi, però, sono molti i casi di successo che rendono questa tecnologia altamente innovativa e rivoluzionaria. Chiaramente, l'additive manufacturing non avrà mai la pretesa di sostituire la produzione tradizionale (almeno non del tutto, per ora), ma di affiancarla laddove le tecniche di produzione per asportazione di truciolo o deformazione plastica risultassero troppo costose o inadeguate. L'ampia gamma delle potenziali applicazioni renderà sempre più economico realizzare parti con design complessi, con sottosquadri, strutture reticolari e molto altro. In particolare, è possibile avere dei componenti ibridi, in parte realizzati con le tecniche tradizionali e in parte con l'additive manufacturing, abbattendo tempi e costi di produzione, di cui un esempio applicativo è la macchina dotata di tecnologia ibrida riportata in Figura 2.2.



Figura 2.2 - LASERTEC 65 DED hybrid; macchinario che opera tramite DED (Additive) e fresatura (Asportazione di truciolo)

Se si vogliono ottenere risultati ottimali con additive manufacturing, è necessario considerare l'intera catena di processo. Il design del componente che si vuole realizzare non è più vincolato alla necessità di avere un blocco di materiale da lavorare, ma dalla funzione stessa che il componente andrà a svolgere in servizio. Uno tra i principali vantaggi derivanti dell'uso di tecnologie di additive manufacturing, dal punto di vista economico, è il basso costo di produzione di oggetto ad alta personalizzazione. Grazie ai sistemi di stampa 3D è possibile realizzare produzioni personalizzate o piccole produzioni in serie in maniera diretta, senza passare attraverso la realizzazione di stampi. Ciò comporta una filiera di produzione molto corta e l'opportunità di produrre solamente il componente necessario senza necessità di produrne di aggiunti (es. stampi). Additive manufacturing è inoltre sinonimo di scarto di lavorazione molto ridotto o addirittura nullo. Nonostante il costo elevato della materia prima, la possibilità di riutilizzare il materiale non lavorato, rende il processo molto vantaggioso e sostenibile. Una visione d'insieme sui costi, relativi alle complessità geometriche, in ottica futura di un continuo sviluppo delle varie tecnologie, è visibile in Figura 2.3.

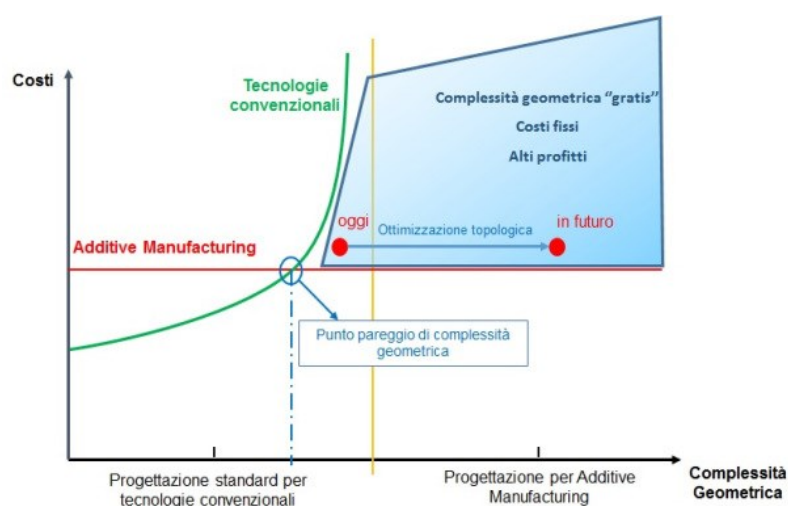


Figura 2.3 - Grafico Costi-Complessità Geometrica

Nel campo delle macchine e della tecnologia, sono le innovazioni che spingono avanti la produzione additiva, così come le reti costituite da un'ampia varietà di aziende, utenti e istituti di ricerca che stanno mettendo in comune le loro conoscenze per un fine comune, quello additivo.

2.2 Procedimento

Il processo additivo nella fase di produzione è caratterizzato da un ciclo di stampa che si ripete fino alla realizzazione completa di un modello fisico. In merito ai processi di additive manufacturing però, la parte di “stampa 3D” è solamente uno dei momenti che caratterizzano un flusso di lavoro ben più articolato suddivisibile in 4 fasi fondamentali: progettazione 3D, fase pre-stampa, di stampa 3D e fase post-processo.

2.2.1 Progettazione 3D

Partendo dal concetto del componente che si intende realizzare, si passa alla fase di disegno vettoriale mediante l'utilizzo di software CAD (Computer Aided Design). Il disegno all'elaboratore è la fase di progettazione 3D in cui si stabiliscono le geometrie ed i parametri del modello da realizzare, come in figura 2.4. Il file risultante dalla modellazione 3D (in formato STL) verrà processato con software pre-stampa attraverso i quali il modello vettoriale verrà convertito in “linguaggio macchina” e sottoposto all'operazione di slicing, durante la quale il disegno viene suddiviso in sezioni di spessore costante.

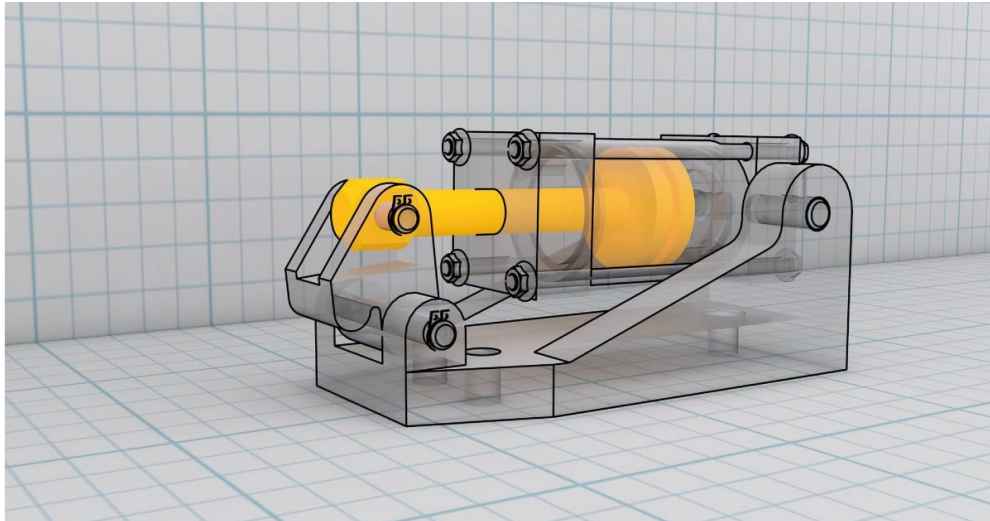


Figura 2.4 - Esempio di modellazione CAD in 3D

2.2.2 Fase pre-stampa

La fase che precede la “stampa 3D” è di pari importanza a quella della progettazione vettoriale. La corretta realizzazione di un modello tridimensionale con tecnologie additive passa sia attraverso la progettazione CAD all’elaboratore, sia attraverso l’analisi della superficie, lo studio dei supporti di stampa ed una corretta “messa in tavola” (posizionamento ed orientamento della geometria all’interno del volume di stampa) del componente da realizzare. Dopo aver effettuato il controllo delle geometrie in termini di punti e superfici, si procede con lo studio e la simulazione dei supporti di stampa in relazione all’oggetto da produrre ed al suo orientamento. Durante questa fase si determinano parametri molto importanti inerenti al consumo di materiali e tempi di stampa. L’ultima fase, prima di quella produttiva, riguarda l’invio dei file in macchina e la scelta dei parametri di stampa che determineranno i tempi di realizzazione ed il livello di

risoluzione del modello fisico (altezza/spessore layer). Una buona dose di esperienza, la conoscenza dei materiali e della tecnologia di stampa 3D che verrà utilizzata, saranno elementi fondamentali per la corretta realizzazione del modello fisico. I processi che portano dalla progettazione al modello finito infatti, necessitano di controllo e quindi di conoscenza.

2.2.3 Fase di stampa 3D

La fase di stampa 3D è quella meno impegnativa sia dal punto di vista fisico sia mentale. La stampante 3D eseguirà il lavoro assegnato e, nel caso in cui lo abbiate impostato, invierà un messaggio di avviso al termine della stampa. Un esempio del processo è visibile nella Figura 2.5. Bisogna tener conto che non tutte le stampanti 3D permettono un refill dei materiali, durante l'intero processo di realizzazione, quindi l'operatore deve essere molto accurato nella gestione della materia prima da caricare per la corretta realizzazione del job di stampa.



Figura 2.5 - Fase di stampa 3D

2.2.4 Fase post-processo

La fase che segue la stampa 3D contempla usualmente tre possibili processi:

- *Rimozione dei supporti di stampa:* Nel caso della stampa 3D con polimeri, l'azione di rimozione dei supporti di stampa può avvenire attraverso l'azione manuale con uso di pinze, abrasione meccanica o manuale, forni ad alte temperature per la liquefazione dei supporti, sistemi ad ultrasuoni e immersione in solventi. Nel caso in cui si abbia a che fare invece con parti realizzate in additive metallico, potrebbe essere necessario l'utilizzo di precisi sistemi di taglio o sistemi di abrasione meccanica
- *Stabilizzazione delle geometrie e delle microstrutture:* Questo tipo di processo viene adottato sia per la stampa di polimeri sia per la stampa 3D di metalli. Nel primo caso la stabilizzazione delle resine fotosensibili avviene usualmente all'interno di un forno con luce ultravioletta (UV). Nel caso dei metalli invece, i modelli vengono processati in forni ad alta temperatura.
- *Finitura superficiale:* I processi di finitura superficiale (Figura 2.6) vengono adottati sia per i modelli realizzati in additive metallico, sia per gli oggetti stampati con polimeri. La fase di finitura può essere effettuata per apportare migliorie funzionali o estetiche e prevede molteplici processi come ad esempio lucidatura o sabbiatura.



Figura 2.6 - Finitura superficiale su pallina di ferro

2.3 Principali tecnologie

2.3.1 Binder Jetting

Il nome di questa tipologia di lavorazione deriva dal nome depositato dai suoi inventori, i ricercatori del M.I.T. di Boston: “3D print”, stampa 3D per l’appunto. Oggigiorno, tuttavia, si tende ad associare il termine stampa 3D a tutti i processi di Additive Manufacturing sui polimeri, soprattutto quelli FDM (modellazione a deposizione fusa) che troviamo nelle macchine anche a basso costo, sempre più diffuse. Il binder jetting lavora mediante l’utilizzo di speciali agenti solidificanti; viene per questo spesso anche chiamata Inkjet Printing per la similitudine con l’inchiostro delle comuni stampanti. Le polveri sono costituite dal materiale strutturale e da un legante, che può essere organico o inorganico. Questa tipologia di fabbricazione permette di aggregare la materia prima senza l’utilizzo del calore, o meglio senza che la materia di base venga fusa direttamente in macchina, richiedendo però un trattamento in forno per i particolari metallici, detto sinterizzazione, per ridurre la percentuale di legante e ottenere così migliori proprietà strutturali. Bisogna però tener conto, in fase di progettazione, del ritiro dei particolari se sottoposti a questo

trattamento, in quanto molto accentuato e dell'ordine del 10-20%. Si possono realizzare con un'alta produttività particolari in polimero, metallo ma anche in ceramica, sabbia o vetro. I particolari, specie quelli in polimero, possono essere creati in un'ampia gamma di colori. In Figura 2.7 viene mostrato lo schema produttivo della tecnologia stessa.

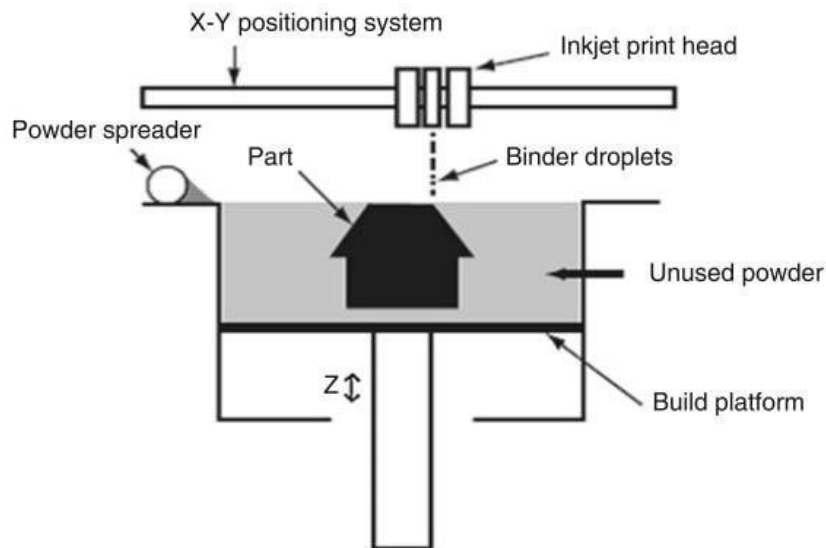


Figura 2.7 - Schema della tecnologia Binder Jetting

2.3.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Si tratta della tecnologia delle stampanti 3D diffuse ormai anche in molte case di hobbisti ed è anche la più semplice ed economica. Un filamento di polimero viene riscaldato e quindi estruso tramite un ugello; quest'ultimo ha la possibilità di muoversi nello spazio andando a generare la geometria del particolare che vogliamo ottenere. La tecnologia FDM presenta dei limiti nella precisione e finitura superficiale del manufatto, in quanto il diametro dell'ugello non può essere ridotto di molto. La gamma di polimeri utilizzabili negli ultimi anni si è ampliata moltissimo, si iniziano a trovare sul mercato anche i primi polimeri tecnici oltre ai termoplastici classici (es. PLA, ABS) ed ai più conosciuti

elastomeri (es. TPU). La possibilità di utilizzare materiali di colori differenti rende questa tecnica adatta anche alla creazione di prototipi, più simili possibile al prodotto finale. Semplicità ed economicità (poche migliaia di euro, ma anche qualche centinaio in alcuni casi) di questa tecnologia hanno permesso la diffusione al grande pubblico delle tecnologie di additive manufacturing; tra i pregi di questa tecnologia troviamo infatti anche la possibilità di essere utilizzata in ambienti come uffici o case.

2.3.3 Photopolymer Jetting o Material Jetting

Questa tipologia di lavorazione si basa sulle proprietà fotosensibili di alcuni polimeri o cere speciali. Microsfere di polimero vengono depositate per strati, sino a formare il modello da realizzare mentre una luce UV solidifica il deposito. Uno dei vantaggi di questa tipologia di lavorazione è la possibilità di creare particolari di più materiali; si possono così generare, direttamente in materiale differente, supporti alla stampa. Questa tecnologia permette di avere prototipi multicolore in diversi materiali e con una finitura superficiale di alto livello. I manufatti però sono molto delicati, di conseguenza non adatti a diventare parti strutturali.

2.3.4 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Diversi fogli di materiale vengono impilati e laminati assieme per formare l'oggetto desiderato. La laminazione dei fogli, tagliati con una lama o mediante laser, può avvenire chimicamente, tramite adesivi, per saldatura ad ultrasuoni o brasatura (solo per i metalli). Le parti che vengono tagliate strato per strato vengono rimosse alla fine del processo. Questa tecnologia permette alta produttività a costi relativamente contenuti, permette

inoltre di poter creare oggetti con delle componenti annegate nei fogli. Si possono ottenere oggetti lavorando fogli di carta, plastica e metalli.

2.3.5 Powder Bed Fusion

La fusione a letto di polvere attualmente è la tecnologia più promettente per quanto riguarda l'additive manufacturing dei metalli, in quanto permette di realizzare particolari strutturali dalle elevate prestazioni. Il processo è molto semplice (Figura 2.8): strati di polveri metalliche vengono successivamente solidificati mediante un raggio laser orientato da specchi mobili. La microfusione innescata dal laser restituisce un materiale molto uniforme ed è per questo motivo che le proprietà delle leghe, lavorate in questo modo, sono perfino superiori a quelle lavorate mediante tecnologie meccaniche classiche. Si possono lavorare molte leghe metalliche dall'alluminio al titanio con geometrie complesse, però le macchine lavorano su superfici molto ridotte e con costi molto elevati. Questo genere di processo additivo necessita di un gran numero di supporti quando in gioco ci sono sorgenti laser e polveri metalliche, mentre nel caso in cui la sorgente energetica sia un fascio di elettroni, i supporti nel caso di polveri metalliche sono molto ridotti se non del tutto assenti; sarà la polvere stessa degli strati già fusi a svolgere la funzione di supporto locale al pezzo in costruzione.

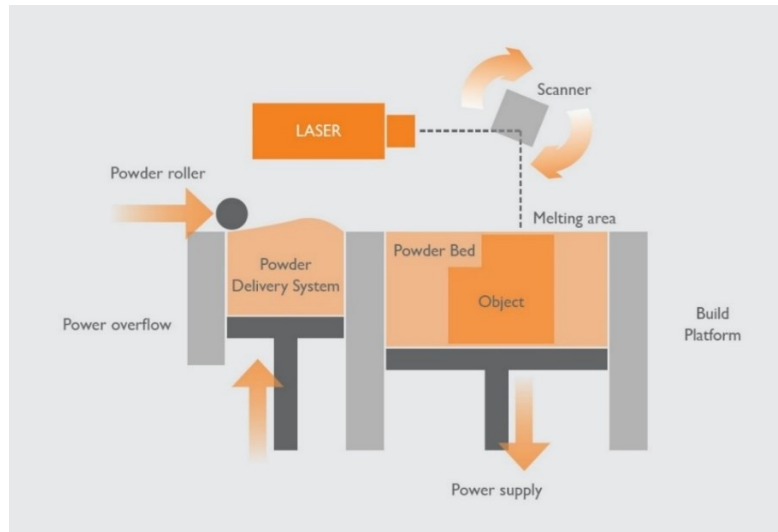


Figura 2.8 - Schema della tecnologia Powder bed fusion

2.3.6 Direct Energy Deposition

Questa tipologia di lavorazione va tipicamente ad apportare del materiale a solidi già esistenti. Si possono quindi effettuare riparazioni o aggiunte, di uno o più materiali differenti e si può affiancare a lavorazioni come il taglio laser o la fresatura (come il macchinario mostrato in figura 2.2). In questa tipologia di lavorazione un laser o una sorgente di elettroni aumenta la temperatura locale del punto sul quale bisogna lavorare, generando un bagno fuso in cui si andranno a fondere il filo o la polvere metallica apportati dall'ugello di lavorazione (schema di due sistemi diversi in Figura 2.9). Si creano quindi dei cordoni di saldatura che andranno a formare la geometria desiderata sovrapponendosi fra loro. Il punto di lavorazione viene spesso inondato di gas inerte per evitare ossidazione o altre reazioni del materiale fuso localmente. Date le sue peculiarità questa tecnologia permette un rapido passaggio da un materiale all'altro (basta passare a una diversa polvere

o un filo metallico con diversa composizione) e una elevata velocità di fabbricazione, se confrontata con le altre tecnologie additive. L'apporto di materiale dalle alte proprietà solo in punti strategici permette di risparmiare molto nella creazione di particolari molto prestanti per settori specifici (es. navale, aeronautico e oil & gas).

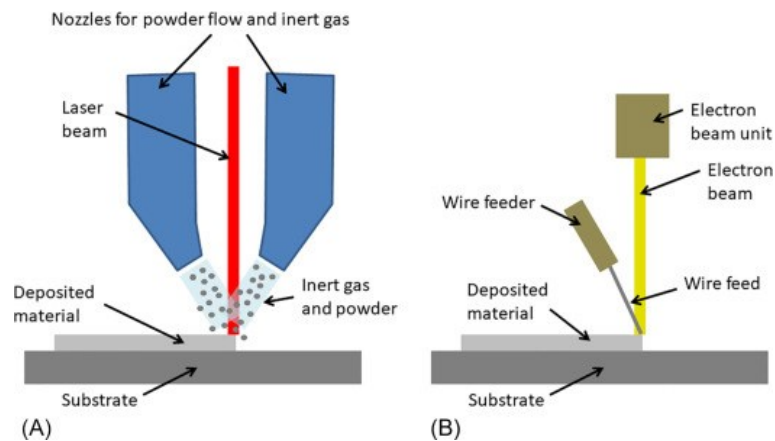


Figura 2.9 - Lo schema di due sistemi DED (A) utilizza il laser assieme al prodotto in polvere e (B) utilizza il fascio di elettroni e la materia prima del filo.

2.3.7 Digital Light Processing

Questa tecnologia si basa sulla solidificazione di strati successivi di polimero fotosensibile liquido e viene considerata appartenente alla tecnologia VAT photopolymerization (stereolitografia). La stereolitografia inizia la polimerizzazione del liquido mediante un laser, quindi la sua definizione è data dalla dimensione del punto laser stesso. La tecnologia Digital Light Processing, invece, inizia la polimerizzazione mediante un proiettore capace di proiettare una immagine nello spazio, di conseguenza la definizione deriverà dalla dimensione dei pixel proiettati ed il singolo strato di materiale polimerico potrà essere solidificato in una unica soluzione. L'accuratezza ottenibile mediante queste tecnologie è estremamente elevata e permette di ottenere superfici molto lisce e ben

definite; con questa tecnologia è inoltre possibile realizzare anche particolari di grandi dimensioni con una velocità di costruzione relativamente elevata.

2.3.8 Liquid Deposition Modeling

Questa particolare tecnologia permette di ottenere manufatti additivi di ceramica, argilla e altri materiali fluido densi, un cilindro ad aria compressa infatti attraverso una vite senza fine permette di estrarre attraverso un ugello della ceramica andando a depositare i vari layer come nella tecnologia FFF. Ovviamente esistono grosse limitazioni sulle geometrie ottenibili date dai collassi che possono avvenire prima della completa essiccazione. Questo genere di lavorazione è per ora più sperimentale e artistica, infatti sono molti gli artisti che si dedicano a questo genere di “scultura”.

2.4 Acciaio 316L processato con tecnologie additive

Trattando le tecniche di additive manufacturing, si ha a che fare con costi di produzione notevolmente più alti rispetto alle tecnologie standard, sia per la gestione del processo sia per la natura delle leghe metalliche di partenza che si trovano usualmente sotto forma di polvere micrometrica pre-legata. Nei processi di additive manufacturing di materiali metallici a base ferrosa, vi è la necessità di limitare il contenuto di carbonio, necessità legata al voler limitare al minimo il fenomeno della formazione di carburi a seguito delle alte temperature nella zona di fusione. Una caratteristica importante degli acciai destinati ad essere lavorati con tecniche di additive manufacturing è la loro buona saldabilità, in quanto essendo il processo di fusione e raffreddamento molto rapido, si ha uno shock termico con conseguenti tensioni indotte elevate. L'acciaio inossidabile 316L risponde bene ai requisiti richiesti; negli ultimi anni è stato infatti uno dei materiali più utilizzati e

studiati nell'ambito delle tecnologie di AM. L'impiego di diversi metodi di produzione comporta delle forti differenze sulla microstruttura e quindi sulle proprietà fisiche e meccaniche dei componenti realizzati.

2.4.1 Microstruttura

La microstruttura delle leghe metalliche prodotte per SLM (Selective Laser Melting, fusione laser selettiva di metalli) è una diretta conseguenza delle condizioni di solidificazione assunte durante il processo. Si calcola che il volume di un cubo di lato 10 mm di metallo prodotto con tecnologia a letto di polvere, sia costituito da un insieme di microscopici cordoni di saldatura che cumulano una lunghezza totale di circa 300 metri. Le immagini a bassi ingrandimenti mettono in evidenza le traiettorie relative alle singole tracce di rifusione parzialmente sovrapposte, necessarie per generare un volume omogeneo di materiale. Seguono due ingrandimenti (Figura 2.10), rispettivamente a 50 e 100 μm , di un acciaio inossidabile 316L.

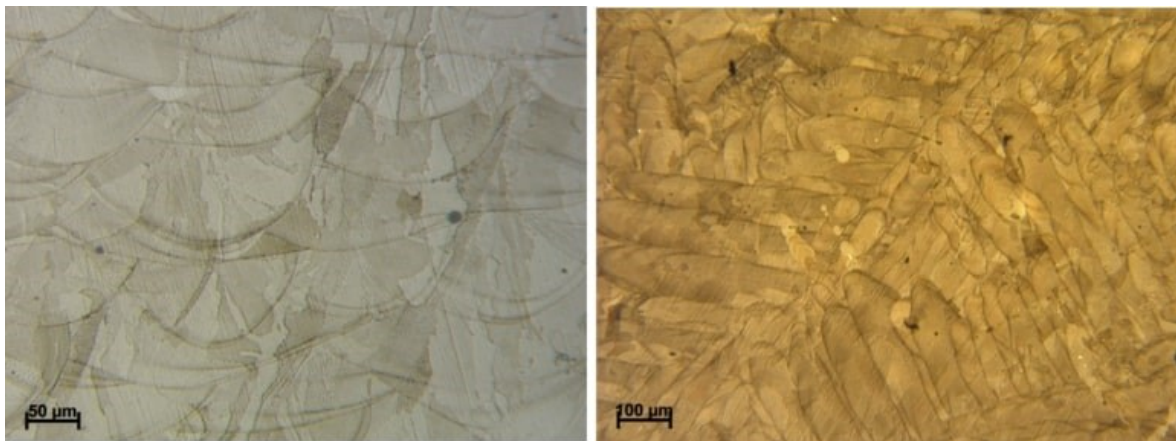


Figura 2.10 - Esempio di tracce prodotte su un acciaio inox AISI 316L

Osservazioni su una scala più piccola (ingrandimento 5 μm , figura 2.11) rivelano invece una struttura molto fine, indotta dalle rapide condizioni di solidificazione e raffreddamento. Pur considerando che la microstruttura ottenibile dipenderà dalla specifica lega utilizzata e dai parametri di processo prescelti, le caratteristiche generali dei materiali tendono a mostrare dei grani cristallini ultrafini, spesso con celle di dimensioni inferiori al micron, e dispersioni di eventuali seconde fasi altrettanto fini ed omogenee.

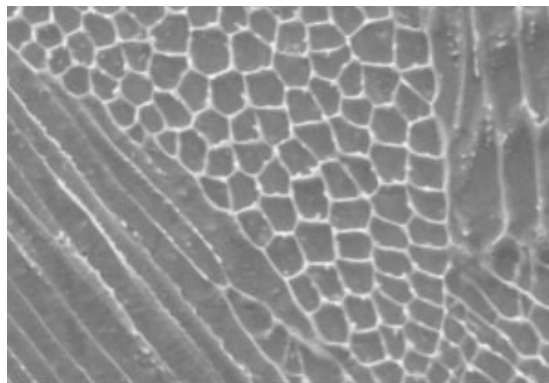


Figura 2.11 - Immagine della struttura a cellule submicroscopiche, generata con la solidificazione dopo processo a letto di polveri di un acciaio AISI 316L

2.4.2 Proprietà meccaniche

Per l'analisi delle proprietà meccaniche, si studia un acciaio inossidabile austenitico AISI 316L, processato mediante la tecnologia SLM di Additive Manufacturing, caratterizzato principalmente da una buona resistenza alla corrosione. Questa lega trova numerose applicazioni in oggetti di uso comune (orologi, gioielli, montature per occhiali), settore automotive (materiali comuni non corrosivi, alimentari, impianti chimici), settore aerospaziale (parti di montaggio, staffe, scambiatori di calore). Le parti costruite in acciaio inossidabile 316L possono essere lavorate, pallinate e lucidate in versioni non trattate (As

built) e in versioni trattate termicamente (Heat treated, Norma AMS2759), se richiesto. La ricottura in soluzione non è necessaria, per via delle proprietà meccaniche della versione non trattata, che dimostrano i valori desiderati (Standard ASTM A403). Dal punto di vista termico, i componenti di acciaio 316L non sono adatti in un intervallo specifico di temperatura 427°C - 816°C, poiché si verificano precipitazioni di carburi di cromo. In Tabella 2.1 sono raffigurate le proprietà meccaniche e termiche.

Mechanical Properties			
	Test Method	As Built	Heat Treated
Tensile Strength	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	587 ± 26 MPa	529 ± 8 MPa
Yield Strength (Rp 0.2%)	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	464 ± 26 MPa	330 ± 8 MPa
Elongation at Break	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	40 ± 5%	63 ± 5%
Young's Modulus	-----	167 ± 26 GPa	200 GPa
Hardness	DIN EN ISO 6508-1	20 HRC	20 HRC
Thermal Properties			
Thermal conductivity	ASTM E1461-13	15 ± 2 W/m°C	15 ± 2 W/m°C

Tabella 2.1 - proprietà meccaniche e termiche di acciai 316L fabbricati con SLM

3 Risultati e discussione

3.1 Obiettivo

L'obiettivo della tesi e del lavoro sperimentazione svolto durante il tirocinio è quello di studiare acciai inossidabili, fabbricati con la tecnologia additiva di fusione a letto di polvere; andremo a studiare con precisione un campione di acciaio 316L fabbricato con questa tecnologia, nelle due orientazioni XY e YZ (Z è la direzione di crescita). Prima dell'analisi completa tramite prove di microdurezza Vickers, è stata svolta la preparazione dei campioni.

3.2 Preparazione campioni

Per ottenere il campione di acciaio opportunamente ed ottimamente preparato per effettuare prove di microdurezza, si fa riferimento ad una serie di preparazioni standard, da seguire cautelarmente, per una buona qualità finale.

3.2.1 Scelta del campione e prelievo

Primo passo fondamentale è la scelta del campione; i campioni analizzati in questa tesi sono prelevati da un campione cubico di acciaio inossidabile AISI 316L, processato con la tecnologia powder bed fusion (fusione a letto di polvere). Lo scopo è quello di isolare una zona rappresentativa di quanto si desidera osservare, di una forma idonea che lo renda idoneo ad essere manipolato nelle successive fasi di preparazione. In questo passaggio, sono stati ricavati due campioni dallo stesso cubetto di acciaio, tagliati in modo da mettere in evidenza due direzioni differenti; disponiamo di due superfici orientate, secondo un

sistema di riferimento XY e YX. In questa maniera avremo modo di effettuare la ricerca in una maniera più completa e accurata, per l'acciaio inossidabile in esame. Il piano XY è quello del piatto di costruzione, mentre il piano YZ è quello che individua la direzione di crescita.

3.2.2 Inglobatura

Una volta selezionato il campione di interesse, sarà necessario svolgere un passaggio di inglobatura in resina, per poter eseguire le successive fasi di preparazione con più facilità. Generalmente ci sono più tipi di resine utilizzate; trasparenti, opache e conduttive (se per esempio si intende osservare un provino anche al microscopio elettronico a scansione, SEM). Viene utilizzata una resina fenolica nera, da inserire in uno stampo accuratamente posto attorno al campione, in una macchina inglobatrice (Figura 3.1) per poi serrare il tappo dell'apposito vano. La prima parte del processo prevede un tempo di 7' in cui la resina fonde a 150°C, con una forza (da mantenere costante) tra i 20-25 kN per i primi minuti, che poi si stabilizzerà fino a tempo scaduto. Si procede quindi al raffreddamento del campione, con acqua immessa in un circuito, per un tempo ideale di 5'. Al termine di questa operazione si può prelevare il campione, e si considera terminato il processo di inglobatura. Al termine di questa fase è bene indicare sul retro del campione, con un incisore elettrico, le informazioni principali provino inglobato.



Figura 2.1 - Macchina inglobatrice

3.2.3 Assottigliamento meccanico

Il campione che si vorrà osservare subirà una preparazione superficiale mediante specifiche carte abrasive al carburo di silicio (SiC), di diverse granulometrie. Queste carte sono classificate secondo una normativa internazionale, che assegna ad esse un numero che indica la densità media dei carburi di silicio per inch^2 (mesh). Il numero riportato nella carta abrasiva descrive la densità di SiC; minore sarà la cifra e tanto minore sarà la densità dei carburi di silicio con conseguente maggiore dimensione media dei singoli carburi presenti. Il campione, perciò, andrà pressato su una lappatrice (Figura 3.2) contro le carte abrasive, con l'ausilio di acqua corrente per attenuare fenomeni gravosi di attrito; questa serie di passate con carte diverse (in ordine: 600-1200-2400-4000 grit) consentirà una adeguata levigatura della superficie del campione. Durante questo processo è importante mantenere sempre il campione nella stessa orientazione, saldo e stabile. Nel momento del cambio di carta abrasiva, esso va poi ruotato di 90° , così da visualizzare sulla superficie i graffi e saperli collegare alla granulometria della carta abrasiva attuale o precedente, in base alla loro direzione.



Figura 3.2 – Processo di assottigliamento

3.2.4 Lucidatura

Ultimato il processo di lappatura meccanica, lo step successivo risiede nella lucidatura. Il processo è molto simile al precedente, con un macchinario predisposto appunto alla lucidatura (Figura 3.4); va fatta pressione contro un panno abrasivo e alcol come lubrificante, con l'ulteriore differenza nell'utilizzo di un amalgama contenente particelle di diamante sintetico calibrate in modo da produrre solchi nell'ordine pari a $3-1-0,25 \mu\text{m}$. Questa fase risulta determinante per le osservazioni al microscopio ottico, perché svolgendo con precisione il lavoro si ha l'opportunità di ottenere superfici metalliche esenti da imperfezioni dovute alla preparazione metallografica. Infatti, eventuali solchi di 250 nm ($0,25 \mu\text{m}$) non sono risolvibili dall'occhio umano, neanche al massimo ingrandimento del microscopio ottico.



Figura 3.3 - macchina per la lucidatura

3.2.5 Attacco chimico

L'attacco chimico permette di mettere in risalto dettagli della microstruttura del materiale, attaccando (corrodendo) le discontinuità. In generale gli attacchi chimici sono costituiti da un solvente (alcool metilico o etilico, acqua distillata ecc.) e da uno o più acidi. Lo scopo è di “attaccare” alcuni siti preferenziali (per esempio il confine di grano) in modo da creare un contrasto superficiale, che permetta alla luce riflessa di evidenziare la morfologia dell'elemento in questione. L'attacco effettuato nei campioni in esame è un attacco di tipo elettrochimico, che richiede quindi un contatto elettrochimico con il campione; questo contatto dal punto di vista pratico è fornito da una vite immessa dal retro del campione inglobato attraverso la resina, in modo da venire a contatto posteriormente col campione.

3.3 Metodologie applicate

3.3.1 Microscopia ottica

Per Microscopio Ottico (MO) (Figura 3.4), si intende uno strumento che usa la radiazione ottica (radiazione elettromagnetica che impressiona l'occhio umano) per un duplice scopo: ingrandire e risolvere. In generale si hanno dei limiti di ingrandimento intorno ai 1000-2000x (1800 ca.) dovuti alla lunghezza d'onda della luce visibile. Il MO tratta di una composizione di lenti:

- Prima lente (*obiettivo*): posta davanti all'oggetto abbastanza vicina al fuoco
- Seconda lente (*oculare*): posta ad una distanza tale per cui il fuoco coincide con l'immagine dell'oggetto

L'immagine creata dalla prima lente diventa l'oggetto della seconda lente. Ciò mi permette di vedere i costituenti di una lega quando, dopo lappatura, lucidatura e generalmente dopo un attacco chimico, i costituenti stessi del campione si differenziano per il colore, oppure quando ci sia un altorilievo, con conseguente effetto di luce e di ombra, o anche quando la superficie del campione sia costituita da tanti piccoli piani (le facce dei cristalli, o grani) diversamente orientati e che quindi riflettono in misura diversa la luce nell'obiettivo del microscopio.



Figura 3,4 - Microscopio ottico metallografico invertito

3.3.2 Prova di microdurezza Vickers

Per la metallurgia si definisce la durezza, come la resistenza alla penetrazione di un materiale, è può essere testata con varie tipologie di prove ed indentatori: la metodologia applicata nel caso in esame consiste in una indentazione di tipo statico, ovvero la prova Vickers. Essa ha come scopo quello di ottenere un indice convenzionale dal quale trarre informazioni sulla qualità e sulle proprietà del materiale, di cui la definizione è una proprietà convenzionale del materiale stesso, dipendente dal metodo utilizzato. I test di durezza vengono eseguiti molto più frequente rispetto a qualsiasi altro test meccanico poiché si tratta di test semplici da eseguire ed economici (non necessitano di campioni particolari), non sono test distruttivi (il campione non viene fratturato né eccessivamente deformato) e posso stimare da essi anche altre proprietà meccaniche (per esempio la

resistenza alla trazione). Nello specifico, viene trattata la prova di microdurezza interessante un piccolissimo volume di materiale (l'impronta risulta visibile solo con un forte ingrandimento, carichi applicati inferiori a 1N, differenziazione in base alla forma del penetratore). Come già anticipato, si parla di microdurezza quando la durezza è stata rilevata con carichi di prova molto bassi ($F \leq 9,8 \text{ N} = 1000 \text{ gF}$). Il valore della microdurezza aumenterà col diminuire del carico applicato, secondo una legge da individuare caso per caso (comportamento elasto-plastico del materiale). La macchina di prova è un microdurometro equipaggiato con un microscopio ottico (per ricercare la zona da saggiare e per misurare l'impronta), e un dispositivo per l'applicazione del carico (va eseguita l'impronta nel punto selezionato, adottando carichi esatti in modo corretto e ripetendo con velocità di applicazione del carico regolabile con continuità) (Figura 3.5). È molto importante l'assenza di urti e vibrazioni durante la prova, per evitare spostamenti che, seppur impercettibili, andrebbero a disturbare la zona studiata. Il pezzo viene preparato appositamente (seguendo tutte le fasi elencate nei capitoli precedenti) e deve essere liscio, piano, privo di materiali estranei ed esente da alterazioni dovute a riscaldamenti e incrudimenti.

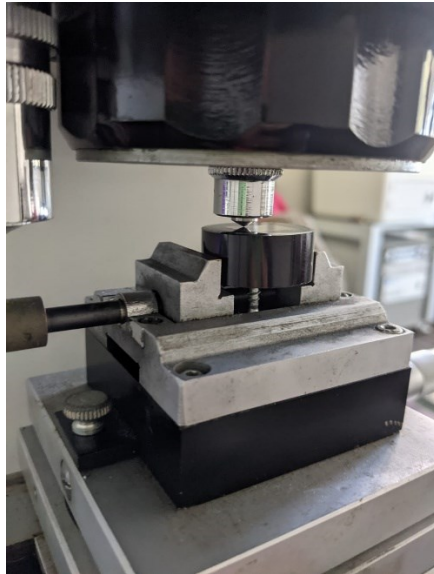


Figura 3.5 - Microdurometro in azione su campione di acciaio AISI 316L

Nel dettaglio, la prova di durezza Vickers, definita dalla norma UNI EN 6507, consiste nel premere con un certo carico F (carico di prova, espresso in N) un penetratore di diamante, a forma di piramide retta a base quadrata con un angolo tra le facce opposte al vertice di 136° , contro la superficie del pezzo in prova e nel misurare la diagonale media d dell'impronta lasciata sulla superficie dopo la rimozione della forza F (Figura 3.6).

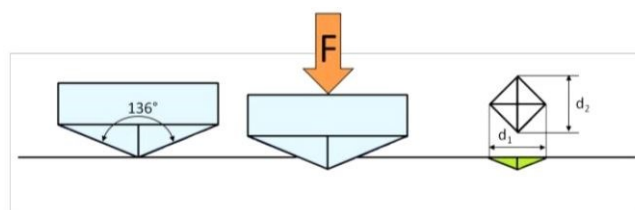


Figura 3.6 - Schema della prova Vickers

La durezza Vickers è proporzionale al rapporto tra il carico di prova e la superficie dell'impronta (F in Newton, S in mm^2), secondo la seguente formula:

$$HV = 1,8544 F/d^2 \cdot 0,102 = 0,189 F/d^2$$

Il metodo Vickers estende e perfeziona un'altra prova, la Brinell, in quanto ha un campo di applicazione illimitato sia per la durezza che per lo spessore del pezzo da provare senza la necessità di cambiare il penetratore, con la sola modifica del carico di prova. Generalmente il penetratore viene premuto sul materiale con un carico F gradualmente crescente, in un tempo variabile tra 2 e 10 secondi e mantenuto per 10-15 secondi. Una volta rimosso il carico si visualizza su un apposito schermo l'impronta (che avrà una forma quadrata) e si misurano le lunghezze delle due diagonali, la cui media aritmetica viene impiegata per il calcolo della superficie S dell'impronta. La distanza tra impronta e impronta (o tra impronta e bordo) deve sempre essere almeno pari a 4d (usando il d maggiore).

3.4 Campioni analizzati

3.4.1 Acciaio AISI 316L: orientazione YZ

Come prima fase, dell'effettiva analisi dei campioni, saranno eseguite una serie di prove di microdurezza Vickers. Il protagonista dell'analisi è un campione di acciaio AISI 316L, processato con la tecnologia di fusione a letto di polvere, già attaccato chimicamente. Come già accennato nei capitoli precedenti, abbiamo pronti due campioni con orientazione differente; partiamo con la ricerca sul campione con orientazione YZ. La prova si svolge con un microdurometro, tarato con 500 gf (1000 gf = 9,807 N) ed un tempo di penetrazione costante di 10 secondi. Lo scopo è quello di eseguire più prove a diverse altezze di crescita (direzione Z) al campione per stimare dei valori durezza, perciò sono state eseguite 3 serie di 20 penetrazioni, in modo da coprire sostanzialmente tutta la sezione del campione. Per

ogni processo di penetrazione, una volta risistemata la slitta micrometrica su cui è fisato il campione in posizione di partenza, si va a calcolare la lunghezza delle diagonali dell'impronta per poi servirsi della media di esse. Attraverso la funzione descritta nel paragrafo precedente (inserendo anche il valore della forza), si ottiene il valore di durezza desiderato. Una volta terminato il processo e trascritti tutti i valori, è possibile osservare nella Figura 3.7 l'esito grafico della prova: la colorazione indica le misurazioni eseguite in uno dei tre tratti caratterizzanti, con la relativa linea di andamento medio, l'asse delle ascisse indica la posizione e l'asse delle ordinate presenta il valore di durezza HV (Hardness Vickers). Vengono successivamente mostrati i grafici delle singole zone, evidenziando con linee spezzate l'andamento della durezza in relazione alla posizione (Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10).

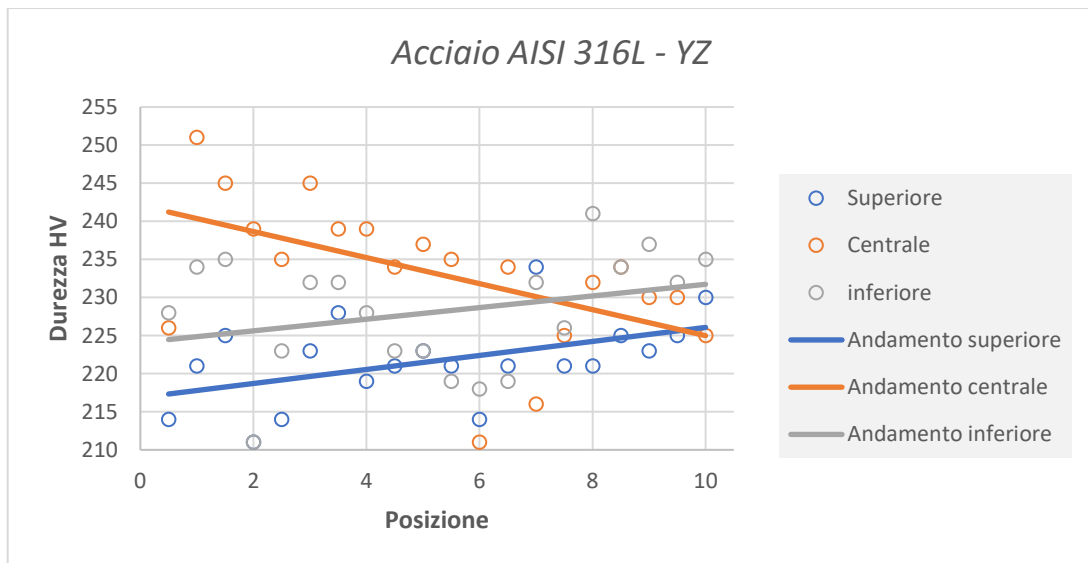


Figura 3.7 - Andamento delle durezza: campione di acciaio AISI 316L con orientazione YZ

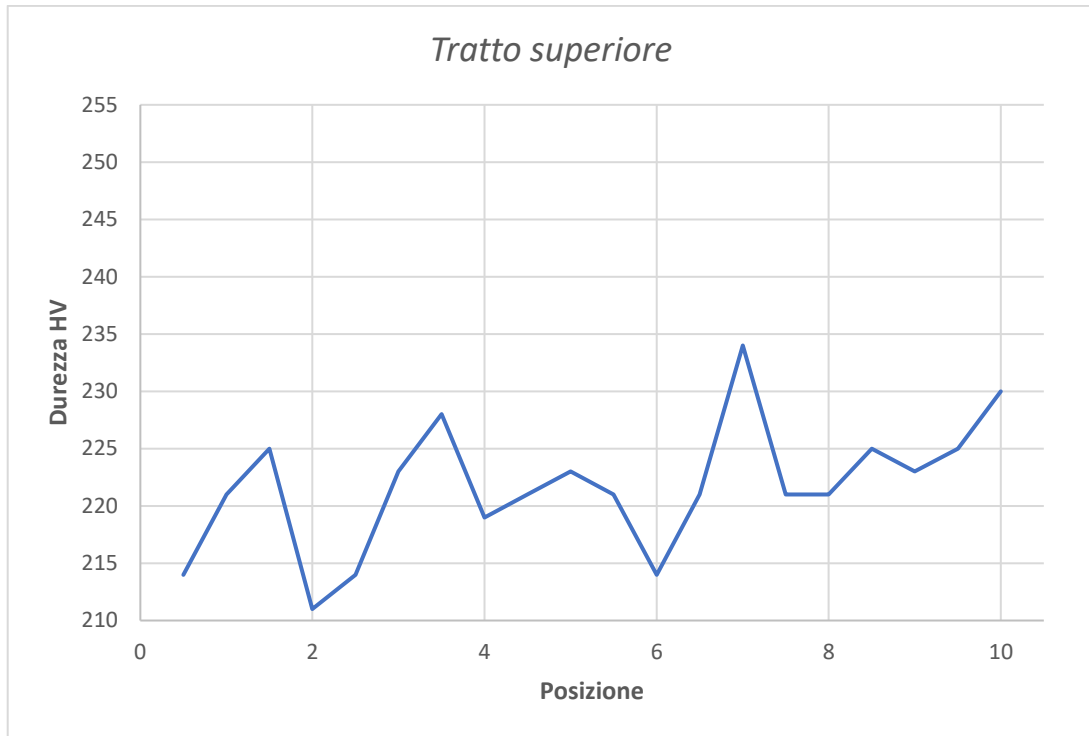


Figura 3.8 - Andamento della durezza del tratto superiore

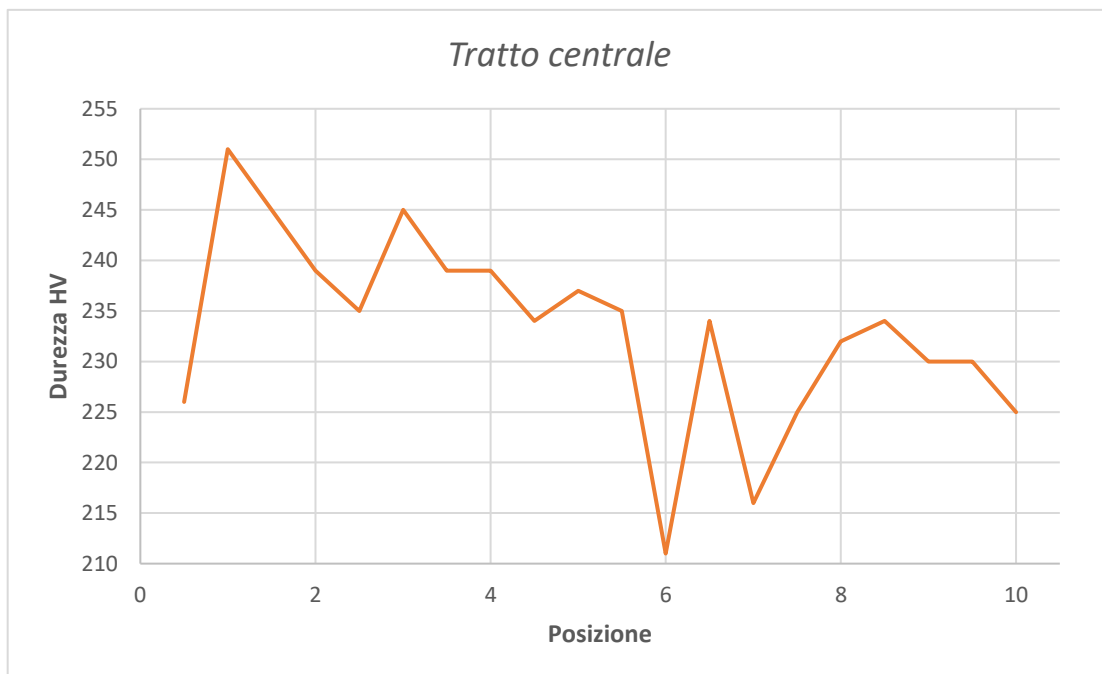


Figura 3.9 - Andamento della durezza del tratto centrale

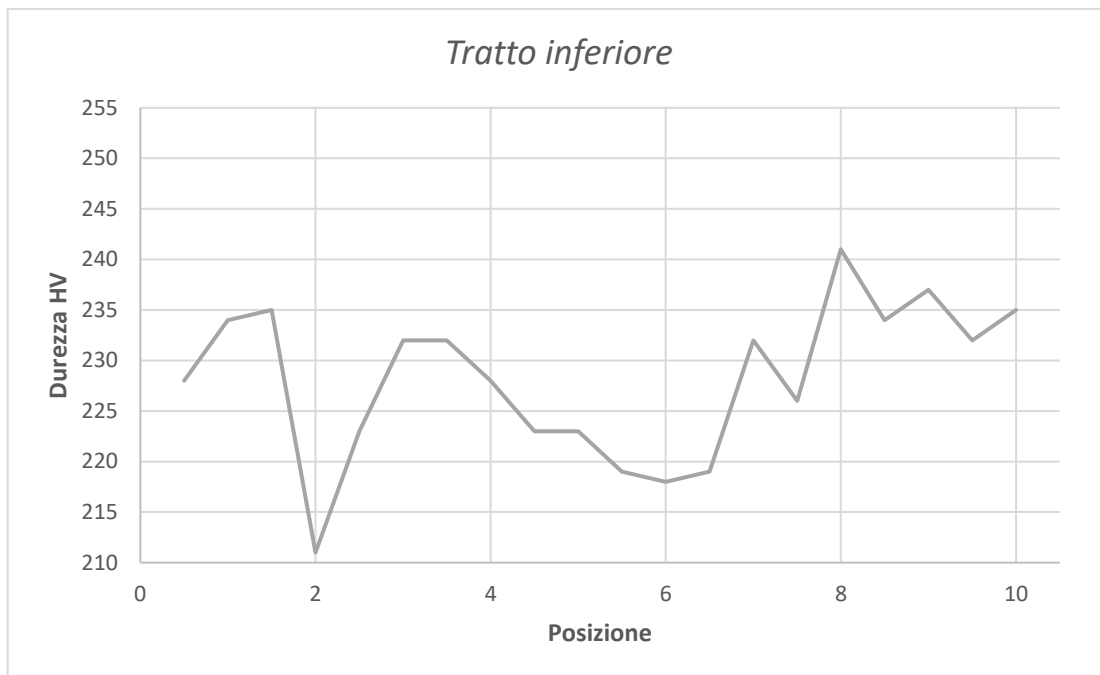


Figura 3.10 - Andamento della durezza del tratto inferiore

3.4.2 Acciaio AISI 316L: orientazione XY

Lo step successivo consiste nella medesima metodologia di analisi svolta, ma da effettuare sul campione di acciaio inox 316L con orientazione XY. Viene ripetuta la prova eseguendo 3 serie da 20 penetrazioni (500 gf /10 secondi), ottenendo i risultati mostrati nella Figura 3.11:

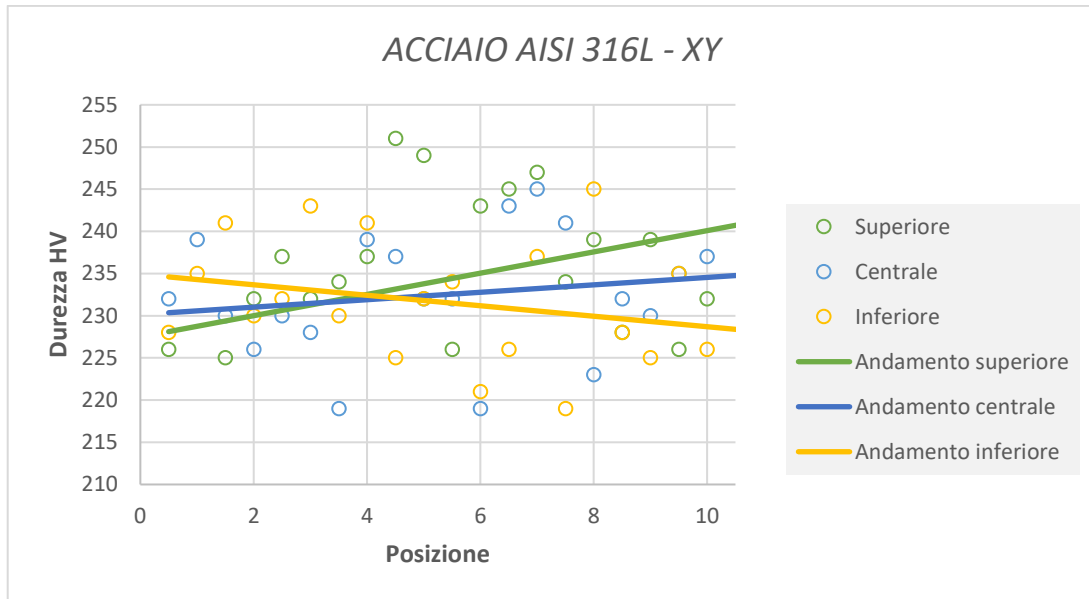


Figura 3.11 - Andamento delle durezza: campione di acciaio AISI 316L con orientazione XY

Come per l'analisi del precedente campione, risultano chiari e distinti gli andamenti delle durezza nei vari tratti, con le colorazioni specificate nella legenda.

3.4.3 Pozza fusa

Lo studio procede con l'analisi di una singola pozza fusa (Figura 3.12 (A)), che si riesce a delineare solamente nel campione di acciaio AISI 316L - YZ. Una volta isolata una pozza fusa, prima di iniziare le penetrazioni, si programma il microdurometro a 25 gf, mantenendo i 10 secondi di durata. Questo per necessità, dato che per la pozza fusa si ha bisogno di un solco di dimensioni minori rispetto alle misurazioni effettuate nelle prove precedenti; una minore forza applicata sulla punta piramidale è proporzionale ad una minore pressione, e di conseguenza ad una impronta ridotta. Ovviamente ciò non andrà ad intaccare il calcolo della durezza; come esposto prima, il valore di forza viene direttamente inserito nella funzione.

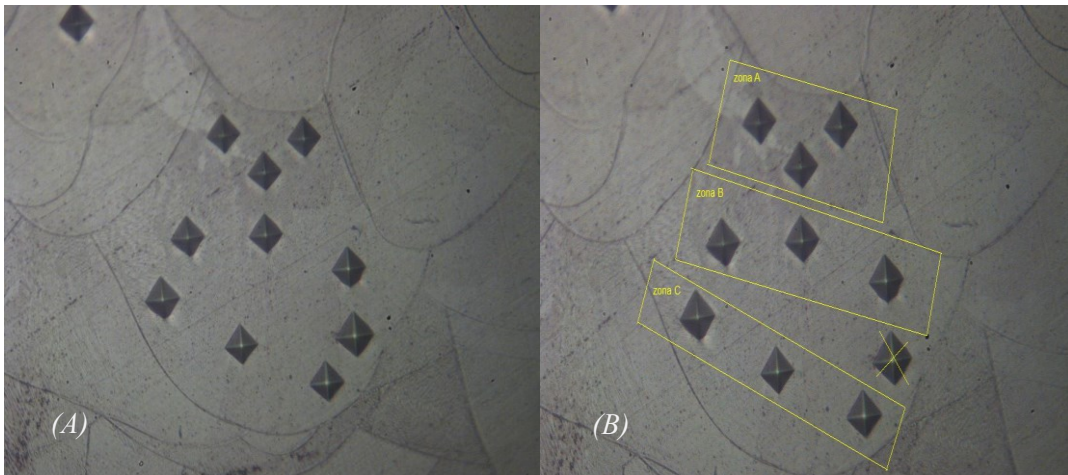


Figura 3.12 - (A) prove svolte sulla pozza fusa, (B) suddivisione della pozza in zone

Effettuate le penetrazioni, delimito la pozza fusa in 3 zone differenti (Figura 3.12 (B)). Analogamente ai processi precedenti, si inseriscono poi le medie delle diagonali, per ottenere i valori di durezza. Lo schema grafico di questa operazione è visibile nella Figura 3.13; qui ritroviamo, per ogni zona, dei valori di durezza, presente sull'asse delle ordinate.

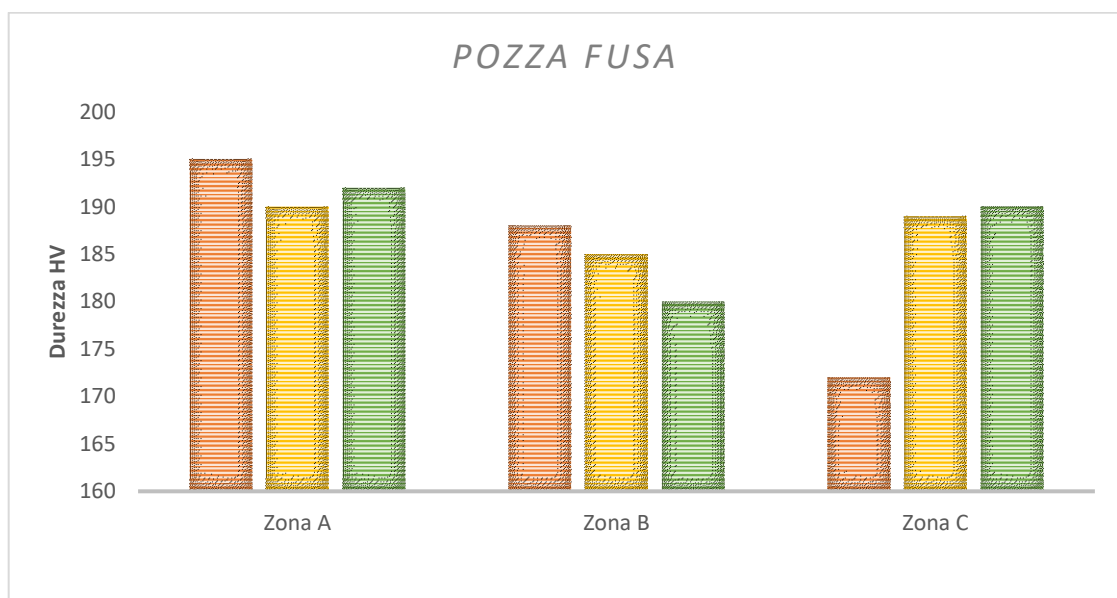


Figura 3.13 - Pozza fusa: prove di durezza su diverse zone

3.4.4 Distribuzione gaussiana

L'ultima parte di studio di campioni di acciaio AISI 316L, consiste nell'analisi di determinate strisciate laser, da individuare nel campione con orientamento XY. Delineata la zona (Figura 3.14 (A)), si procede con le penetrazioni (mantenendo i parametri utilizzati nella prova precedente: 25 gf /10 secondi) secondo una serie di 3 righe parallele in direzione del fascio laser, una centrale e due laterali.

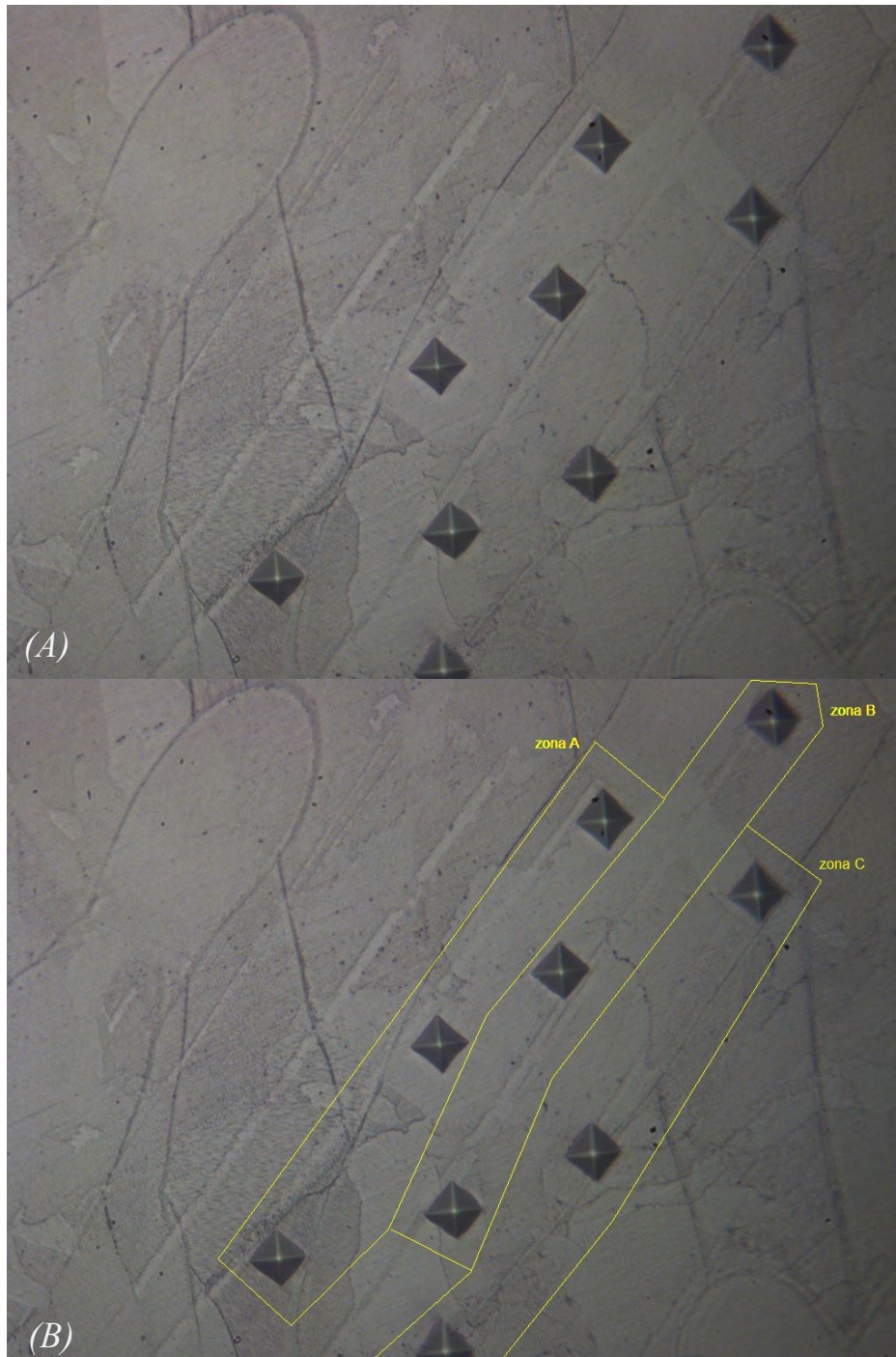


Figura 3.14 - (A) prove in serie lungo la strisciata laser, (B) suddivisione in zone

Terminato il processo e suddivise le misurazioni in zone (Figura 3.14 (B)), per avere indicativamente 3 misurazioni per ognuna di esse, si individua la zona B come la serie

centrale (zona di massima potenza del laser). Raccogliendo i dati mediante la medesima procedura svolta finora si ottengono i risultati mostrati nella Figura 3.15. La colorazione delle righe indica una determinata zona; ciò significa che in ogni terna avremo un confronto delle tre aree specifiche.

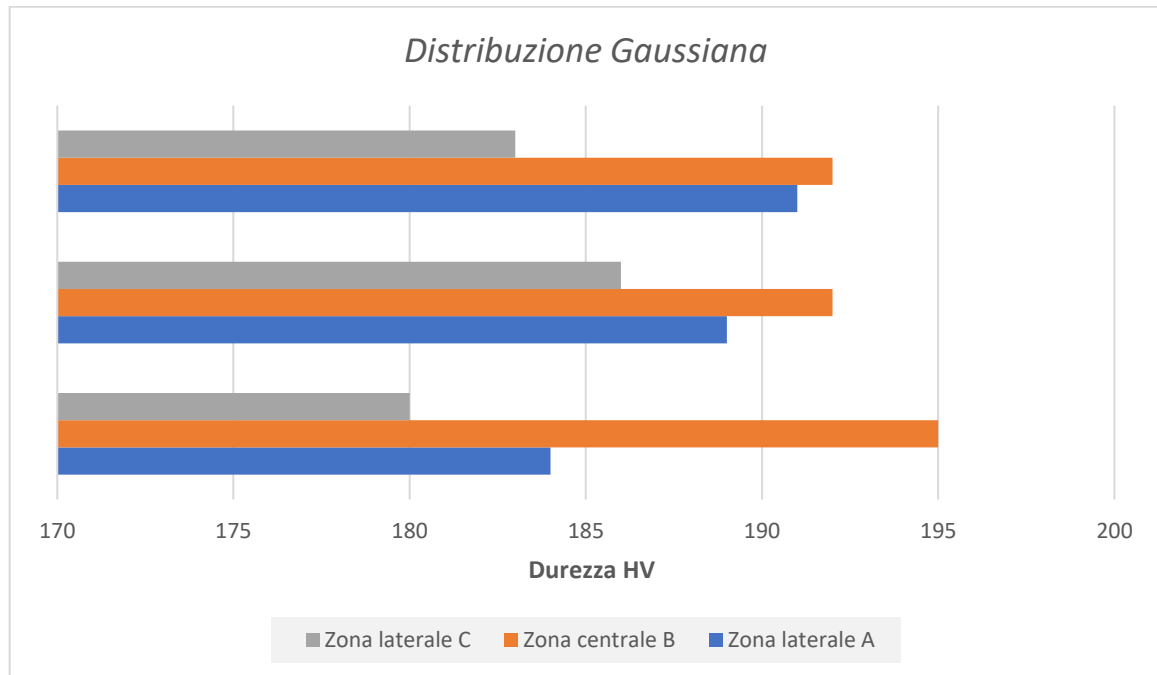


Figura 3.15 - Confronto tra le zone lungo la direzione del laser

3.5 Risultati

Nella prima parte di sperimentazione, abbiamo svolto numerose prove di microdurezza su due campioni di acciaio AISI 316L, orientati secondo un sistema di riferimento YZ (direzione di crescita) e XY (piano di stampa). Per quanto riguarda il primo, abbiamo per la parte superiore un valore medio di 222 HV con deviazione standard 5,62. Per la zona centrale in media 233 HV con deviazione standard 9,51 e per quella inferiore 228 HV con deviazione standard 7,66. Per l'analisi di microdurezza del secondo campione abbiamo per

la parte superiore un valore medio di 234 HV con deviazione standard 11,31, per la parte centrale 233 HV con valori di deviazione standard 7,27. Infine, per la zona inferiore risulta un valore medio di 232 HV con deviazione standard di 7,24. Una differenziazione tra i risultati può essere giustificata dall'orientazione dei provini stessi; a seconda dell'angolazione sono presenti diversi livelli di durezza caratterizzati dal raggio laser, che colpendo il campione con intensità di energia diverse va causando livelli discordanti di durezza, tra una superficie ortogonale all'altra.

Nell'indagine della pozza fusa, appartenente al campione con orientazione YZ, sono emersi i seguenti risultati: per la zona A abbiamo un livello medio di durezza di 192 HV con deviazione 2,52, per la zona B un livello medio di 184 HV con deviazione standard 4,04 e infine per la zona C il livello di durezza di 184 HV, con deviazione standard 10,12. Risulta facile notare come seppur questi valori siano abbastanza lontani a livello numerico rispetto le misurazioni eseguite su tutta la superficie dei due campioni, essi presentano livelli di durezza concordanti tra loro.

Nell'ultima prova pratica svolta si sono determinate tre zone distinte, dirette lungo la strisciata laser presente nel campione XY. Questa classificazione ci consente, analizzando l'apposita figura, di notare la particolare conformazione della zona centrale B. Essa risulta nel confronto con le zone laterali quella con valori di durezza più elevati, in tutti e tre i casi. Questo risultato è associabile alla distribuzione Gaussiana: nella teoria della probabilità, si tratta di una distribuzione di probabilità continua che è spesso usata come prima approssimazione per descrivere variabili casuali a valori reali che tendono a concentrarsi attorno a un singolo valor medio. Il grafico della funzione di densità di

probabilità associata è simmetrico e ha una forma a campana, nota come campana di Gauss.

Conclusioni

Come già espresso in precedenza, lo studio è incentrato sull'analisi, tramite prove di microdurezza, di campioni preparati e processati in laboratorio di acciai inossidabili, fabbricati con una delle tecnologie di Additive Manufacturing, la fusione a letto di polvere (Powder bed fusion) con sorgente laser. In particolare, lo studio è incentrato su un campione cubico di acciaio inossidabile AISI 316L di cui sono state prese due orientazioni diverse. L'obiettivo finale, perseguito in ogni passaggio dell'indagine, è stato quello di evidenziare le differenze tra i campioni, in base alla metodologia utilizzata, data l'ortogonalità tra di essi: ciò ha permesso di prendere coscienza della tridimensionalità di questi materiali e delle conseguenze che ne seguono. Queste caratteristiche sono state evidenziate dalla prova di microdurezza Vickers (una delle più importanti tecniche per stabilire la durezza dei materiali insieme alle prove Brinell e Rockwell), che ha consentito la realizzazione di schemi di durezza su particolari sezioni sui campioni, testando le caratteristiche meccaniche tra le diverse direzioni, a scale compatibili con la microstruttura del corpo materiale preso in esame. Alcuni degli ostacoli principali all'adozione diffusa della produzione additiva in metallo (Additive Manufacturing), sono la persistente formazione di difetti nei componenti costruiti, i costi elevati dei materiali e la mancanza di consistenza nelle materie prime in polvere. Per generare parti metalliche più affidabili e di forma complessa, è fondamentale capire l'evolversi delle materie prime con il riutilizzo e come ciò influisce sulle prestazioni meccaniche della costruzione. Le minuscole particelle

di polvere che interagiscono con la fonte di energia, ma non consolidate in una parte AM, possono subire una serie di sviluppi termici dinamici, con conseguente comportamento variabile delle particelle, se riutilizzate. La lega di acciaio inossidabile austenitico 316L, come discusso nel primo capitolo, è un materiale che combina un'eccezionale resistenza alla corrosione, duttilità e biocompatibilità, con promettenti applicazioni strutturali e usi biomedici. Tuttavia, l'acciaio 316L ha una bassa resistenza all'usura, limitando la sua applicabilità ad alte prestazioni. La soluzione si ritrova nell'aggiunta di rinforzi secondari microscopici, migliorando le prestazioni e quindi l'applicabilità del 316L. Ciononostante, questi supporti non possono essere facilmente ottenuti, poiché di geometria molto complessa. Si potrebbe porre rimedio attraverso la produzione additiva, generando deposizione strato per strato utilizzando i dati di progettazione assistita dal computer. Per espandere la domanda industriale, quindi, è necessario espandere la gamma di materiali applicabili alla manifattura additiva.

Dal punto di vista pratico, in questa tesi, oltre all'analisi del materiale questione, è stata affrontata anche la particolarità della distribuzione gaussiana della sorgente ad alta energia; il caso ha riguardato l'intensità di emissione della potenza del laser. Questo effetto è stato indagato tramite prove di microdurezza, che hanno testimoniato come i risultati di dell'indagine siano influenzati da questo fenomeno.

In conclusione, si può affermare che le prove di microdurezza presentano un livello di precisione molto elevato, in grado di mettere in risalto le differenze sistematiche tra i provini studiati e le diverse impostazioni fornite al macchinario, nonché una precisa caratterizzazione dei campioni esaminati.

Ringraziamenti

Eccomi giunto alla fine di questo elaborato, che sancisce la conclusione di questo percorso universitario, all'interno del quale credo di essere maturato sia come studente ma anche e soprattutto come uomo, superando ostacoli e difficoltà che spesso sembravano impossibili da vincere. Vorrei dedicare quest'ultima pagina per ringraziare le persone che hanno creduto in me, sostenendomi costantemente, nei momenti felici ma soprattutto nei momenti di difficoltà. Principalmente ringrazio la mia famiglia, per essermi stata accanto e avermi supportato in tutte le scelte prese, fornendomi sostegno in questi anni, sotto tutti i punti di vista. Senza di loro non sarei mai riuscito a completare questo grande obiettivo. Grazie mamma Patrizia, per essere presente per qualsiasi cosa, per dare sempre una mano a tutti. Grazie papa Gianni, un esempio per me, che con i tuoi consigli mi hai aiutato e mi aiuterai sempre ad avere la soluzione per ogni problema. Grazie a mio fratello Lorenzo, compagno, amico, certezza e spalla, che insieme a Giada mi hanno donato uno dei regali più belli che avessi mai potuto desiderare, quella meraviglia di mio nipote Leonardo. Grazie a mia nonna Loretta, tutti i miei cugini, zii, vicini e non, a cui sono molto legato. Grazie alla mia ragazza, Sara, che mi ha sempre sostenuto con amore, enorme supporto e fiducia, riuscendo a trasformare ogni istante in qualcosa di speciale. Un grazie a tutti i miei amici, di cui potrei scrivere all'infinito tutti i nomi e raccontare di quanto sia stato ognuno di essi fondamentale per me, che mi hanno dimostrato sempre il loro sostegno. Un ringraziamento particolare va alla mia relatrice, la professoressa E. Santecchia, sempre disponibile e cordiale, fornendomi tutto il necessario per arrivare alla conclusione di questo elaborato.

Un grazie di cuore a tutti.

Sitografia e Bibliografia

- Acciai Terni. (s.d.). *304.indd*. Tratto da Acciai Terni: <https://www.acciaiterni.it/wp-content/uploads/2018/02/304.pdf>
- Acciai Terni. (s.d.). *316.indd*. Tratto da Acciai Terni: <https://www.acciaiterni.it/wp-content/uploads/2018/02/316.pdf>
- addmelab.polimi. (s.d.). *Microstruttura - creative metal 3D printing*. Tratto da addmelab.polimi: <http://www.addmelab.polimi.it/stampare-in-metallo/la-tecnologia-slm/materiali/microstruttura/>
- astrati. (s.d.). *6 idee sbagliate (e fuorvianti) sulla stampa 3D*. Tratto da astrati: <https://astratiblog.wordpress.com/2017/04/20/6-idee-sbagliate-e-forvianti-sulla-stampa-3d/>
- Candeli, A. (s.d.). *Additive Manufacturing, nuova ricerca sulle proprietà delle polveri*. Tratto da Ecor-international magazine: <https://magazine.ecor-international.com/it/additive-manufacturing-nuova-ricerca-sulle-proprietà-delle-polveri/>
- Capelli, F. (s.d.). *Gli acciai inossidabili: tipologie e caratteristiche. Inox convenzionali e di nuova generazione*. Tratto da Centro Inox: <http://www.centroinox.it/sites/default/files/pubblicazioni/209A.pdf>
- Condor S.r.l. (s.d.). *Prodotti in Acciaio inox*. Tratto da Condor S.r.l.: <https://condorinox.com/it/prodotti-acciaio-inox>
- De Agostini. (s.d.). *Metallurgia*. Tratto da Sito Web Sapere.it: <https://www.sapere.it/enciclopedia/metallurg%C3%ACa.html#:~:text=L'importanz a%20dei%20materiali%20metallici,a%20partire%20dall'era%20postneolitica.>
- DMG Mori. (s.d.). *la produzione additiva rivoluziona la lavorazione del metallo*. Tratto da DMG Mori: <https://it.dmgmori.com/novita-e-media/magazine/technology-excellence-01-2018/additive-manufacturing>
- DMG MORI. (s.d.). *LASERTEC 65 DED hybrid*. Tratto da DMG MORI: <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-65-ded-hybrid>

- Innopowder. (s.d.). *High-quality and cost effective metal AM powder for manufacturing lower weight components with improved properties for aircrafts and automobiles.* Tratto da innopowder: <http://innopowder.innomaq21.com/>
- Lamandini, L. (s.d.). *Differenza tra acciaio inox 304 e 316.* Tratto da Carpentiere Vincente: <https://carpentierevincente.it/materiali/differenza-tra-acciaio-inox-304-e-316/>
- Leica-microsystems.com. (s.d.). *microscopi ottici | Prodotti | Leica microsystems.* Tratto da Leica-microsystems.com: <https://www.leica-microsystems.com/it/prodotti/microscopi-ottici/>
- MaterialsScience2000. (s.d.). *Metallography Part II - Microscopic Techniques.* Tratto da Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=UuHofNW40Yw&t=322s>
- Milana, S. (s.d.). *Additive manufacturing, da scommessa a realtà produttiva consolidata.* Tratto da Meccanica news: <https://www.meccanicaneews.com/2020/02/05/additive-manufacturing-da-scommessa-a-realta-produttiva-consolidata/>
- Multifaber. (s.d.). *Additive manufacturing e finitura superficiale.* Tratto da Multifaber: <https://www.multifaber.com/additive-manufacturing-finitura/>
- New Welding. (2019, Dicembre 4). *Saldare acciaio inox: una procedura sempre possibile?* Tratto da New Welding: <https://www.ns-newwelding.com/saldatura-metalli/saldare-acciaio-inox/#:~:text=La%20composizione%20chimica%20dell'acciaio,-La%20composizione%20chimica&text=Fino%20al%20contenuto%20dello%20,come%20garanzia%20del%20lavoro%20finito.>
- Prima Additive. (s.d.). *Il processo Powder Bed Fusion.* Tratto da Prima Additive: <https://www.primaadditive.com/it/il-processo-powder-bed-fusion/>
- Progemec. (s.d.). *Progettazione Meccanica 3D, il ruolo del CAD nell'Industry 4.0.* Tratto da Progemec: <https://www.progemec.com/progettazione-meccanica-3d-cad-industry-4-0/>
- Puzello, F. (s.d.). *Additive Manufacturing e stampa 3d: definizione ed esempi.* Tratto da 3D4growth: <https://3d4growth.com/additive-manufacturing/#:~:text=Additive%20manufacturing%3A%20le%20tecnologie%20di%20stampa%203d,-Ci%20sono%20centinaia&text=Alla%20base%20del%20funzionamento%20rimane,estrati%20orizzontali%20di%20materia%20prima.>

- Rivolta, D. B. (s.d.). *Preparazione metallografica*. Tratto da metallurgia.lecco.polimi: http://www.metallurgia.lecco.polimi.it/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=64&Itemid=143
- Sonato, A. (s.d.). *Stampa 3D: è il momento di pensare al “replicatore” di Star Trek*. Tratto da ilbolive.unipd: <https://ilbolive.unipd.it/it/news/stampa-3d-momento-pensare-replicatore-star-trek>
- spectrographic Ltd. (s.d.). *Struers Labopress 3-*. Tratto da Spectographic Ltd.: <https://spectrographic.co.uk/products/struers-labopress-3>
- Struers. (s.d.). *uow155164.pdf*. Tratto da Struers: <https://documents.uow.edu.au/content/groups/public/@web/@aiim/documents/doc/uow155164.pdf>
- TREVISAN S.R.L. (s.d.). *Il diagramma ferro carbonio | Trattamenti termici*. Tratto da Trevisan srl: <https://www.trevisan.srl/diagramma-ferro-carbonio/>
- Univpm. (2019-20). Slide del corso "Metodologie metallografiche".
- Wikipedia. (s.d.). *Distribuzione normale*. Tratto da Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Distribuzione_normale
- Wu, J. (s.d.). *Investigation of novel microwave components enabled by additive manufacturing*. Tratto da Researchgate: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-binder-jetting-process-26_fig1_327930461
- Yeong, W. Y. (2020). *Rapid Prototyping of Biomaterials (Second Edition)*. Roger Narayan.
- Zare.it. (s.d.). *Sinterizzazione metalli DMLS/SLM*. Tratto da Zare.it: https://www.zare.it/sites/default/files/manuals/DMLS-SLM-StainlessSteel-AISI316L_2.pdf