



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Valutazione dei parametri di processo
nella fabbricazione di rivestimenti in
lega di nichel tramite
Directed Energy Deposition (DED)**

**Evaluation of process parameters
in the fabrication of nickel alloy
coatings using
Directed Energy Deposition (DED)**

**Relatore: Prof.
Eleonora Santecchia**

**Tesi di Laurea di:
Andrea Guglielmi**

A.A. 2025/2026

Indice

ELENCO DELLE TABELLE.....	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....	7
1.1 Il paradigma dell’Additive Manufacturing	7
1.2 La tecnologia Directed Energy Deposition (DED)	9
CAPITOLO 2 MATERIALI UTILIZZATI.....	12
2.1 Caratterizzazione del materiale: Lega Colmonoy 227-F	12
2.2 Caratterizzazione del substrato: Acciaio Austenitico AISI 304.....	13
2.3 Strumenti utilizzati	14
2.3.1 Laserdvne 430	14
2.3.2 DVM6-A Microscopio digitale.....	15
2.3.3 QNESS 60 A evo Microdurometro.....	16
CAPITOLO 3 METODOLOGIA SPERIMENTALE	18
3.1 Fase 1: Acquisizione delle immagini ad alta risoluzione	18
3.2 Fase 2: Mappatura delle scan-track.....	19
3.3 Fase 3: Procedimento ImageJ – EXCEL Analisi Superfice	22
3.4 Fase 4: Preparazione metallografica del campione.....	26
3.5 Fase 5: Analisi mediante microscopio ottico digitale	27
3.6 Fase 6: Valutazione delle proprietà meccaniche locali - Prove di microdurezza	28
CAPITOLO 4 RISULTATI SPERIMENTALI	30
4.1 Analisi dell’indice di distribuzione dei materiali.....	30
4.1.1 Analisi del piano XY	32
4.1.2 Analisi del piano XZ	33
4.1.3 Analisi del piano YZ.....	33
4.2 Rugosità superficiale.....	35
4.3 Valutazione della microdurezza	37
CAPITOLO 5 CONCLUSIONI.....	42
BIBLIOGRAFIA	44

ELENCO DELLE TABELLE

<i>Tabella 1 - Indici MD divisi per piani di sezionamento Double (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 2 - Indici MD divisi per piani di sezionamento Triple (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 3 - Indici Rugosità Sq e Sa Double e Triple</i>	<i>36</i>

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 – Particolare dei sistemi DED con microstruttura, interfacce multiple, ciclaggio termico, difetti e stress residuo [2]	11
Figura 2 - Prima Additive – Laserdyne 430	15
Figura 3 - Leica Microsystems -Microscopio Digitale DVM6-A.....	16
Figura 4 - QATM - Qness 60 A/A+ evo - Microdurometro	17
Figura 5 - Leica Map- (a) Workflow_Leica_Map – ordine logico delle operazioni svolte (b) Estrazione tracce e profili – Double, (c) Estrazione profili – Double, (d) Correzione aberrazioni e modello 3D – Double, (e) Estrazione tracce e profili – Triple, (f) Estrazione profili – Triple, (g) Correzione aberrazioni e modello 3D – Triple	22
Figura 6 - Rappresentazione schematica dell'estrazione del profilo sul piano XY. A sinistra una visualizzazione 3D dell'estrazione della forma nel piano. A destra l'immagine binarizzata analizzata per il calcolo del perimetro. (Fonte: [10]A Novel Approach to Quantitatively Account on Deposition Efficiency by Direct Energy Deposition: Case of Hardfacing-Coated AISI 304 SS)	25
Figura 7 - (a) Rappresentazione schematica dell'estrazione del profilo sui piani XZ e YZ. (b) Illustrazione schematica di un profilo XZ. (c) Rappresentazione schematica di un profilo YZ che presenta <i>Wtj</i> . (Fonte: [10]A Novel Approach to Quantitatively Account on Deposition Efficiency by Direct Energy Deposition: Case of Hardfacing-Coated AISI 304 SS)	25
Figura 8 – Levigatrice e Lucidatrice metallografica a disco rotante.....	27
Figura 9 – schema di acquisizione punti di durezza (traccia Double P900-F600).....	29
Figura 10 - Distribuzione di materiale Double track (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi in Excel)	31
Figura 11 - Distribuzione di materiale Triple track (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi in Excel)	32
Figura 12 - Distribuzione di materiale confronto tra Double e Triple track (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi in Excel)	32

Figura 13 - Indici MD divisi per piani di sezionamento. (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel)	34
Figura 14 - Indici MD divisi per piani di sezionamento. (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel)	34
Figura 15 - grafici rugosità Double.....	36
Figura 16 - grafici rugosità Triple.....	37
Figura 17 - Grafico Hardness Potenza 900W Double.....	38
Figura 18 - Grafico Hardness Potenza 1000W Double.....	39
Figura 19 - Grafico Hardness Potenza 900W Triple.....	39
Figura 20 - Grafico Hardness Potenza 900W Triple.....	40
Figura 21 - Grafico Hardness Double a Confronto.....	40
Figura 22 - Grafico Hardness Triple a Confronto.....	41

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 Il paradigma dell'Additive Manufacturing

Negli ultimi decenni l'Additive Manufacturing (AM), comunemente noto come stampa 3D, ha determinato un radicale mutamento di paradigma nel panorama della produzione industriale.

Questa tecnica consente la creazione di oggetti tridimensionali attraverso l'aggiunta di strati di materiale, contrariamente ai metodi tradizionali di lavorazione sottrattiva.

Tale tecnologia si basa sull'integrazione di processi digitali e modelli tridimensionali generati mediante software di Computer-Aided Design (CAD), i quali permettono una prototipazione rapida e un'ottimizzazione iterativa delle prestazioni del prodotto finale.

Il principio di funzionamento e classificazione che sta alla base di questo processo industriale è che a differenza delle metodologie di lavorazione tradizionale di tipo sottrattivo, basate sulla rimozione selettiva di sovrametallo da un blocco solido tramite utensili, l'AM opera secondo un principio di fabbricazione per deposizione di strati successivi (*layer-by-layer*).

Questa peculiarità tecnologica offre vantaggi distintivi rispetto alle tecniche convenzionali, tra cui:

- La libertà geometrica, cioè la possibilità di realizzare geometrie interne complesse, strutture reticolari (*lattice structures*) e componenti ottimizzati topologicamente, altrimenti non producibili;
- La versatilità materica ovvero la compatibilità con un'ampia gamma di materiali, inclusi polimeri, leghe metalliche e ceramiche;
- L'efficienza delle risorse ossia la riduzione significativa dello sfrido di lavorazione, in quanto il materiale viene depositato esclusivamente dove richiesto dal design nominale, favorendo la sostenibilità ambientale del processo;
- L'ottimizzazione della supply chain vale a dire l'abbattimento dei costi e dei tempi legati alla realizzazione di attrezzature specifiche (stampi e maschere di montaggio), consentendo una produzione *on-demand*.

Nonostante il potenziale innovativo l'Additive Manufacturing ha però delle limitazioni che sono emerse all'adozione dell'AM su scala industriale e che presenta tuttora dei vincoli tecnici critici come la scalabilità dimensionale (vincoli legati al volume di stampa delle macchine) e la produttività ridotta cioè la competitività economica nella produzione di massa su larga scala rispetto allo stampaggio o alla fusione.

Anche la qualità superficiale e le proprietà meccaniche sono due delle principali restrizioni di questa tecnica e vengono descritte rispettivamente come la necessità frequente di post-processi per correggere

rugosità e tolleranze dimensionali e l'anisotropia del componente finale dovuta alla natura stratificata del processo.

Per ovviare a tali criticità la ricerca attuale si sta orientando verso la manifattura ibrida, la quale combina i vantaggi della produzione additiva con i processi sottrattivi e di formatura, garantendo al contempo complessità geometrica e precisione centesimale.

Nonostante tali debolezze, la AM ha però dei punti di forza riconosciuti nella riduzione dei tempi di consegna e nei costi di produzione per creare un manufatto metallico da dati CAD attraverso l'eliminazione del processo secondario.

Inoltre, la ricerca di nuovi processi è aumentata in modo esponenziale negli ultimi decenni anche grazie al fatto che è vantaggioso creare un processo di produzione ibrido che includa i processi MAM con quelli sottrattivi e di formatura.

Dalla metà degli anni '80 si è assistito ad un'evoluzione dei processi di Metal Additive Manufacturing (MAM).

Con il brevetto della Selective Laser Sintering (SLS) depositato da Carl Deckard e Joseph Beaman presso l'Università del Texas nel 1986, il settore ha visto una proliferazione di tecnologie specifiche per il processamento dei metalli (Metal Additive Manufacturing - MAM) [1].

Le principali categorie tassonomiche includono la Powder Bed Fusion (PBF) cioè un processo di fusione a letto di polvere.

Quest'ultima, a sua volta, comprende processi quali [1] [2] [3] [4]:

- Selective Laser Melting (SLM) cioè sinterizzazione laser selettiva, è particolarmente indicata per la produzione di componenti di piccole dimensioni con geometrie estremamente complesse e dettagli molto sottili, tipicamente compresi tra 20 e 60 μm . Garantendo prodotti con una risoluzione migliore rispetto a quelli realizzati con sistemi DED a polvere insufflata. In sintesi, la SLM rappresenta lo standard per la produzione di parti ad alta precisione, con eccellente finitura superficiale e complessità geometrica elevata.
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ossia la sinterizzazione laser diretta dei metalli, che permette di ottenere geometrie complesse e dimensioni minime dei dettagli molto più piccoli rispetto alle produzioni DED ma con una finitura superficiale inferiore. In sintesi, la peculiarità fondamentale della Direct Metal Laser Sintering risiede nel suo equilibrio tra complessità geometrica e precisione dimensionale, posizionandosi come la tecnologia standard per la produzione di piccoli pezzi con dettagli millimetrici e finiture di alta qualità.
- Electron Beam Melting (EBM) la fusione a fascio di elettroni. A differenza di altre tecniche che utilizzano il laser, l'EBM impiega un fascio di elettroni focalizzato come sorgente di energia termica per fondere selettivamente strati di polvere metallica. Come processo PBF, l'EBM è eccellente per la produzione di componenti di piccole dimensioni con geometrie complesse e dettagli molto sottili che richiedono un'alta risoluzione, ma presenta un tasso di deposizione e una densità volumetrica di produzione inferiori rispetto alle tecnologie DED. In sintesi, l'EBM rappresenta la tecnologia di riferimento per la produzione di componenti in

titanio ad alta precisione, trovando il suo impiego ideale in applicazioni biomedicali e aerospaziali.

Le altre principali tecniche utilizzate sono la Directed Energy Deposition (DED) in cui l'energia termica focalizzata viene utilizzata per fondere i materiali mediante fusione durante la deposizione e la Sheet Lamination (SL) basata sulla giunzione di fogli di materiale metallico [1].

L'ampia diffusione di questi processi in settori ad alto valore aggiunto, quali l'aerospaziale, l'automobilistico e il biomedico, testimonia la maturità raggiunta dai sistemi PBF e DED sia nella ricerca accademica che nelle applicazioni industriali avanzate [1].

1.2 La tecnologia Directed Energy Deposition (DED)

La Directed Energy Deposition (DED) rappresenta una classe di processi di Metallurgic Additive Manufacturing (MAM) di primaria rilevanza industriale. Secondo la normativa ASTM F42, la DED è definita come un processo in cui l'energia termica focalizzata viene impiegata per fondere il materiale da apporto simultaneamente alla sua deposizione [1] [2].

A differenza delle tecnologie Powder Bed Fusion (PBF), i sistemi DED non operano su un letto di polvere pre-steso, ma convogliano il materiale d'alimentazione (sotto forma di polvere o filo metallico) direttamente nel bagno di fusione (melt pool) generato da una sorgente energetica, quale un laser, un fascio di elettroni o un arco elettrico [1] [2] [3].(fig)

Questa tecnologia ha una configurazione di sistema peculiare che le conferisce una versatilità operativa superiore rispetto ad altre metodologie MAM.

Tra i principali vantaggi si annoverano [1] [2] [4]:

- Elevata produttività: ovvero la capacità di realizzare componenti di forma semifinita (near-net-shape) di grandi dimensioni con tassi di deposizione massivi, che nei sistemi Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) possono eccedere i 10 kg/h;
- Riparazione e Rigenerazione: ossia l'accessibilità della testa di deposizione che permette interventi di restauro funzionale su componenti ad alto valore aggiunto, quali pale di turbina e stampi industriali, estendendone il ciclo di vita;
- Materiali a Gradiente Funzionale (FGM): cioè mediante i sistemi di alimentazione multiplo è possibile variare in situ la composizione chimica del deposito, permettendo la fabbricazione di strutture multimateriale con proprietà localizzate.

Il controllo dell'integrità strutturale nei processi DED risiede nella calibrazione sinergica delle variabili operative primarie: la potenza della sorgente (P), la velocità di scansione (v) e la portata del materiale ($\dot{m}$) [1] [2] [5]. Per semplificare tale processo si impiegano parametri specifici, tra questi, di grande impatto la densità di energia (E) che quantifica l'apporto termico fornito dalla sorgente (laser, fascio di elettroni o arco) al materiale di apporto e al substrato [1]. Essa determina la stabilità del bacino di fusione

(**melt pool**), la microstruttura finale e l'insorgenza di difetti [1] [3]. La densità di energia viene comunemente misurata in $[J/mm^2]$ tramite la seguente formula [1] [2] [3] [4]:

$$E = \frac{P}{v \cdot d} \quad (1)$$

Dove:

- P è la potenza della sorgente $[J/s]$
- v è la velocità di scansione della testa di deposito $[mm/s]$
- d è il diametro del fascio $[mm]$

A causa della sensibilità della DED al flusso di materiale, la densità di energia da sola non è sempre sufficiente come parametro robusto, per questo viene integrata con il Parametro di Confronto (S), che include nel calcolo la portata di polvere per bilanciare l'energia con la massa effettivamente depositata [1] [5]. Il parametro S è concettualmente analogo alla relazione dell'apporto energetico di Simchi utilizzata per la PBF, ma adattata per il processo DED [1] [5]. Definito matematicamente come [5]:

$$S = \frac{P}{v \cdot g} \quad (2)$$

Dove:

- S è il parametro di confronto $[W \cdot min^2 / g \cdot mm]$
- P è la potenza della sorgente $[W]$
- v è la velocità di scansione $[mm/min]$
- g è la portata di polvere $[g/min]$

Valori di S compresi tra 14 e 18 $[W \cdot min^2 / g \cdot mm]$ garantiscono una fusione adeguata delle particelle di polvere, una geometria regolare della traccia e un'elevata qualità superficiale. [3]

Un parametro critico nella valutazione del legame metallurgico dei prodotti del processo DED è il rapporto di diluizione [2] [3], che quantifica il grado di legame metallurgico e la miscelazione tra il materiale di apporto (polvere o filo) e il materiale di base (substrato o strati precedentemente depositati) [2] [3]. Un valore ottimale di tale rapporto è generalmente compreso tra il 10% e il 30%, i valori al di fuori di tale intervallo possono indurre difetti specifici quali [2] [3]:

1. Lack of fusion (mancata fusione): per apporto termico insufficiente.
2. Porosità da keyhole: per eccesso di densità di energia.

Sotto il profilo microstrutturale, il processo è governato da velocità di raffreddamento estremamente elevate ($10^3 - 10^5$ K/s). L'evoluzione della morfologia dei grani è determinata dal rapporto tra il

gradiente termico (G) e la velocità del fronte di solidificazione (R), che operando in condizioni di forte non-equilibrio termodinamico, favorisce la formazione di microstrutture fini e metastabili [2] [3].

Nonostante il potenziale tecnologico, la gestione della storia termica rimane l'ostacolo principale alla diffusione della DED su larga scala. L'accumulo termico derivante dalla deposizione ciclica di strati successivi innesca gradienti termici complessi, responsabili di instabilità geometriche, elevati stress residui e distorsioni macroscopiche [1] [7] [8].

Per ovviare a tali criticità, la ricerca contemporanea si concentra su diverse strategie di ottimizzazione:

- Calibrazione del dwell time (tempo di sosta interstrato) per favorire la dissipazione del calore;
- Implementazione del preriscaldamento del substrato per ridurre i gradienti termici;
- Adozione di sistemi ibridi, che integrano la deposizione additiva e la lavorazione meccanica sottrattiva (CNC) in un unico centro di lavoro, garantendo il raggiungimento di tolleranze dimensionali e finiture superficiali di grado industriale [1] [3] [7].

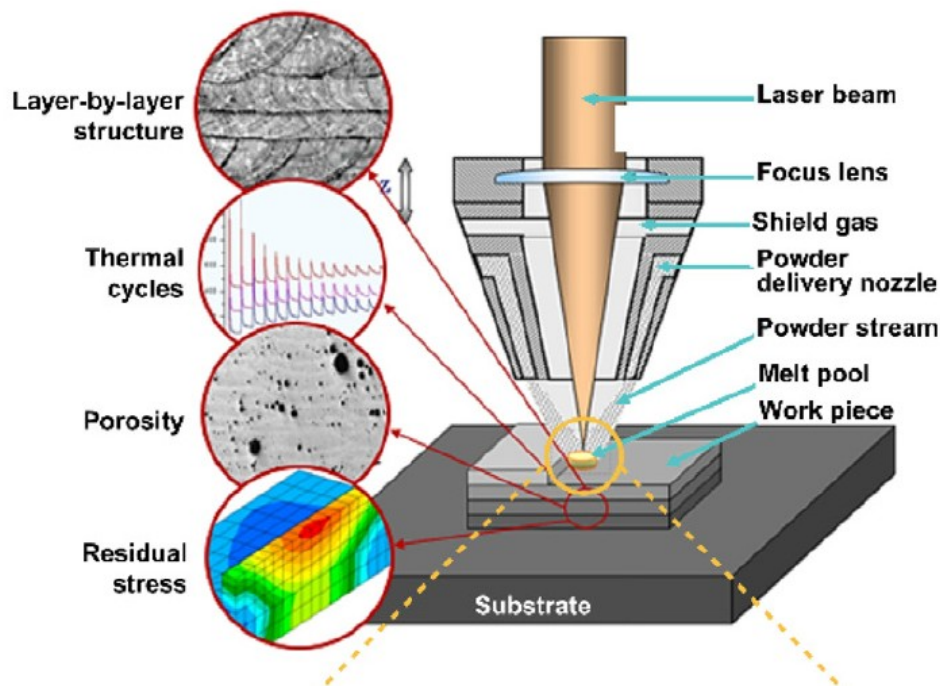


Figura 1 – Particolare dei sistemi DED con microstruttura, interfacce multiple, ciclaggio termico, difetti e stress residuo [2]

Capitolo 2

MATERIALI UTILIZZATI

2.1 Caratterizzazione del materiale: Lega Colmonoy 227-F

Per il presente studio sperimentale è stata selezionata la lega a base nichel Colmonoy 227-F, prodotta da Wall Colmonoy. Si tratta di una lega commerciale atomizzata, caratterizzata da una granulometria controllata con un diametro massimo delle particelle pari a 106 μm , ottimizzata per processi di deposizione termica e additiva.

La peculiarità metallurgica della lega risiede nella presenza sinergica di elementi alliganti quali il boro (0,9%) e il silicio (2,7%).

Questi ultimi agiscono migliorando le proprietà meccaniche e reologiche ovvero favorendo la precipitazione di boruri duri e carburi di silicio all'interno della matrice di nichel, incrementando significativamente la resistenza all'usura e la durezza superficiale che varia tra 22-27 HRC (ca. 400-900 HV a seconda della formulazione/trattamento).

Tali elementi agendo come flussanti, riducono la tensione superficiale del fuso e migliorano la bagnabilità della lega durante la deposizione [9] [10] [11].

Inoltre, la lega Colmonoy 227-F è caratterizzata da una temperatura di fusione di 915 °C e una densità di 8.52 g/cm³ [6] [11].

La famiglia di queste leghe comprende diverse formulazioni (es. Colmonoy 5, 6, 69, 88), ingegnerizzate per modulare la risposta del materiale in funzione delle sollecitazioni d'esercizio, spaziando dalla protezione di valvole industriali alla componentistica per reattori [6] [9] [11] [12] [13]. Nello specifico, la variante 227-F è stata sviluppata per operazioni di rigenerazione (*refurbishment*) e protezione di stampi per l'industria del vetro, trovando ampio impiego anche nel settore automotive per la ricostruzione di organi di trasmissione e frizioni [6] [11]. Nonostante le eccellenti proprietà tribologiche [6] [12] [13] [14], l'applicazione della Colmonoy 227-F mediante tecnologie ad alta densità di energia (come il *laser cladding*) presenta criticità legate alla suscettibilità alla cricatura [9] [10] [11].

Tale fenomeno è riconducibile alla fragilità intrinseca delle fasi dure e all'insorgenza di elevati stress termici residui durante la solidificazione rapida.

Al fine di garantire l'integrità strutturale del deposito, la pratica industriale suggerisce l'adozione di protocolli di mitigazione quali:

- Il preriscaldamento del substrato per ridurre il gradiente termico;
- L'ottimizzazione fine dei parametri di scansione (potenza, velocità, apporto di polvere);
- La calibrazione della composizione chimica per bilanciare durezza e duttilità.

2.2 Caratterizzazione del substrato: Acciaio Austenitico AISI 304

L'acciaio inossidabile austenitico AISI 304 (corrispondente alla designazione UNS S30400 secondo la normativa ASTM A240) rappresenta una delle leghe metalliche di riferimento in ambito industriale, grazie al sinergismo ottimale tra proprietà meccaniche, lavorabilità e resistenza ai fenomeni degradativi ambientali.

Appartenente alla serie 300 degli acciai inossidabili, presenta una microstruttura austenitica stabilizzata a temperatura ambiente mediante l'alligazione di elementi gamma-genì, in particolare il Nichel (8–10,5%), in combinazione con un elevato tenore di Cromo (18–20%), fondamentale per la passivazione del materiale.

Dal punto di vista ingegneristico, l'AISI 304 si distingue per le seguenti peculiarità prestazionali:

- Eccellente attitudine alla saldatura: ovvero la stabilità della fase austenitica permette l'impiego di tecniche di manifattura additiva e saldatura avanzata (Laser Cladding, DED, TIG e MIG), limitando la suscettibilità a trasformazioni martensitiche fragili e riducendo la necessità di trattamenti termici post-saldatura (PWHT).
- Comportamento meccanico e termico: ossia il materiale manifesta un'elevata duttilità e formabilità a freddo. La resistenza all'ossidazione in ambiente secco è garantita fino a temperature di esercizio continuo di circa 870°C e fino a 925°C in condizioni di lavoro intermittente.
- Risposta alla fatica: cioè presenta proprietà cicliche stabili, rendendolo idoneo per componenti soggetti a sollecitazioni dinamiche.

Nel presente lavoro di tesi, l'AISI 304 è stato selezionato come substrato (build-plate) per la deposizione multilayer della lega a base nichel Colmonoy 227-F. Tale scelta è giustificata dalla compatibilità metallurgica tra i due sistemi, che favorisce un'adesione efficace all'interfaccia e minimizza i fenomeni di diluizione [9].

L'assenza di significative frazioni di ferrite delta e la bassa reattività chimica della lega riducono drasticamente il rischio di precipitazione di fasi intermetalliche fragili durante i cicli termici rapidi tipici della Directed Energy Deposition.

In definitiva, l'AISI 304 garantisce un equilibrio ottimale tra reperibilità commerciale, costo e integrità microstrutturale del sistema substrato-rivestimento.

2.3 Strumenti utilizzati

2.3.1 Laserdyne 430

Le operazioni di deposizione sono state eseguite utilizzando la macchina di Directed Energy Deposition Laserdyne 430, dotata di un laser ad alta energia da 1 kW caratterizzato da un'emissione a fascio gaussiano fisso.

Laserdyne 430 monta una testa fornita di un percorso ottico pressurizzato, una caratteristica tecnica che svolge un ruolo cruciale nel prevenire l'infiltrazione di polveri metalliche nel sistema ottico, salvaguardando così la qualità del fascio laser e la longevità dei componenti interni.

Un ulteriore elemento distintivo della testa è l'ugello raffreddato ad acqua, progettato specificamente per applicazioni di deposizione continua.

Tale ugello, realizzato tramite manifattura additiva, offre un'efficace gestione termica e riduce sensibilmente il rischio di adesione delle particelle di polvere attorno alla zona di uscita, un problema comune nei processi DED che può compromettere la precisione del deposito.

Grazie a questa configurazione avanzata, la Laserdyne 430 si rivela uno strumento estremamente efficiente per la realizzazione di rivestimenti metallici, riparazioni localizzate e componenti additivi di geometria complessa, offrendo elevata affidabilità e ripetibilità nei processi di deposizione controllata. Durante la deposizione è stato utilizzato azoto con purezza del 99,99% sia come gas di protezione della zona di fusione, sia come fluido di trasporto per convogliare le particelle di polvere dall'alimentatore a due dei quattro ugelli della testa di deposizione.

La stampa è stata svolta con una portata di polvere costante pari a 7,875 g/min e diametro dello spot laser di 2 mm (dimensione dell'area in cui viene focalizzato il laser).

In questa tesi sono state studiate 8 combinazioni di potenza laser e velocità di scansione, tramite tracce doppie (Double) e triple (Triple) che presentavano una sovrapposizione (overlap) del 50%.

POTENZA LASER [W]	VELOCITÀ DI SCANSIONE [mm/s]
900	400
	600
	800
	1000
1000	400
	600
	800
	1000

Tabella 1 – Combinazione parametri di processo



Figura 2 - Prima Additive – Laserdyne 430

2.3.2 DVM6-A Microscopio digitale

Il Leica DVM6-A è un microscopio digitale ad alte prestazioni, progettato per fornire immagini ad alta risoluzione e per permettere un'analisi estremamente dettagliata di superfici e strutture nei più svariati contesti applicativi tra cui: ricerca e sviluppo, controllo qualità, caratterizzazione di materiali e analisi forensi.

Dotato di un sistema ottico avanzato e di un'interfaccia software intuitiva, il DVM6-A consente una rapida acquisizione delle immagini e una navigazione precisa sulle superfici del campione, rendendolo particolarmente adatto a studi morfologici ad elevato contenuto tecnico.

Nel contesto specifico della presente tesi il microscopio è stato impiegato per la scansione e l'analisi morfologica delle scan track ottenute mediante processo di Directed Energy Deposition (DED), utilizzando lega Colmonoy 227-F depositata su piastre in acciaio AISI 304.

L'obiettivo principale di tale analisi è stato quello di catalogare e confrontare le geometrie delle tracce di deposito in funzione delle strategie di scansione adottate (doppia o tripla passata) e della potenza del fascio laser utilizzata durante la deposizione (rispettivamente 900 W e 1000 W).

Questo tipo di indagine è fondamentale per comprendere le relazioni tra i parametri di processo e la qualità finale del deposito, con particolare attenzione a parametri geometrici come altezza, larghezza, continuità del cordone e uniformità della superficie.

Per supportare questo studio, sono stati utilizzati due strumenti software sviluppati da Leica Microsystems.

Il primo, LAS X Navigator, è stato impiegato per la navigazione automatizzata del campione e per l'acquisizione precisa delle aree di interesse, consentendo una mappatura sistematica e ripetibile delle regioni depositate.

Il secondo, Leica Map, ha permesso l'analisi tridimensionale dettagliata della morfologia superficiale dei cordoni di saldatura, offrendo una ricostruzione accurata del profilo e permettendo l'estrazione di dati quantitativi come la rugosità, l'altezza media, il volume del materiale depositato e la simmetria delle tracce.



Figura 3 - Leica Microsystems -Microscopio Digitale DVM6-A

2.3.3 QNESS 60 A evo Microdurometro

Il Qness 60 A evo è un microdurometro d'alta gamma per laboratori e controllo qualità, progettato per combinare in un unico strumento le funzioni di un durometro di precisione e quelle di un microscopio ottico avanzato.

Il Qness è in grado di esercitare forze di prova che vanno da 0.25 g a 62.5 kg permettendo di passare dalla microdurezza a carichi medio-alti con lo stesso strumento.

Tale macchina è fornita della funzione close-loop che garantisce la massima ripetibilità eliminando le variazioni manuali o d'inerzia e di un sistema ottico a telecamera a colori con qualità d'immagine paragonabile a quella di un microscopio metallografico dedicato.

Nel contesto specifico della tesi, il microdurmetro è stato impiegato per l'analisi delle sezioni delle deposizioni ottenute mediante processo di Directed Energy Deposition (DED), utilizzando la lega Colmonoy 227-F depositata su piastre in acciaio AISI 304.

L'obiettivo principale di tale analisi è stato quello di valutare il gradiente di durezza delle tracce di deposito in funzione della strategia di scansione (doppia o tripla passata) e della

potenza del fascio laser usato durante la deposizione (rispettivamente 900 W e 1000 W). Questo tipo di indagine è fondamentale per comprendere le relazioni tra i parametri di processo e la qualità finale del deposito.

Per supportare questo studio, è stato utilizzato un software sviluppato da QATM, il Qpix Control 2 che è stato impiegato per la navigazione automatizzata del campione e per l'acquisizione precisa dei dati delle prove consentendo una mappatura della durezza delle tracce.



Figura 4 - QATM - Qness 60 A/A+ evo - Microdurometro

Capitolo 3

METODOLOGIA SPERIMENTALE

Nell'ambito dell'attività di tirocinio svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche (DIISM), è stato condotto uno studio sperimentale finalizzato alla caratterizzazione di rivestimenti metallici realizzati mediante tecnologia Directed Energy Deposition (DED).

L'obiettivo principale del lavoro è stato quello di valutare la migliore combinazione dei parametri di stampa (potenza laser, velocità di scansione).

Per raggiungere tale finalità è stato sviluppato un protocollo metodologico articolato in più fasi, che ha incluso l'acquisizione e l'elaborazione di immagini ad alta risoluzione, la ricostruzione tridimensionale delle tracce, la preparazione metallografica dei campioni e infine una prova di microdurezza.

3.1 Fase 1: Acquisizione delle immagini ad alta risoluzione

La prima fase ha previsto l'acquisizione di immagini ad alta definizione delle scan-track mediante microscopio digitale Leica DVM6, utilizzando il software LAS X Navigator.

Prima della raccolta dati, è stata condotta una taratura preliminare dei parametri di imaging, regolando:

- Esposizione e guadagno: per ottimizzare luminosità e contrasto dell'immagine Acquisita;
- Istogramma e illuminazione: al fine di minimizzare riflessi e ombre;
- Multifocus (Z-stack): per definire un intervallo di altezze (espresso in micron) entro il quale il sistema ha acquisito immagini a fuoco su diversi piani.

Tale intervallo ha permesso di ottenere una ricostruzione visiva complessiva nitida, mantenendo la messa a fuoco lungo tutta la variazione altimetrica della superficie analizzata.

Questa fase di calibrazione è stata accuratamente adattata tenendo conto sia delle condizioni locali di illuminazione presenti durante l'acquisizione, sia delle caratteristiche morfologiche e geometriche del campione, al fine di garantire una qualità d'immagine ottimale e una corretta riproducibilità dei dati raccolti nelle successive fasi di analisi.

3.2 Fase 2: Mappatura delle scan-track

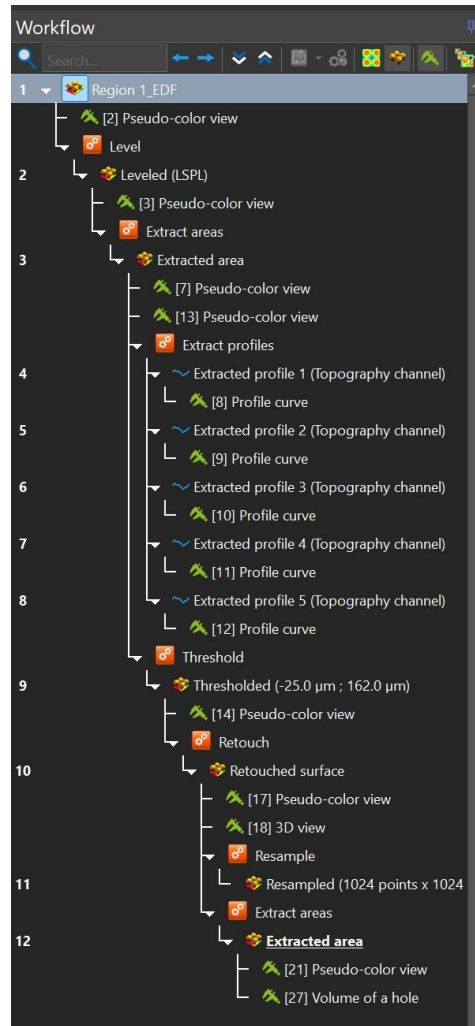
Le mappature delle scan-track sono state realizzate utilizzando il software Leica Map, che ha permesso di importare e gestire le immagini ad alta risoluzione acquisite in precedenza con LAS X Navigator. Attraverso questo software è stato possibile:

- Estrarre le tracce così da poterle suddividere in doppie e triple per ogni condizione di processo;
- Estrarre e analizzare i profili di ogni traccia;
- Correggere eventuali aberrazioni ottiche;
- Ricostruire modelli tridimensionali delle tracce;
- Calcolare il volume di materiale effettivamente depositato al fine di ottenere un'analisi delle superfici tramite il software ImageJ.

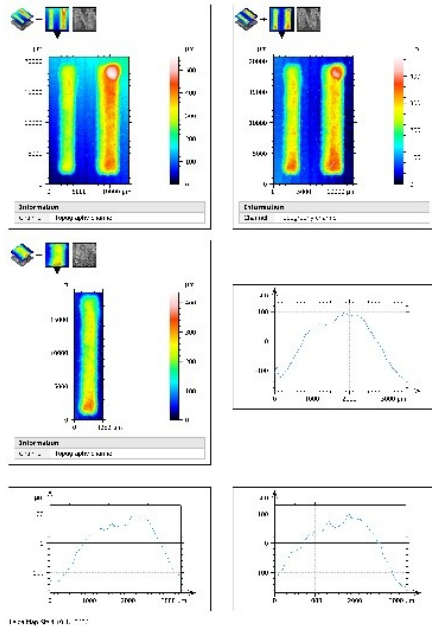
L'analisi ha incluso anche il calcolo della rugosità superficiale, espressa tramite i valori S_q e S_a , che forniscono una valutazione tridimensionale della superficie, essenziale nei processi di Additive Manufacturing (AM) come la DED per valutare la qualità della finitura e l'aderenza tra gli strati [1] [2]. Nello specifico S_q rappresenta l'altezza quadratica media dell'area definita, ossia equivale alla deviazione standard delle altezze della superficie [16]; mentre S_a rappresenta l'altezza media aritmetica dell'area definita, ovvero la media dei valori assoluti delle deviazioni di altezza rispetto al piano medio della superficie [16]. tali valori sono stati espressi in funzione dei parametri di processo impostati (ad esempio, potenza del laser $P = 900$ W e velocità di scansione $F = 600$ mm/s).

Questo tipo di analisi ha fornito informazioni fondamentali per comprendere il comportamento morfologico delle scan-track in funzione della variazione dei parametri operativi.

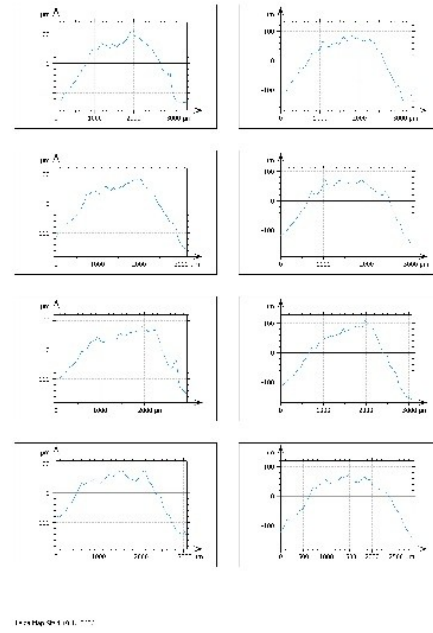
A titolo esemplificativo, nelle immagini che seguono viene riportata la mappatura di una traccia doppia ottenuta con una combinazione di parametri di processo pari a P900, -F600.



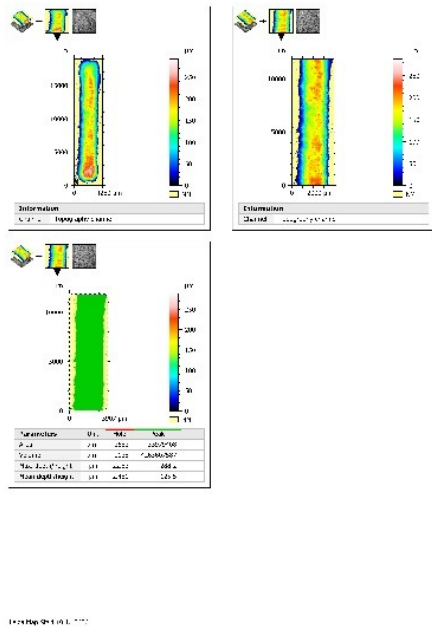
(a)



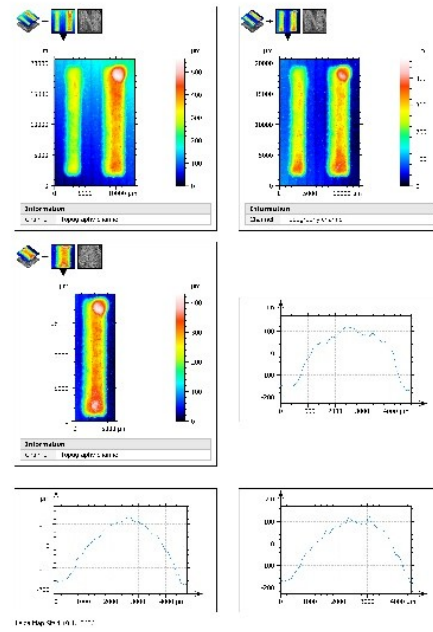
(b)



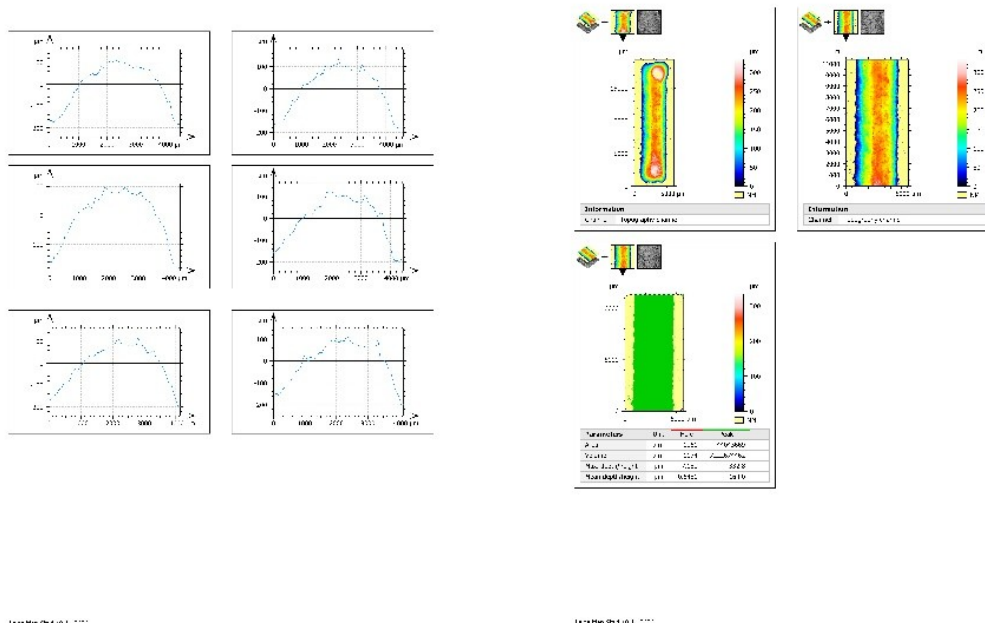
(c)



(d)



(e)



(f)

(g)

Figura 5 - Leica Map- (a) Workflow_Leica_Map – ordine logico delle operazioni svolte (b) Estrazione tracce e profili – Double, (c) Estrazione profili – Double, (d) Correzione aberrazioni e modello 3D – Double, (e) Estrazione tracce e profili – Triple, (f) Estrazione profili – Triple, (g) Correzione aberrazioni e modello 3D – Triple

Si precisa che l'intera procedura di analisi è stata ripetuta per tutte le configurazioni sperimentali previste nel piano dei test, che comprendono le seguenti combinazioni di potenza e velocità di scansione: $P = 900$ W con $F = 400, 600, 800, 1000$ mm/min, e $P = 1000$ W con $F = 400, 600, 800, 1000$ mm/s.

3.3 Fase 3: Procedimento ImageJ – EXCEL Analisi Superficie

Il modello viene suddiviso lungo i piani dello spazio:

PIANO XY

Per tale analisi è stato utilizzato il software ImageJ perché necessario per trovare il valore reale del perimetro (Figura 6).

Dopo aver avviato il programma e caricato l'immagine di interesse, è stata impostata la scala di riferimento tracciando una linea sul marker presente e applicando il comando ANALIZE – SET SCALE, fissando il valore a 1000 μm .

Successivamente l'immagine è stata ritagliata lasciando un piccolo bordo nero nella parte superiore ed inferiore mediante il comando IMAGE – CROP.

La lunghezza (length) ottenuta è stata registrata nel foglio Excel.

Dopodiché è stato utilizzato il comando IMAGE – TRANSFORM – BIN e poi il comando PROCESS – BINARY – MAKE BINARY.

Per ottenere il perimetro reale è stato utilizzato LEGACY (forma di bacchetta) e selezionando il campione, si è applicato il comando ANALYZE – MEASURE.

Il perimetro è stato anch'esso registrato nel foglio Excel.

Per determinare la larghezza media è stata tracciata una linea orizzontale sulla sezione di interesse ed è stato eseguito il comando ANALYZE – PLOT PROFILE – LIVE – LIST e sono stati selezionati il primo e ultimo valore utile, necessari al calcolo della larghezza (width).

Nel foglio Excel sono stati importati perimetro proiettato reale (ϕ), lunghezza (L) e larghezze (ω) per calcolare la distribuzione del materiale con la seguente formula:

$$MD_{P_{xx}-F_{yy}}^{XY} = \left[\frac{2(\omega + L)}{\phi} \right] \quad (2)$$

PIANO XZ

L'elaborazione dei dati è stata effettuata importando i dati di interesse in un foglio Excel, tramite il percorso DATI – RECUPERA DATI – DA FILE – DA TESTO/CSV.

Una volta aperto il file sono state selezionate le aree che rappresentano la zona del piatto, non di nostro interesse per l'analisi.

Il calcolo della distribuzione di materiale si basa su un'analisi dell'asimmetria relativa al profilo M estratto in piani successivi perpendicolari alla lunghezza dei profili (Figura 7), secondo la seguente equazione:

$$MD_{Pm-Fn}^{XZ} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[1 - \left(\frac{|A_1 - A_2|}{A_1 + A_2} \right) \right]_i \quad (3)$$

In particolare, questo valore è calcolato come l'errore relativo ad un profilo perfettamente simmetrico, dove l'area di sezione su entrambi i lati del valore X medio è uguale.

PIANO YZ

L'elaborazione dei dati è stata effettuata importando i dati di interesse in un foglio Excel, tramite il percorso DATI – RECUPERA DATI – DA FILE – DA TESTO/CSV.

L'intero set di dati è stato poi suddiviso in sottogruppi di 1500 valori. Per ognuno di questi sono stati calcolati poi il valore massimo e minimo.

La valutazione in YZ è stata effettuata estraendo profili paralleli alla lunghezza dei profili (Figura 7) ed è stata calcolata la distribuzione di materiale secondo la seguente formula:

$$\begin{aligned} MD_{Pm-Fn}^{YZ} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(O \sum_{j=1}^O \frac{Wt_{tot,i}}{Wt_{ij}} \right) \cdot \left(\frac{L}{L_{developed,i}} \right) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Wt_{tot}}{Wt_{mean,i}} \cdot \frac{L}{L_{developed,i}} \end{aligned} \quad (4)$$

Per ogni profilo N, sono state estratte la lunghezza sviluppata ($L_{developed, i}$) e la lunghezza del profilo L. Nella figura viene illustrata la differenza massima di ondulazione locale in altezza (Wt_{ij}), il dislivello massimo di ondulazione totale (Wt_{tot}) e l'ondulazione media (Wt_{mean}), che è la media aritmetica di Wt_{tot} .

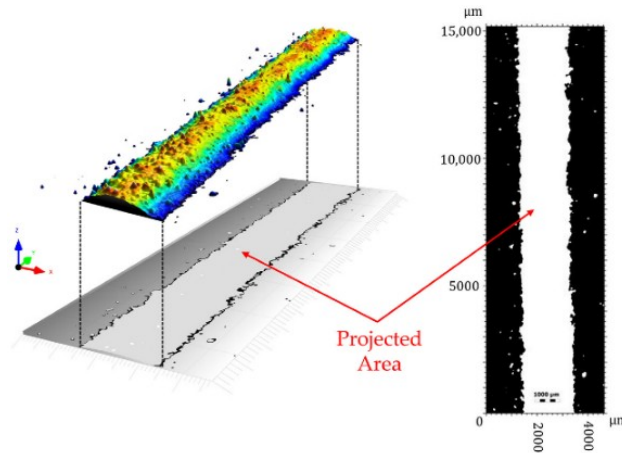


Figura 6 - Rappresentazione schematica dell'estrazione del profilo sul piano XY. A sinistra una visualizzazione 3D dell'estrazione della forma nel piano. A destra l'immagine binarizzata analizzata per il calcolo del perimetro. (Fonte: [10]A Novel Approach to Quantitatively Account on Deposition Efficiency by Direct Energy Deposition: Case of Hardfacing-Coated AISI 304 SS)

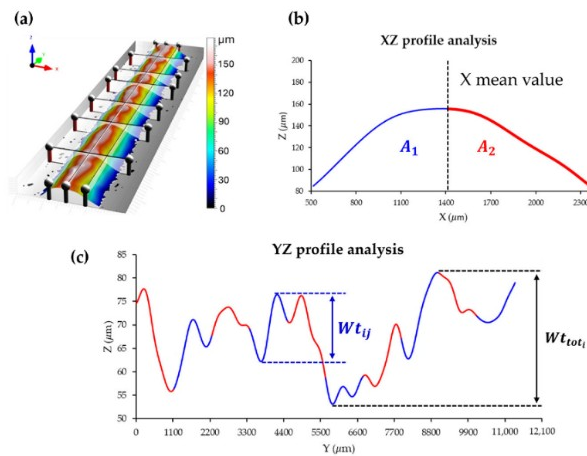


Figura 7 - (a) Rappresentazione schematica dell'estrazione del profilo sui piani XZ e YZ. (b) Illustrazione schematica di un profilo XZ. (c) Rappresentazione schematica di un profilo YZ che presenta Wt_{ij} . (Fonte: [10]A Novel Approach to Quantitatively Account on Deposition Efficiency by Direct Energy Deposition: Case of Hardfacing-Coated AISI 304 SS)

Per quantificare come il materiale è distribuito nello spazio, l'indice di distribuzione MD è stato espresso in termini di valore medio dei tre sottoindici:

$$MD_{Pm-Fn} = \frac{1}{3} \cdot [MD_{Pm-Fn}^{XY} + MD_{Pm-Fn}^{XZ} + MD_{Pm-Fn}^{YZ}] \quad (5)$$

3.4 Fase 4: Preparazione metallografica del campione

Una volta completata la fase di mappatura e acquisizione delle immagini topografiche si è proceduto alla preparazione metallografica del campione, necessaria per condurre analisi microstrutturali più approfondite.

A tal fine, il substrato in acciaio AISI 304 (build-plate) è stato sezionato in corrispondenza delle zone di interesse contenenti le scan-track precedentemente analizzate. Successivamente, la superficie della sezione è stata sottoposta a un'accurata lucidatura metallografica condotta in più fasi con abrasivi a granulometria progressivamente più fine, in particolare, sono state utilizzate carte abrasive con grane grit 400, 600, 1200, 2400 e 4000, fino al raggiungimento di una superficie sufficientemente omogenea e levigata.

Al termine della levigatura si è proceduto alla lucidatura fine mediante l'impiego di un panno lucidante su cui è stata applicata una pasta diamantata di granulometria pari a $1 \mu m$, lubrificata con sospensione oleosa.

Questa fase è stata condotta con particolare attenzione, al fine di preservare l'integrità morfologica delle scan-track e di ottenere una superficie adeguatamente speculare per l'osservazione al microscopio ottico.



(a) Levigatura



(b) Lucidatura

Figura 8 – Levigatrice e Lucidatrice metallografica a disco rotante

Tale preparazione ha rappresentato un passaggio fondamentale per garantire la qualità e l'affidabilità delle analisi successive tramite microdurometro.

3.5 Fase 5: Analisi mediante microscopio ottico digitale

A seguito della preparazione metallografica il campione è stato sottoposto a un'analisi preliminare tramite microscopio ottico digitale, con l'obiettivo di ottenere una prima caratterizzazione morfologica delle tracce di deposito ottenute mediante processo DED.

Questa fase si è rivelata particolarmente utile per una valutazione iniziale della qualità della deposizione e per l'individuazione di eventuali anomalie macroscopiche, come discontinuità evidenti, irregolarità nella larghezza delle tracce, o difetti superficiali visibili a basso ingrandimento.

L'impiego del microscopio ottico digitale ha consentito di acquisire immagini ad alta definizione della superficie sezionata del campione, permettendo di osservare in maniera chiara la disposizione delle scan-track, la loro geometria e l'uniformità del processo di deposizione.

In particolare è stato possibile confrontare visivamente le differenze tra le aree caratterizzate da diversa sovrapposizione tra le tracce, ossia configurazioni con doppia e tripla sovrapposizione, già evidenti anche a scala ottica.

Questo tipo di indagine ha fornito informazioni fondamentali sull'omogeneità della deposizione, sulla regolarità delle interfacce tra i tracciati successivi e sulla presenza di difetti localizzati, come microvuoti, mancanze di fusione o irregolarità nel profilo del materiale depositato.

Inoltre, la possibilità di effettuare misurazioni dirette sulle immagini ottenute ha reso lo strumento particolarmente utile per stimare parametri geometrici di base, come la larghezza delle tracce e la distanza tra esse.

Nel complesso il microscopio ottico digitale ha rappresentato uno strumento intermedio fondamentale, capace di fornire una visione d'insieme affidabile e immediata dello stato qualitativo del deposito, supportando in modo efficace l'interpretazione dei risultati ottenuti nelle analisi successive.

3.6 Fase 6: Valutazione delle proprietà meccaniche locali - Prove di microdurezza

Il processo di deposizione tramite Directed Energy Deposition (DED) ha portato alla formazione di diverse regioni distinte lungo il cordone della traccia depositata.

Per valutare la qualità del rivestimento e le proprietà meccaniche dei sistemi substrato-rivestimento sono state condotte prove di microdurezza Knoop in varie posizioni all'interno del bagno di fusione (melt pool) con l'obiettivo di valutare il gradiente di resistenza alla deformazione e le loro proprietà meccaniche.

Nello specifico il gradiente di microdurezza (o di resistenza alla deformazione) è la variazione di resistenza lungo una direzione (nel nostro caso la profondità della sezione delle tracce).

Le prove sono state eseguite sulle sezioni trasversali lucidate delle tracce utilizzando un durometro Qness 60A EVO.

Le impronte sono state distribuite lungo le sezioni trasversali delle tracce, coprendo ciascuna delle tre zone presentate: Colmonoy, la zona semisolido (*mushy zone*) e il substrato in AISI 304 con una media di 8 penetrazioni per test, a carico di 25 gF e un tempo di permanenza (dwell time) di 10 s (in conformità alla norma ISO 4545 [11]) (Figura 9).

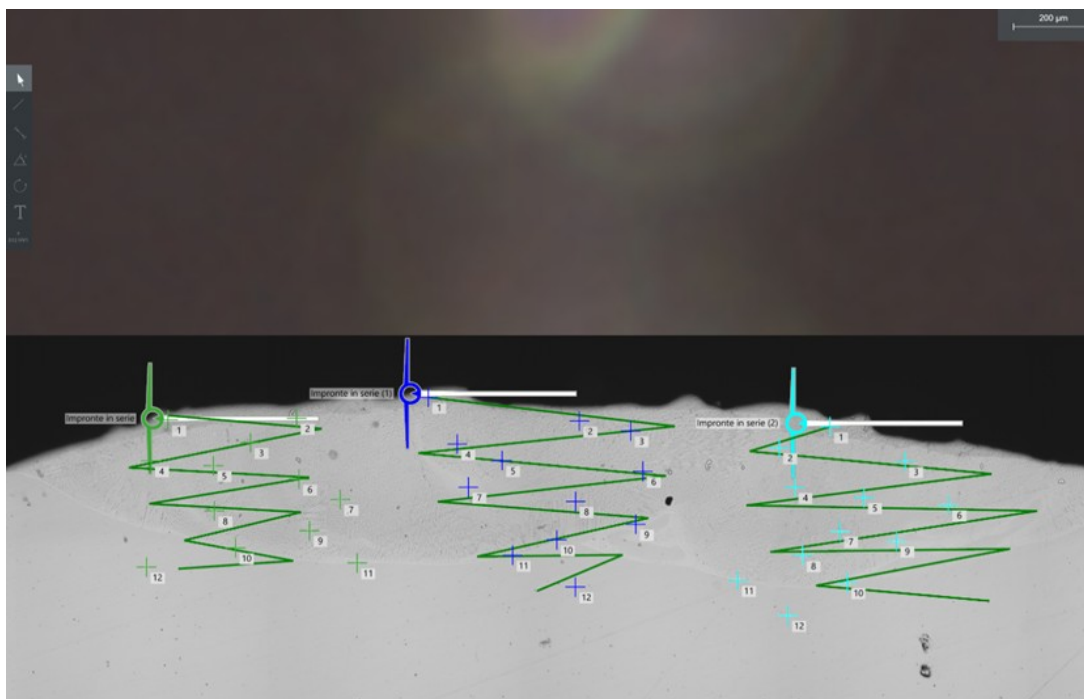


Figura 9 – schema di acquisizione punti di microdurezza (traccia Double P900-F600)

Tale analisi si è rivelata particolarmente utile per determinare come le varie deposizioni hanno influenzato le caratteristiche meccaniche delle tracce e per la valutazione dei parametri di processo utilizzati.

Capitolo 4

RISULTATI SPERIMENTALI

Il presente capitolo è dedicato all'analisi dei risultati sperimentali ottenuti durante la fase di sperimentazione del processo di deposizione tramite Directed Energy Deposition (DED).

Le prove sono state condotte utilizzando una polvere metallica di Colmonoy 227-F, una lega a base di nichel, depositata su substrati in acciaio inossidabile AISI 304.

L'obiettivo di questa fase è stato quello di comprendere in che modo i principali parametri di processo influenzino la morfologia, la qualità e l'efficienza delle tracce di materiale depositato (scan track).

Per caratterizzare in modo completo il comportamento del sistema materiale-processo sono stati considerati diversi parametri misurabili, che verranno analizzati nel dettaglio nei sottocapitoli seguenti. Sono state inoltre misurate le dimensioni geometriche delle scan track, con particolare attenzione all'indice di materiale depositato.

Un altro aspetto considerato riguarda la rugosità superficiale delle tracce, indicatore della qualità del cordone prodotto e della stabilità della pozza di fusione.

È importante sottolineare che tutti i dati sperimentali sono stati distinti e analizzati separatamente in funzione delle configurazioni a doppia e tripla sovrapposizione delle scan track, per valutare eventuali differenze legate a queste diverse modalità di deposizione e il loro effetto sulle caratteristiche finali del deposito.

Le condizioni di deposizione sono state variate principalmente attraverso la modifica della potenza del fascio laser e della velocità di scansione, allo scopo di individuare correlazioni significative tra i parametri di processo e le proprietà finali del deposito.

L'analisi condotta ha lo scopo di supportare l'individuazione di un intervallo di parametri ottimali per la realizzazione di rivestimenti funzionali, assicurando la buona adesione al substrato, la continuità metallurgica e un'elevata qualità meccaniche.

4.1 Analisi dell'indice di distribuzione dei materiali

La caratterizzazione della distribuzione dei materiali su diversi piani fornisce delle informazioni preziose sulla stabilità del processo e sull'impatto dei parametri, potenza del fascio laser e velocità di scansione, sul raggiungimento di rivestimenti di alta qualità.

L'analisi della distribuzione dei materiali tra diversi piani è stata finalizzata e unificata come mostrato nell'equazione (5).

I valori finali sono stati poi confrontati con il rapporto di distribuzione del materiale di un profilo parabolico perfetto in quanto tale forma, nella maggior parte dei casi, garantisce un perfetto andamento con il profilo depositato.

Il campione oggetto di questa tesi presenta un overlap tra le tracce del 50%.

Il valore soglia di 0,6696 è stato identificato come il punto di cut-off, cioè il valore minimo che deve essere raggiunto dalla distribuzione del materiale. Ad ogni modo un valore più alto rappresenta condizioni migliori.

La distribuzione di materiale non ottimale è rappresentata dalla combinazione P09_F10 (potenza del laser 900 W; velocità di scansione 1000 mm/s) (Figura 10).

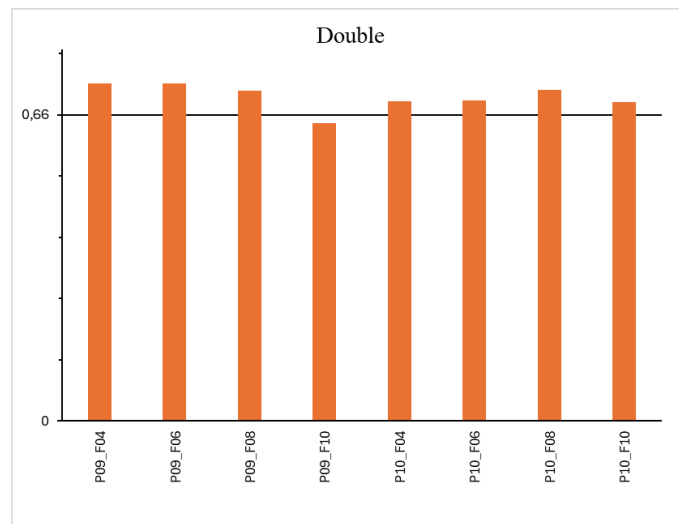


Figura 10 - Distribuzione di materiale Double track (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi in Excel)

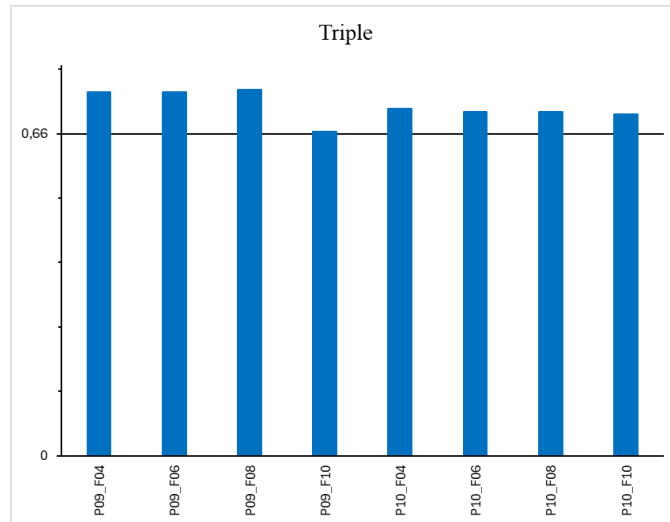


Figura 11 - Distribuzione di materiale Triple track (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi in Excel)

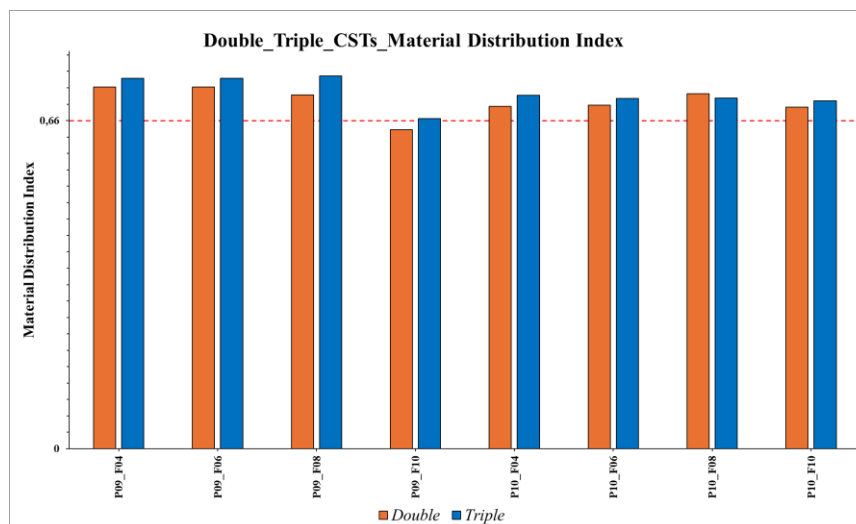


Figura 12 - Distribuzione di materiale confronto tra Double e Triple track (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi in Excel)

4.1.1 Analisi del piano XY

Come già anticipato in precedenza un aumento della potenza si traduce in un bagno di fusione più grande, mentre una maggiore velocità di scansione è associata ad un perimetro più grande e una minore stabilità del processo.

Dai grafici sotto riportati si evince come all'aumentare della velocità di scansione l'indice di distribuzione del materiale cresce in un primo momento per poi diminuire, mentre all'aumentare della potenza diminuisce l'indice di distribuzione del materiale.

4.1.2 Analisi del piano XZ

Dai grafici (Figura 13, Figura 14) si desume come la velocità di scansione abbia una grande influenza sulla distribuzione del materiale, infatti, all'aumento della velocità di scansione si nota una diminuzione media della distribuzione, mentre per quanto riguarda la potenza, vediamo come un valore più basso ci dà mediamente una maggiore distribuzione di materiale.

Tutto ciò accade perché ad un aumento della velocità di scansione vengono generati fenomeni di instabilità di Rayleigh – Plateau. Secondo uno studio effettuato [10], tali condizioni sono caratterizzate da una maggiore potenza laser, fenomeni come la pressione di rinculo e la disintegrazione delle particelle determinano l'aggiunta di una minore quantità di materiale nel bagno di fusione e hanno la precedenza sulla stabilità del processo, con conseguente asimmetria delle tracce.

4.1.3 Analisi del piano YZ

Dai grafici sotto indicati si deduce come, all'aumentare della velocità di scansione, la distribuzione del materiale assuma per le double un andamento parabolico, mentre per le triple un andamento oscillatorio. Per quanto riguarda la variazione della potenza, notiamo come:

- Per la double non si abbiano particolari variazioni di distribuzione;
- Per le Triple vediamo come all'aumentare della potenza corrisponda una crescita media di materiale depositato.

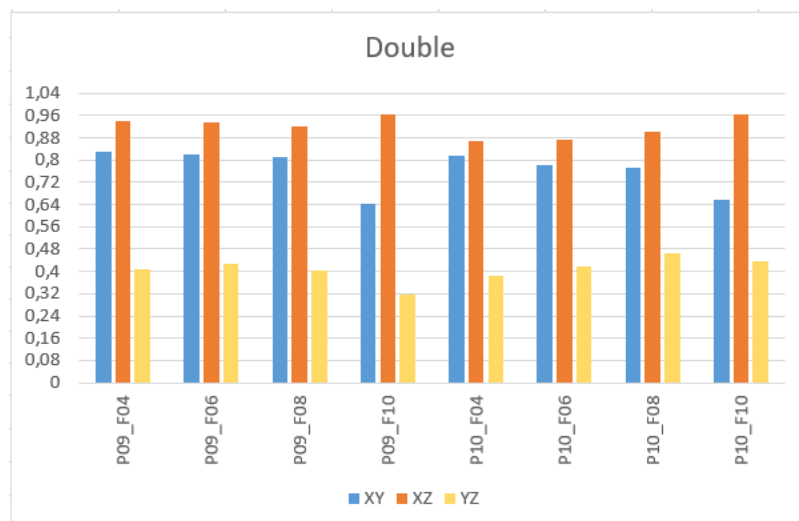


Figura 13 - Indici MD divisi per piani di sezionamento. (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel)

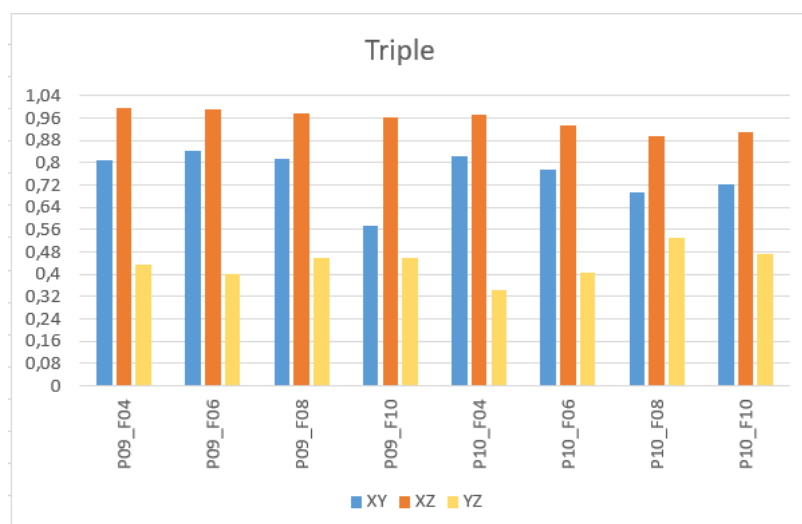


Figura 14 - Indici MD divisi per piani di sezionamento. (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel)

DOUBLE								
OVERLAP	XY		XZ		YZ		Cut-off	0,6696
50%	MEDIA	DEV. STD	MEDIA	DEV. STD	MEDIA	DEV. STD	MD	MED_DEV
P09_F04	0,831229	0,005511	0,942179	0,028317	0,410333	0,022465	0,727914	0,018765
P09_F06	0,818503	0,004339	0,93801	0,04661	0,426922	0,05121	0,727812	0,034053
P09_F08	0,811397	0,005763	0,921079	0,045603	0,40162	0,047785	0,711365	0,03305
P09_F10	0,643033	0,005947	0,96272	0,04878	0,319146	0,04257	0,641633	0,032432
P10_F04	0,815679	0,003562	0,868293	0,018049	0,381894	0,094773	0,688622	0,038795
P10_F06	0,780394	0,006491	0,8754	0,039178	0,417351	0,054829	0,691049	0,033499
P10_F08	0,770739	0,004689	0,904592	0,052276	0,466929	0,068655	0,714086	0,041873
P10_F10	0,659249	0,006877	0,965255	0,019938	0,436476	0,066316	0,686993	0,031044

Tabella 2 - Indici MD divisi per piani di sezionamento Double (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel)

TRIPLE								
OVERLAP	XY		XZ		YZ		Cut-off	0,6696
50%	MEDIA	DEV. STD	MEDIA	DEV. STD	MEDIA	DEV. STD	MD	MED_DEV
P09_F04	0,807389	0,002009	0,994344	0,004298	0,432266	0,097719	0,744666	0,034675
P09_F06	0,842742	0,004254	0,990651	0,012884	0,402501	0,066772	0,745298	0,02797
P09_F08	0,815929	0,003578	0,976287	0,032877	0,457751	0,099859	0,749989	0,045438
P09_F10	0,571245	0,005475	0,964615	0,039759	0,456079	0,059236	0,66398	0,034823
P10_F04	0,820792	0,003032	0,971191	0,02274	0,341166	0,086633	0,711049	0,037468
P10_F06	0,777109	0,00256	0,932099	0,045359	0,403824	0,09982	0,704344	0,049246
P10_F08	0,692766	0,003852	0,893507	0,041985	0,530401	0,045101	0,705558	0,030313
P10_F10	0,720958	0,007033	0,90757	0,026795	0,471105	0,080834	0,699878	0,038221

Tabella 3 - Indici MD divisi per piani di sezionamento Triple (Fonte: prodotta in autonomia dall'analisi Excel)

4.2 Rugosità superficiale

La rugosità superficiale è uno dei principali parametri utilizzati per valutare la qualità del rivestimento ottenuto mediante processo DED.

Essa rappresenta la misura delle micro-irregolarità presenti sulla superficie del cordone e fornisce informazioni importanti sia dal punto di vista estetico che funzionale.

Nel contesto dei processi di additive manufacturing la rugosità è un indicatore sensibile delle condizioni operative e della stabilità del processo: variazioni nella potenza del laser, nella velocità di scansione o nella distribuzione della polvere possono riflettersi direttamente sul profilo superficiale del deposito.

Una superficie con rugosità eccessiva può compromettere le prestazioni meccaniche, favorire l'innescio di cricche o porosità, peggiorare l'adesione di eventuali rivestimenti secondari e aumentare la resistenza aerodinamica o all'usura.

Al contrario una superficie regolare indica un controllo efficace del processo e una deposizione stabile. Nel presente lavoro la rugosità è stata misurata su ogni campione mediante profilometria ottica 3D, utilizzando il software *Leica Map*.

I risultati sono stati analizzati separatamente per le configurazioni a doppia (Figura 15) e tripla (Figura 16) scan track e sono stati correlati ai parametri di processo per valutare l'effetto delle condizioni operative sulla qualità superficiale del rivestimento.

Riferimenti	DOUBLE [μm]		TRIPLE [μm]	
	Sq	Sa	Sq	Sa
P900F400	11,27	8,39	12,75	9,475
P900F600	10,13	7,235	10,37	7,615
P900F800	8,268	5,858	8,54	5,843
P900F1000	7,174	4,573	8,15	5,187
P1000F400	14,11	9,274	14,98	9,92
P1000F600	12,18	7,868	12	7,976
P1000F800	9,38	5,57	10,27	6,844
P1000F1000	7,688	5,104	7,815	5,126

Tabella 4 - Indici Rugosità Sq e Sa Double e Triple

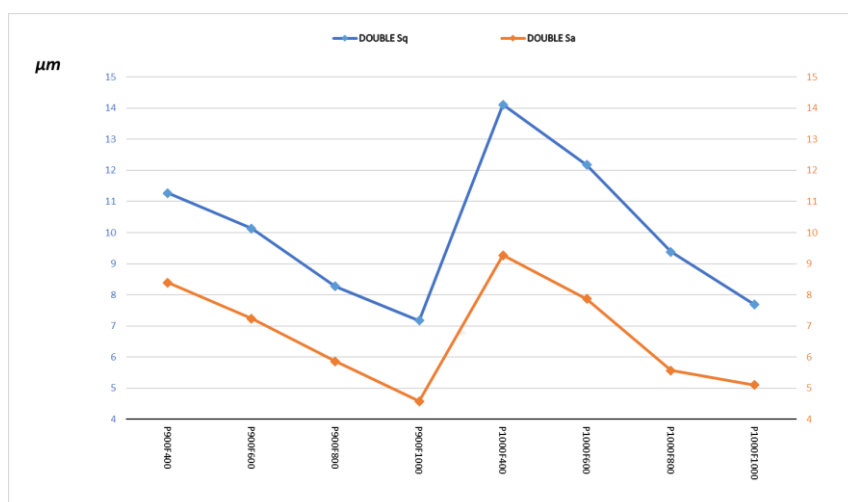


Figura 15 - grafici rugosità Double

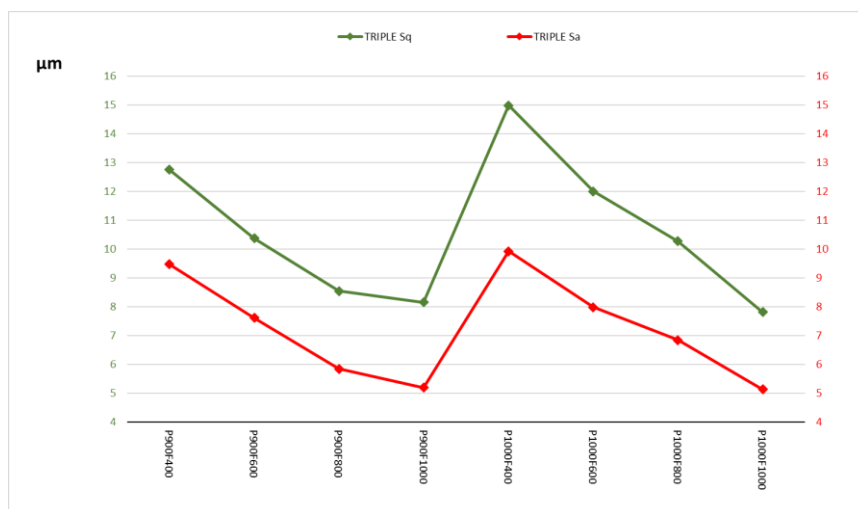


Figura 16 - grafici rugosità Triple

4.3 Valutazione della microdurezza

Un altro dei principali parametri utilizzati per valutare la qualità del rivestimento è la microdurezza che rappresenta la resistenza del materiale alla deformazione su scala microscopica.

La resistenza alla deformazione delle tracce e le loro proprietà meccaniche sono state studiate utilizzando la prova di microdurezza Knoop.

Nello specifico è stato preso in considerazione il gradiente di microdurezza ovvero la variazione di resistenza lungo una direzione (nel nostro caso la profondità della sezione delle tracce).

Le impronte sono state distribuite lungo le sezioni trasversali delle tracce, coprendo ciascuna delle tre zone presentate: Colmonoy, la zona semisolido (*mushy zone*) e il substrato in AISI 304.

Dai Grafici riportati di seguito (Figura 17 - Figura 22) si evince come prendendo in esame l'influenza della potenza, emerge una correlazione estremamente chiara con la durezza del materiale. I campioni realizzati a 900 W mostrano infatti picchi di durezza significativamente più elevati rispetto a quelli processati a 1000 W. Questa differenza è particolarmente evidente nella configurazione a doppio strato (Double), dove il valore massimo a 900 W raggiunge circa 530 HK in corrispondenza del parametro P900F600, mentre a 1000 W il picco massimo non supera i 380 HK. Questa riduzione della durezza all'aumentare della potenza trova una spiegazione nel maggiore apporto termico immesso nel sistema, il quale rallenta la velocità di raffreddamento favorendo sia l'ingrossamento del grano (*coarsening*) che una più marcata diluizione con il substrato.

Per quanto riguarda il parametro F, legato alla velocità di scansione, si nota un impatto altrettanto definito sulla risposta meccanica. Nelle configurazioni a 900 W, i valori iniziali di durezza più elevati

si registrano generalmente per i parametri F400, F600 e F800. Al contrario, la serie F1000 mostra quasi sistematicamente i valori di durezza iniziali più bassi; emblematico è il caso della configurazione Double a 1000 W, in cui il parametro P1000 F1000 mantiene un profilo di durezza piatto e basso, attestandosi intorno ai 250-300 HK. Inoltre, l'andamento non lineare delle curve e le loro fluttuazioni locali evidenziano una certa disomogeneità, confermando come la stabilità del bagno di fusione e la conseguente microstruttura siano sensibili all'aumentare della velocità.

Il confronto tra le configurazioni a due strati (Double) e a tre strati (Triple), evidenzia geometrie dei profili leggermente differenti. Nel caso del doppio strato, i profili mostrano una decrescita molto ripida dal primo punto di misura verso l'interno, per poi stabilizzarsi in genere dopo il terzo o quarto punto di campionamento. Nella configurazione a tre strati si osserva ugualmente un calo iniziale, ma i profili mostrano un andamento leggermente più graduale nella zona centrale prima di stabilizzarsi tra i 250 e i 350 HK. Guardando ai grafici di confronto, si nota un effetto di saturazione: indipendentemente dai parametri iniziali impostati, man mano che ci si allontana dalla zona superficiale la durezza tende a convergere verso un valore di regime del substrato, compreso tra 250 e 300 HK.

Infine, l'andamento generale della durezza lungo gli otto punti di campionamento segue un trend comune a tutte le prove. Il punto 1, che rappresenta la zona più vicina alla superficie fa registrare sistematicamente i valori più alti, toccando i 540 HK per le serie P900. Subito dopo, nella zona di transizione compresa tra il punto 2 e il punto 4, si assiste alla variazione più marcata, con la durezza che cala bruscamente. Negli ultimi punti, dal 5 al 8, il profilo si stabilizza infine su valori più bassi e uniformi.

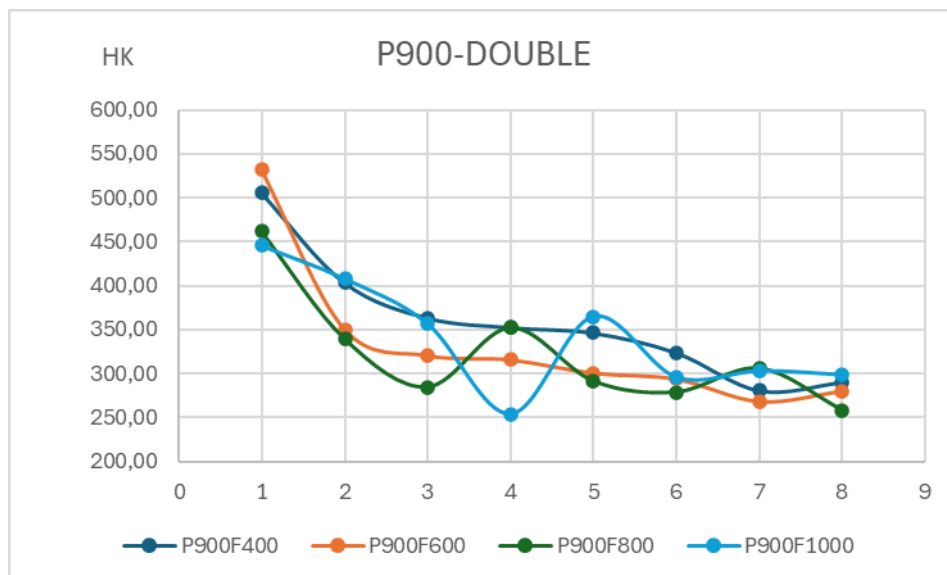


Figura 17 - Grafico Hardness Potenza 900W Double

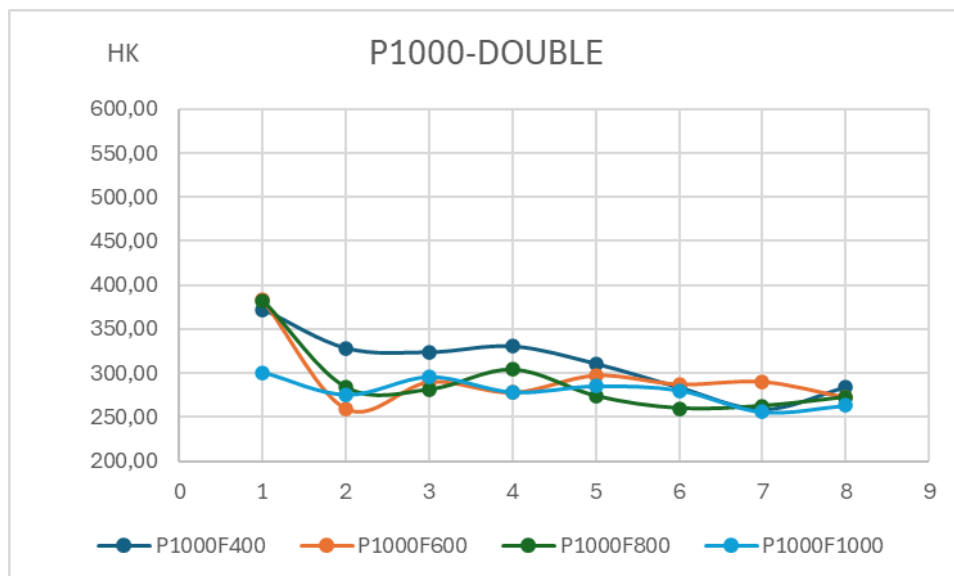


Figura 18 - Grafico Hardness Potenza 1000W Double

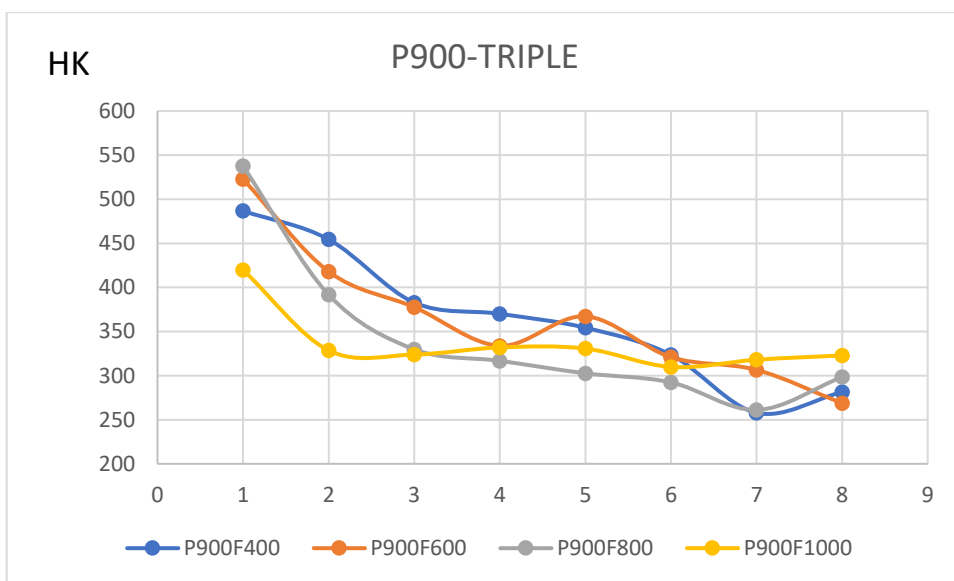


Figura 19 - Grafico Hardness Potenza 900W Triple

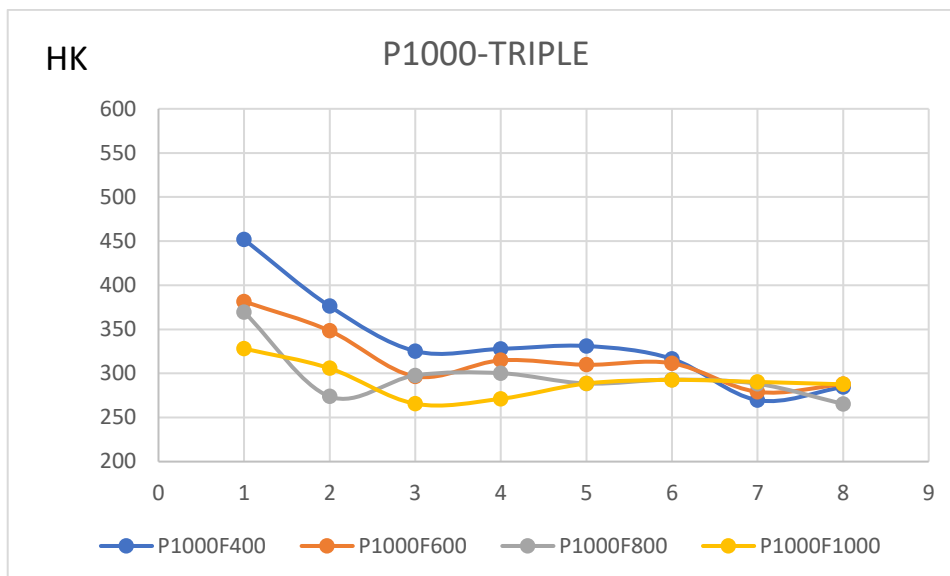


Figura 20 - Grafico Hardness Potenza 900W Triple

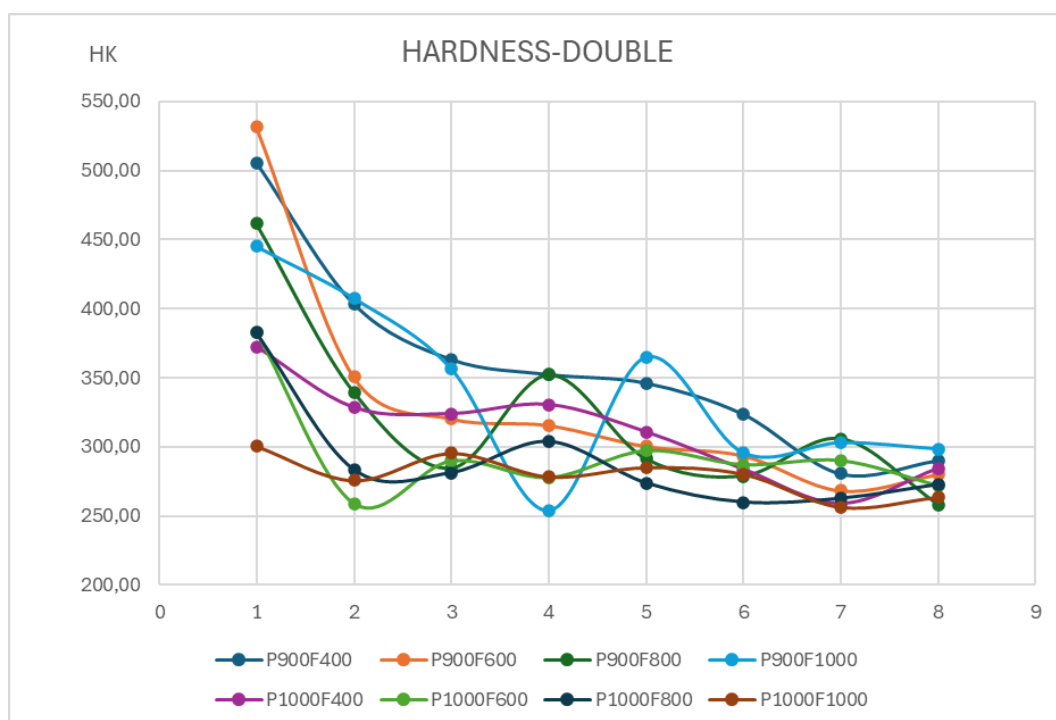


Figura 21 - Grafico Hardness Double a Confronto

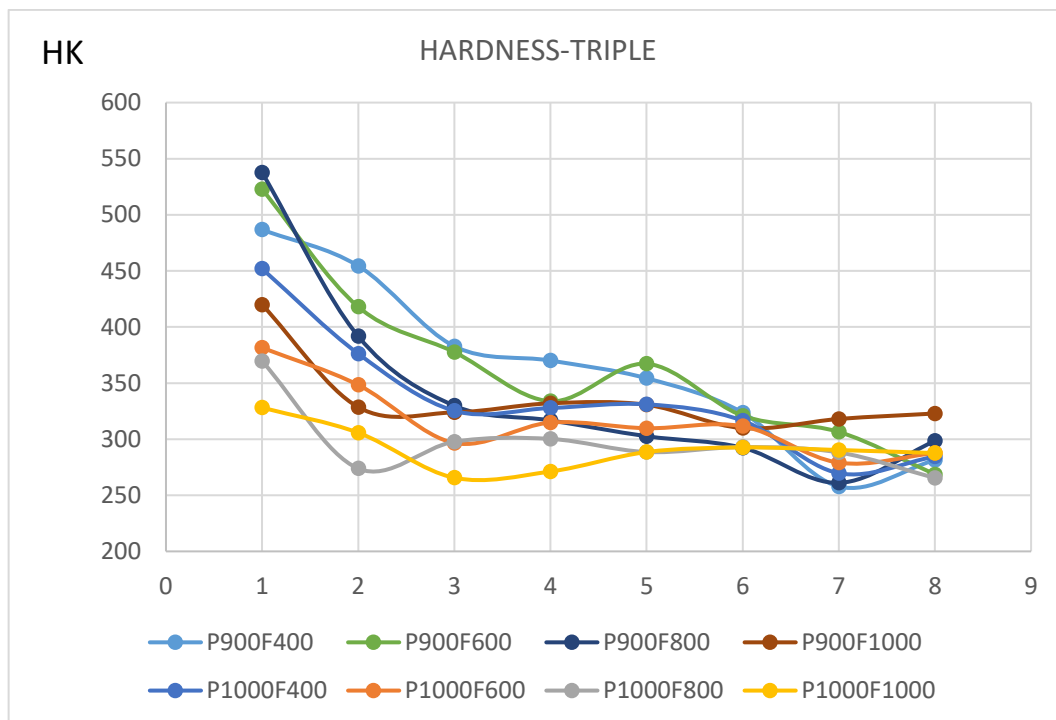


Figura 22 - Grafico Hardness Triple a Confronto

Capitolo 5

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo la caratterizzazione sperimentale del processo di deposizione laser DED, con particolare attenzione all'effetto dei parametri di processo – potenza del fascio laser e velocità di scansione – sulla qualità geometrica e metallurgica dei cordoni realizzati con lega Colmonoy 227-F su substrato in acciaio AISI 304.

Per valutare l'impatto di tali parametri sono stati presi in considerazione i seguenti indicatori:

- Indice materiale depositato, ottenuto mediante analisi delle profilometrie 3D;
- Rugosità superficiale, misurata per valutare la regolarità della deposizione;
- Gradiente di microdurezza, ricavati da prova knoop e analizzati tramite excel;

Dall'analisi sperimentale è emerso che la scelta dei parametri di processo ha un impatto decisivo sulla qualità del rivestimento, più significativo rispetto alla configurazione adottata (scan track doppia o tripla).

In particolare la combinazione di 900 W di potenza e 600 mm/s di velocità di scansione si è dimostrata la più efficace in termini di equilibrio tra materiale depositato, regolarità superficiale e profilo di resistenza.

Questa condizione consente di:

- limitare la rugosità superficiale, assicurando al contempo una buona distribuzione del materiale fuso;
- garantire un'elevata durezza superficiale mantenendo un adeguato andamento del gradiente di resistenza.

Per quanto riguarda la configurazione (Double e Triple), i risultati mostrano che i cordoni realizzati con scan track doppie presentano in media una maggiore stabilità, con minore dispersione nei valori di rugosità.

Tuttavia, l'influenza della configurazione è da considerarsi secondaria rispetto all'effetto diretto dei parametri di processo.

In conclusione si può affermare che, per le condizioni sperimentali esaminate, la combinazione di 900 W e 400 mm/s rappresenta la scelta più idonea per ottenere cordoni di buona qualità.

La configurazione doppia contribuisce a rafforzare tale stabilità, ma è la corretta selezione dei parametri laser a determinare la riuscita del processo DED.

Per sviluppi futuri si suggerisce l'estensione dell'analisi alla composizione chimica e microstrutturale del rivestimento (diluizione, composizione materiale, spettroscopia), nonché l'impiego di approcci

numerici o di intelligenza artificiale per la previsione e l'ottimizzazione del comportamento del processo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.-G. Ahn., «Directed energy deposition (ded) process: State of the art. International,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 8, pp. 703-742, 2021.
- [2] M. D. B. Z. A. L. V. S. B. A. B. J. M. S. E. J. L. a. N. E. David Svetlizky, «Directed energy deposition (ded) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications,» *Materials Today*, vol. 49, October 2021.
- [3] D. M. K. S. a. A. B. Kellen D. Traxel, «Model-driven directed-energy-deposition process workflow incorporating powder flowrate as key parameter,» *Manufacturing Letters*, vol. 25, pp. 88-92, 2020.
- [4] W.-J. O. D.-H. K. J. G. K. J. S. O. T.-H. N. C.-S. K. T. L. Seulgi Hwang, «Optimizing interlayer cooling for SUS316L thin wall,» *journal of materials research and technology*, vol. 23, pp. 5239-5245, 2023.
- [5] A. M. Adrita Dass, «State of the Art in Directed Energy Deposition: From,» *coatings*, vol. 2, n. 418, pp. 1-26, 29 june 2019.
- [6] A. V. ., K. A. ., S. V. ., M. R. S. B.N. Manjunath, «Optimisation of process parameters for deposition of colmonoy using,» *Elsevier Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 1108-1112, 2020.
- [7] K. D. Traxel, D. Malihi e A. B. Kyler Starkey, «Model-driven directed-energy-deposition process workflow incorporating powder flowrate as key parameter,» *Manufacturing Letters*, 2021.
- [8] J. S. Z. A. D. &. T. D. T. Mukherjee, «Printability of alloys for additive,» *Scientific Reports*, pp. 1-8, 22 january 2016.
- [9] V. O. J. D. H. Hemmati, «TougheningmechanismforNi–Cr–B–Si–C laserdepositedcoatings A,» *Materials Science&Engineering*, n. 582, pp. 305-315, 2013.
- [10] P. S. X. Z. Li Meng, «Comparative studies on the Ni60 coatings,» *journal of materials research and technology*, vol. 16, pp. 1732-1746, 2022.

- [11] W. W. X. Z. X. L. Y. T. X. Z. Liang Liu, «Microstructures and mechanical properties of Nb nanoparticles modified,» *Materials Science & Engineering A*, vol. 814, n. 141238, p. 13, 2021.
- [12] N. J. C.-H. Y. Sundara Subramanian Karuppasamy, «Microstructure, Nanoindentation and Corrosion Behavior,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, pp. 8751-8767, 2022.
- [13] C. J. S. A. S. C. D. Leandro J. da Silva, «Effect of microstructure on wear performance of NiCrSiBC coatings,» *Wear*, Vol. %1 di %2428-429, pp. 387-394, 2019.
- [14] R. D. R. Y. H. S. J. L. Wanlu Li, «Microstructure, wear resistance and electrochemical properties of spherical/non-spherical WC reinforced Inconel 625 superalloy by laser melting deposition,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 73, pp. 413-422, 2022.
- [15] R. S. S. K. a. P. V. Amresh Kumar, «A review on machining performance of aisi 304 steel,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 2945-2951, 2021.
- [16] keyence, «<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/>,» [Online]. Available: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sq-root-mean-square-height.jsp>.
- [17] G. Grima, K. Sleem, A. Santoni, G. Virgili, V. Foti, M. Cabibbo e E. Santecchia, «A Novel Approach to Quantitatively Account on Deposition Efficiency by Direct Energy Deposition: Case of Hardfacing-Coated AISI 304 SS,» *Crystals*, vol. 15, n. 7, p. 626, 2025.
- [18] International Organization for Standardization, «ISO 4545-1:2017. Metallic Materials—Knoop Hardness Test—Part 1: Test Method,» 2017.