Politecnico di Torino

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

Studio di una nuova strategia di deposizione per applicazioni di riparazione tramite processo di deposizione diretta (DED)

Relatori:

Prof. Alessandro Salmi
Prof.ssa Eleonora Atzeni

Correlatore:
Ing. Giuseppe Vecchi

Candidato: Matteo Pecoraro

Anno Accademico 2021-2022

Sommario

ABSTRACT 4
Introduzione Additive Manufacturing 5
La tecnologia LP DED 6
Descrizione della macchina 6
Il laser 7
I tipi di ugello 8
Le polveri metalliche 9
I parametri di processo 10
Controllo del processo 10
Caratteristiche meccaniche dei prodotti di deposizione 11
Laserdyne 430 12
Introduzione alle strategie di deposizione 14
Progettazione di una strategia di deposizione 14
Fase 1 15
Obiettivi 15
Deposizione tracce 15
Acquisizione immagini allo stereomicroscopio 16
Misurazione larghezza di traccia 18
Fase 2 21
Obiettivi 21
Deposizione tracce 22
Acquisizione immagini allo stereomicroscopio 24
Misurazione larghezze delle tracce 25
Acquisizione rugosità 27
Taglio dei campioni 33
Inglobamento in resina dei campioni 34
Lucidatura dei campioni 36
Acquisizione immagini allo stereomicroscopio 38
Misura altezza delle tracce 39
Fase 3 41
Obiettivi 41
Deposizione tracce 41
Acquisizione al rugosimetro 41
Misurazione altezza di traccia 42
Misurazione larghezza di traccia 43

Fase 4 45
Studio della strategia 45
Deposizione parallelepipedo 47
Acquisizione immagini allo stereomicroscopio 48
Colorazione degli ossidi 50
Acquisizione al rugosimetro 55
Misura e confronto della larghezza di traccia 58
Misura e confronto dell'altezza di traccia 60
Misura della densità alla Bilancia di Archimede 62
Taglio dei cilindri 65
Misura della densità dei cilindri 68
Acquisizione al Tomografo 69
Fase 5 83
Studio della strategia 83
Deposizione parallelepipedo forato 86
Acquisizione immagini allo stereomicroscopio 86
Colorazione degli ossidi 89
Acquisizione al rugosimetro 94
Misura e confronto della larghezza di traccia 99
Misura e confronto dell'altezza di traccia 101
Misura della densità alla Bilancia di Archimede 104
Taglio dei cilindri 106
Misura della densità dei cilindri 108
Acquisizione al Tomografo 109
Confronto finale 114
Conclusioni 116
Appendice codici CNC per deposizioni 118
CODICE CNC FASE 1 118
CODICE CNC FASE 2 d=1.0*dav 119
CODICE CNC FASE 3 d=1.25*dav 120
CODICE CNC FASE 4 120
CODICE CNC FASE 5 132
Bibliografia 143
Ringraziamenti 145

ABSTRACT

L'obiettivo di questa tesi è quello di fornire delle linee guida nello studio e nella progettazione di una strategia di deposizione per il processo di additive manufacturing DED (Directed Energy Deposition).

Nella fase preliminare dello studio sono stati definiti, analizzati e studiati (con l'ausilio di uno stereomicroscopio e software di misura), alcuni parametri caratteristici che fanno riferimento alle singole tracce, come altezza e larghezza di traccia.

In seguito, grazie ai parametri definiti precedentemente, è stato possibile creare uno standard di prove per caratterizzare una strategia di deposizione alternata, che differisce dalla classica deposizione di tipo sequenziale dalla presenza di vincoli simmetrici su entrambi i lembi delle tracce, il che comporta un prodotto di deposizione con meno imperfezioni geometriche che sono dovute all'asimmetria dei vincoli. Le imperfezioni geometriche sono state valutate con l'ausilio di un rugosimetro per la caratterizzazione dei profili di rugosità e ondulazione delle tracce. Queste tipologie di prove hanno il compito di trovare la migliore soluzione per l'applicazione della strategia di deposizione alternata e possono essere eseguite per ogni combinazione di parametri di processo utilizzati.

Una volta ottenuti e definiti i parametri riguardanti la deposizione alternata, nelle fasi successive dello studio, sono state eseguite delle deposizioni più complesse, con una strategia a **doppia spirale alternata, con rotazione di 90° per layer**. Da queste deposizioni sono stati ricavati altri parametri caratteristici come l'altezza di innalzamento della testa di deposizione e il numero di Layer.

In queste ultime fasi è stata anche adottata la tecnica del ''**contour**'', sia interno che esterno, che permette di avere un prodotto geometricamente più stabile strato per strato.

Una volta stampati, dai campioni sono stati ricavati dei cilindri, tramite WEDM (Wire Electrical Discharge Machining), localizzati in parti differenti del campione.

Successivamente sono state eseguite delle misure di densità con la Bilancia di Archimede con la quale è stato possibile verificare eventuali differenze di densità tra i cilindri precedentemente tagliati e il campione intero, che potrebbero corrispondere alla presenza di porosità all'interno del materiale.

Infine, lo studio si è concluso con un'analisi al tomografo per verificare l'effettiva presenza di imperfezioni all'interno del materiale, che vanno a influire sulle sue proprietà meccaniche.

Questo studio ha portato dunque alla definizione di una solida strategia di deposizione che può essere applicata su una vasta gamma di prodotti industriali.

Introduzione Additive Manufacturing

I processi di Additive Manufacturing sono una serie di processi industriali che vengono impiegati per la fabbricazione di oggetti partendo dai modelli 3d degli stessi. In particolare, questi processi hanno in comune la stessa metodologia di fabbricazione che consiste nell'aggiunta di uno strato sopra l'altro di materiale fino al raggiungimento del componente desiderato, in contrapposizione alle metodologie tradizionali di produzione sottrattiva (rimozione di materiale per asportazione di truciolo).

L'Additive Manufacturing consente, rispetto alle lavorazioni tradizionali, una libertà di progettazione maggiore con una precisione e livello di dettaglio, per geometrie complesse, più elevati.

Grazie a queste tecnologie è possibile progettare i componenti con una forma più funzionale al loro utilizzo senza vincoli stringenti di progettazione derivanti dalla tecnologia produttiva.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche in termini di porosità, resistenza alle alte temperature, agli stress e alla rottura sono del tutto paragonabili ai prodotti realizzati con metodologie tradizionali o fusi.

Con l'utilizzo dei processi di Additive un oggetto può essere progettato, costruito e testato in modo più rapido eliminando diverse fasi dello sviluppo del prodotto, con una conseguente riduzione degli errori. Dunque, si accorciano i tempi di prototipazione diminuendo i costi ed entrando prima nel mercato.

Uno dei processi di Additive Manufacturing è il Laser Powder Directed Energy Deposition LP-DED o DED. Questo processo può essere utilizzato per la produzione di componenti nuovi, o per la riparazione di componenti già utilizzati, danneggiati o usurati. Per eseguire la riparazione si esegue prima un taglio parziale della zona da riparare in modo tale da permettere alla macchina di avere un piano di riferimento su cui lavorare, successivamente si esegue la riparazione per addizione di strati e infine si esegue una rettifica della superficie.

La tecnologia LP DED

Descrizione della macchina

Il Laser Powder Directed Energy Deposition (LP DED o DED), è un tipo di processo che utilizza della polvere che viene insufflata su un'area di lavoro accompagnata da una irradiazione simultanea di un raggio laser. La macchina DED crea un bagno di metallo fuso che trasla e si accoppia con il substrato precedente creando efficacemente una parte tridimensionale. In linea con la testa di deposizione, che consiste in un singolo ugello a spruzzo di polvere o in più ugelli, è presente un raggio laser. Il raggio laser viene diretto verso la regione di deposizione utilizzando una lente planoconvessa. La polvere viene trasportata con il carrier/shield gas che, oltre alla funzione di trasporto della polvere metallica permette di creare uno scudo protettivo nell'area di deposizione per contrastare l'ossidazione del metallo (in genere argon o azoto). Il fascio laser crea una pozza fusa sul substrato, in cui convergono le particelle di polvere che in parte hanno già subito l'effetto della radiazione, si crea dunque un bagno fuso (metallo liquido), al di sotto del quale è presente una zona interessata dal calore (Termal affected zone) con profondità di penetrazione variabile.

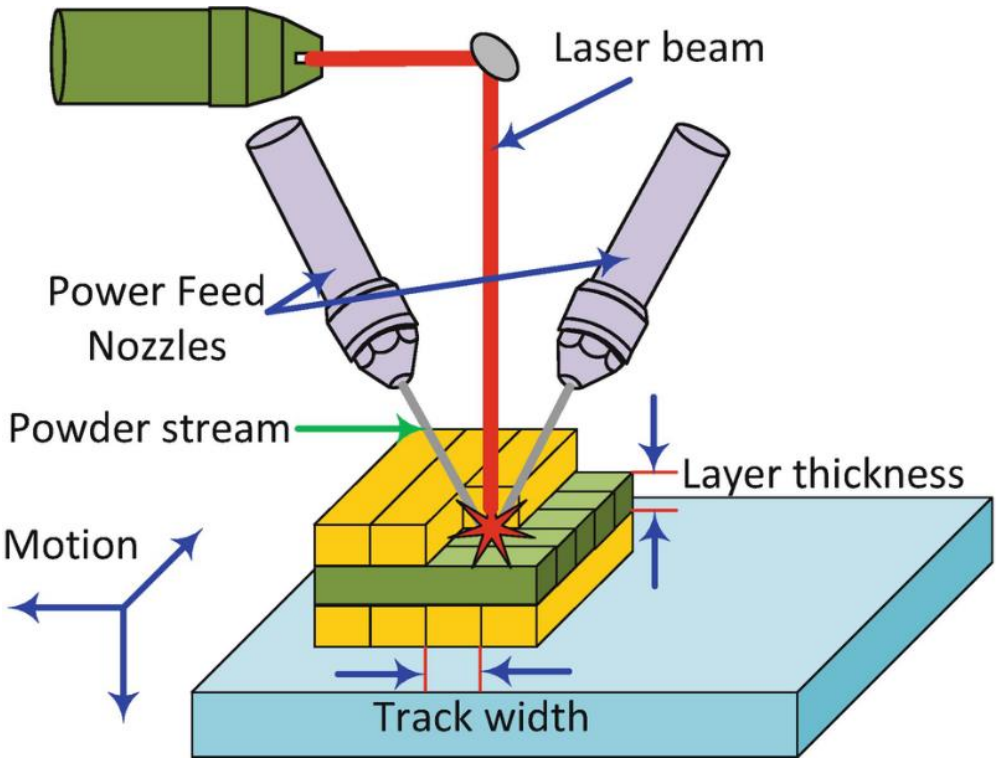


FIGURA 1 PROCESSO LASER POWDER DIRECTED ENERGY DEPOSITION

Il monitoraggio termico può essere attuato mediante l'uso di telecamere a infrarossi e/o pirometri (termometri a irraggiamento). Tale monitoraggio può essere utilizzato per il controllo del feedback o per la raccolta dei dati.

Il DED può essere utilizzato per la produzione additiva di una varietà di metalli, tra cui: Inconel625, acciai inossidabili, acciaio per utensili H13, lega di titanio, cromo, tungsteno.

Il laser

Il laser è la parte fondamentale della macchina DED, in esso le particelle di luce (fotoni) eccitate dalla corrente rilasciano energia sotto forma di luce. Questa luce viene direzionata in un fascio.

Tutti i laser sono costituiti da tre componenti:

- Sorgente Energetica/Pompa Esterna
- Il mezzo laser attivo
- Il risonatore

La sorgente conduce l'energia esterna al laser.

Il mezzo laser attivo è collocato all'interno del laser. A seconda della progettazione, il mezzo laser può essere costituito da una miscela di gas (laser CO2) o da fibre ottiche. Quando viene trasferita al mezzo laser attraverso la pompa, l'energia è emessa sotto forma di radiazione.

Nel laser a fibra ottica dove il mezzo laser attivo è una fibra ottica drogata generalmente con itterbio o altre terre rare, senza gas laser, specchi o parti mobili. La luce laser viene trasferita tramite un cavo passivo in fibra alla testa di taglio. Questa tecnologia garantisce alta produttività ed efficienza con bassa manutenzione.

Nel laser CO_2, il raggio generato dalla sorgente viene condotto alla testa di taglio attraverso specchi altamente riflettenti. Il principale vantaggio di questa tecnologia è che può essere applicata con risultati di alta qualità in termini di rugosità superficiale e tolleranza di perpendicolarità all'intero spettro degli spessori di lavorazione. Questo generatore aderisce ai più elevati standard di qualità in termini di rugosità superficiale e tolleranza di perpendicolarità.

Il mezzo laser attivo è posizionato tra due specchi, il "risonatore" *figura 2*.

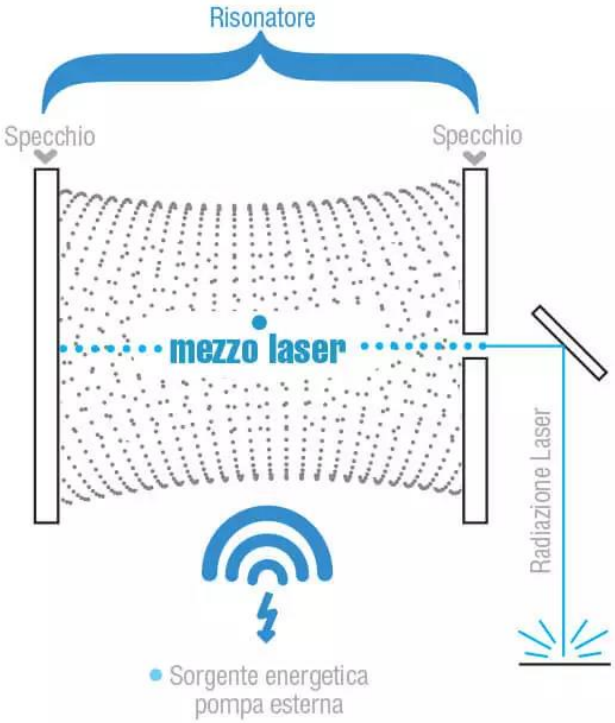


FIGURA 2 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO LASER

Uno di questi specchi è unidirezionale. La radiazione del mezzo laser attivo è amplificata dal risonatore. Al tempo stesso, solo una certa radiazione può lasciare il risonatore attraverso lo specchio unidirezionale. Questa radiazione direzionata è la radiazione laser.

I tipi di ugello

Le particelle di polvere sono trasportate nel bagno di fusione usando la testa di deposizione (o ugello) che può avere due principali configurazioni: laterale o coassiale.

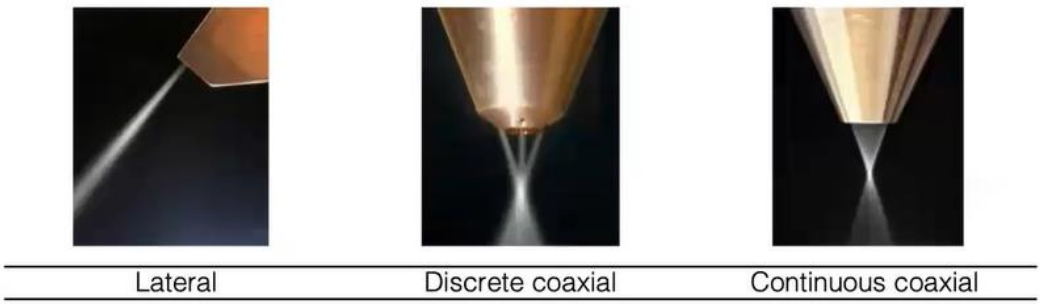


FIGURA 3 TIPOLOGIA DI UGELLO

Utilizzando la testa di deposizione laterale il tracciato di deposizione è dipendente dalla direzione con cui è montata la testa di deposizione e la deposizione può risultare disomogenea.

Utilizzando la testa di deposizione coassiale la polvere viene distribuita come una toroide circondato da gas inerte e si ha una deposizione più omogenea ed efficiente indipendente dalla direzione di deposizione. Con questa configurazione si ottiene la maggiore protezione da ossidazione per le polveri.

È inoltre possibile avere configurazioni con singolo ugello o più ugelli.

La configurazione con singolo ugello ha il vantaggio di essere più semplice. L'ugello singolo punterà direttamente verso la pozza di fusione.

Con la configurazione a più ugelli, disposti radialmente attorno al laser, aumentano la complessità e il costo del macchinario ma permette di ottenere una maggiore precisione nella distribuzione della polvere.

Le polveri metalliche

Le polveri possono variare in termini di dimensioni e forma e a seconda di come vengono prodotte. Per la DED, si utilizzano polveri di spessore che variano tra 10 e 100 micron e sono tipicamente di forma sferica. Le particelle di forma sferica possono ridurre qualsiasi intrappolamento di gas inerte all'interno del bagno di fusione e possono quindi portare a una parte finale con meno porosità. Tipici processi per la produzione di polveri per le applicazioni DED sono: Gas atomization, water atomization e i processi con elettrodi rotanti al plasma (PREP).

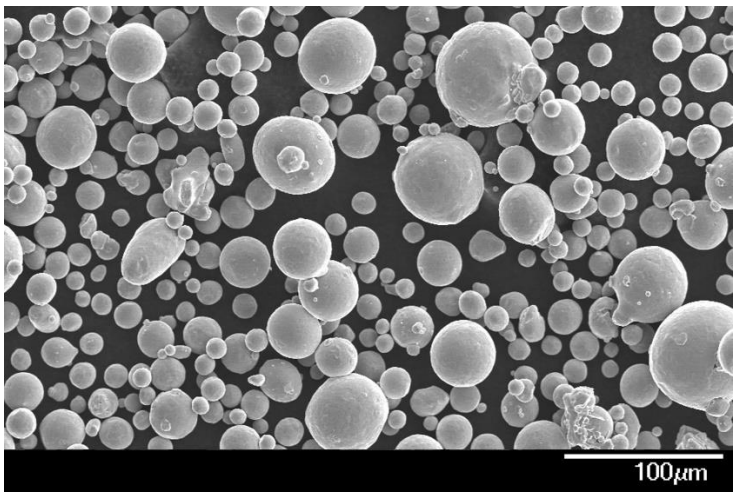


FIGURA 4 ESEMPIO POLVERE PER DED AL MICROSCOPIO INGRANDIMENTO 200X

I parametri di processo

Il processo DED è costituito da vari parametri operativi e di processo. Questi parametri operativi sono impostati, monitorati e controllati per garantire la qualità delle parti e il successo della costruzione. Essi sono: velocità relativa laser/substrato (traverse speed), pattern di scansione laser, potenza laser, diametro del raggio laser, hatch spacing, velocità di avanzamento delle particelle/polvere e tempo di inattività interlayer. Tali parametri operativi dipendono dal materiale e variano a seconda delle macchine DED (ad es. numero di ugelli, design dell'ugello) e dall'ambiente operativo. I parametri di processo possono essere modificati per un determinato materiale per controllare la qualità strutturale, la classificazione funzionale o la porosità.

La ‘‘traverse speed’’ determina efficacemente il tempo impiegato dalla DED per una determinata geometria della parte ed è in genere dell'ordine di 1-20 mm / s. Il modello di scansione laser viene impostato dall'operatore prima del processo di fabbricazione e determina la posizione del laser tramite CNC. La potenza del laser è la potenza totale emessa dalla sorgente laser DED. Questa potenza è in genere dell'ordine di 100-5000 W mentre il diametro del fascio è dell'ordine di 1 mm.

Controllo del processo

Il processo DED è nato come processo di produzione con controllo "ad anello aperto", con un utente finale che fornisce e risponde ai parametri di processo. Questi parametri di processo vengono spesso appresi tramite tentativi ed errori e le modifiche vengono apportate manualmente se necessario. È stato dimostrato che i parametri di processo invarianti nel tempo in genere si traducono in parti con una microstruttura anisotropa che in genere richiede un post-processo come un trattamento termico. L'utilizzo di parametri di processo DED costanti possono portare a distorsione termica, aumento dello stress residuo e fessurazione.

Con il controllo di feedback (ad anello chiuso), le macchine DED sono in grado di monitorare e rispondere automaticamente a tracce o costruzioni difettose o di bassa qualità, per ottenere parti con forma migliore, alta densità, bassa diluizione (gradienti di concentrazione controllati) e geometria precisa in tempo reale. Il compito del controllo in feedback della macchina DED consiste quindi nel monitorare/rilevare accuratamente alle variazioni di processo e successivamente rispondere a tali variazioni in modo tempestivo man mano che il processo va avanti.

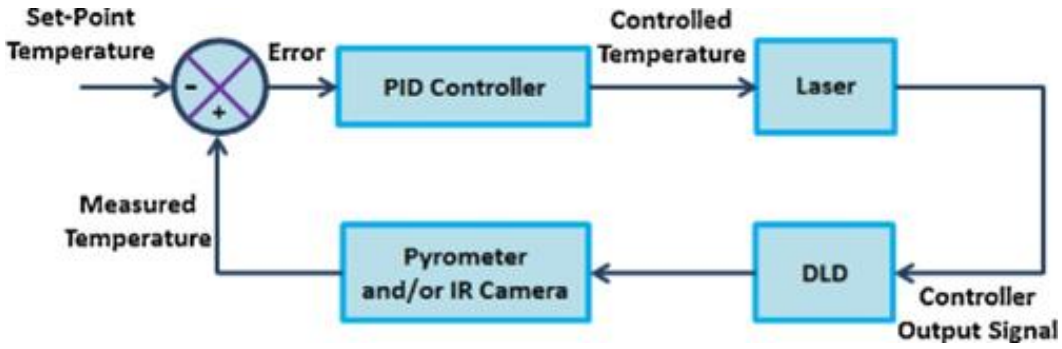


FIGURA 5 SCHEMA DI CONTROLLO DEL PROCESSO

Caratteristiche meccaniche dei prodotti di deposizione

Molto importanti per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche dei prodotti di deposizione sono oltre ai parametri di processo, soprattutto la strategia di deposizione utilizzata. È rilevante l'angolo tra la forza applicata sul componente durante la sua vita operativa e la direzione di costruzione, ad esempio se la costruzione avviene nella direzione della forza applicata si nota una maggiore resistenza a trazione, carico di snervamento e allungamento del componente costruito a 0° rispetto a un angolo tra carico e direzione di costruzione di 90° come si evince dalle figure sottostanti.

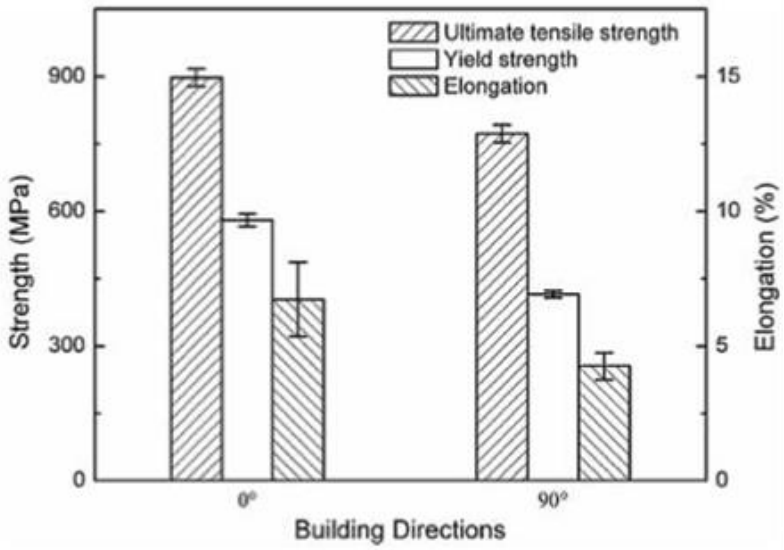


FIGURA 6 PROPRIETÀ MECCANICHE AISI 316L

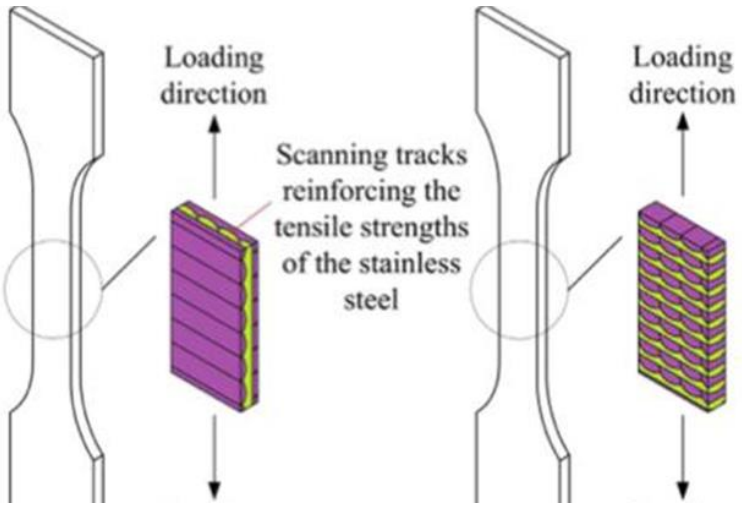


FIGURA 7 DIREZIONE DI CARICO

È dunque necessario definire una precisa strategia di deposizione per ogni tipologia di componente da produrre a seconda anche alle sollecitazioni che questi componenti andranno ad affrontare.

Per quanto riguarda i difetti o le porosità (microvuoti), essi sono stati identificati come una delle cause comuni di degradazione delle proprietà meccaniche in campioni fabbricati in modo additivo.

I difetti interlayer e intrastrato sono due tipi comuni di porosità che possono verificarsi rispettivamente a causa di un'erogazione di potenza insufficiente durante il processo di fusione (che porta alla mancanza di fusione) e all'intrappolamento del gas durante tutto il processo di deposizione (porosità di vaporizzazione).

Laserdyne 430

La macchina a deposizione laser diretta (DED) utilizzata per questo studio è una Laserdyne 430 della Prima Additive *figura 8*.

FIGURA 8 LASERDYNE 430 PRIMA ADDITIVE

Essa è costituita oltre che dalla carcassa della macchina stessa, da un pannello di controllo, nel quale è possibile creare, caricare o modificare i file cnc e i vari parametri della macchina. Il pannello di controllo è inoltre dotato di pulsanti per lo start e lo stop della macchina, una chiave per l'accensione del laser, un regolatore di velocità e un regolatore di intensità del laser e un volantino manuale per l'orientamento della testa (asse z) e della base (assi x e y), Infatti il posizionamento lungo l'asse z è svolto grazie ad una guida a cui è collegata la testa di deposizione, mentre l'orientamento negli assi x e y è svolto da dei motori che agiscono su due guide e rendono possibile il movimento della piastra di base su questo piano.

La testa di deposizione è costituita da un ugello coassiale *figura 9*, con uno spot laser di 2 mm nella quale arriva la polvere di AISI 316L e l'argon utilizzato come shield gas.

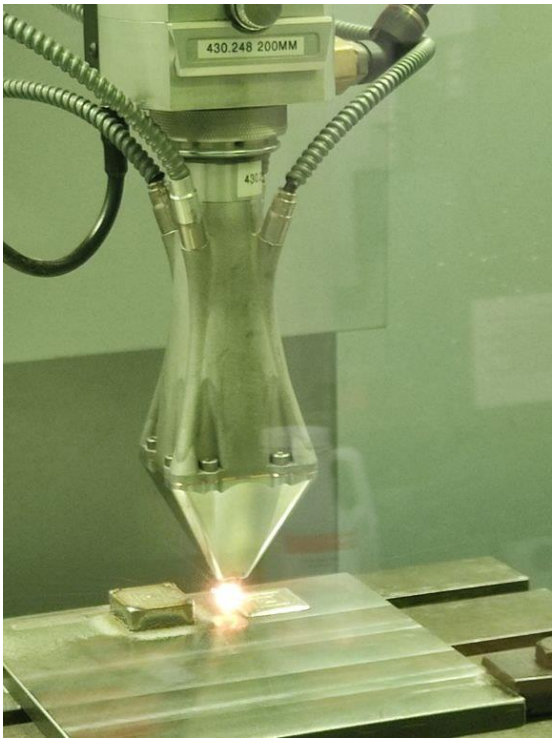


FIGURA 9 TESTA DI DEPOSIZIONE LASERDYNE 430

La polvere arriva alla testa di deposizione grazie ad un powder feeder o sistema di approvvigionamento delle polveri, che immette nell'ugello la corretta quantità di polvere. In questo macchinario sono presenti 2 powder feeder che teoricamente possono essere intercambiati, ma praticamente sono dei componenti così sensibili, che è impossibile avere lo stesso flusso di polvere impostando gli stessi parametri di deposizione.

Introduzione alle strategie di deposizione

Prima di iniziare la produzione di un componente con il processo di deposizione diretta DED è necessario scegliere la strategia di deposizione opportuna, dipendente dalla tipologia di pezzo da produrre. Una volta scelta la strategia di deposizione da utilizzare è necessario adattarla alle caratteristiche della macchina in uso, per ottenere un componente migliore possibile, senza sovrapposizioni superflue di strati che porterebbero alla non uniformità geometrica del prodotto finito.

Il seguente studio si concentra in particolare sulla realizzazione di una **strategia di deposizione per la riparazione di componenti**, in quanto tutte le deposizioni sono effettuate su una piastra in acciaio AISI 316L.

Progettazione di una strategia di deposizione

Prima di iniziare a progettare una strategia di deposizione è stato eseguito uno studio della letteratura presente sui vari benefici apportati da alcune tecniche come la deposizione a spirale (utile a ridurre porosità e aumentare la precisione geometrica come evidenzia lo studio di *S. B. RIBEIRO – A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes*), la deposizione con rotazione di 90° (utile a omogeneizzare la rigidezza del materiale in ogni direzione, *ZHAO - The effect of different scanning strategies on microstructural evolution to 24CrNiMo alloy steel during direct laser deposition*), la deposizione alternata, (utile a migliorare le caratteristiche geometriche strato per strato, *DOS SANTOS PAES - Modeling layer geometry in directed energy deposition with laser for additive manufacturing*), la presenza del contour (utile a definire geometricamente i bordi esterni o interni del prodotto di deposizione).

Per unire tutti i pregi delle varie tecniche presenti in letteratura è stata pensata e definita una strategia di deposizione a **doppia spirale alternata, con rotazione di 90° per layer con la presenza del countour**.

Per arrivare correttamente a progettare e definire questa strategia sono state eseguite 5 fasi di studio che saranno spiegate e motivate nei capitoli successivi.

Fase 1

Obiettivi

Per iniziare lo studio è stato necessario dapprima definire le dimensioni della singola traccia; infatti, lo scopo di questa prima fase di studio è stato la misura della larghezza della traccia h (*figura 10*) e dell'altezza di traccia utilizzando un set di parametri di deposizione ottimizzati in precedenti campagne sperimentali che saranno utilizzati per le successive deposizioni:

- Potenza 750W;
- Velocità di scansione 850 µm/s;
- Velocita powder feeder 8 rpm;
- Portata di gas 6 g/min;
- Diametro spot laser 2 mm.

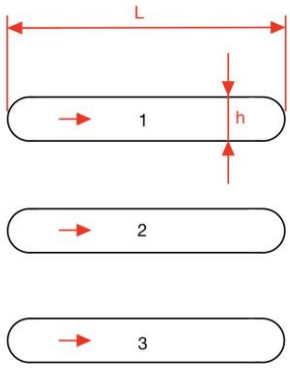


FIGURA 10 PARAMETRI PRIMA DEPOSIZIONE

Deposizione tracce

Nella prima fase dello studio, sono state prodotte 3 tracce molto distanziate le une dalle altre di lunghezza L=25 mm con lo stesso verso di deposizione. Per poter produrre le tracce è stato creato un file con il codice CNC tramite il programma Mastercam che permette di creare qualunque tipologia di linea di deposizione. Dopo aver creato il file.cnc è stato in seguito caricato sulla macchina per poter iniziare la deposizione.

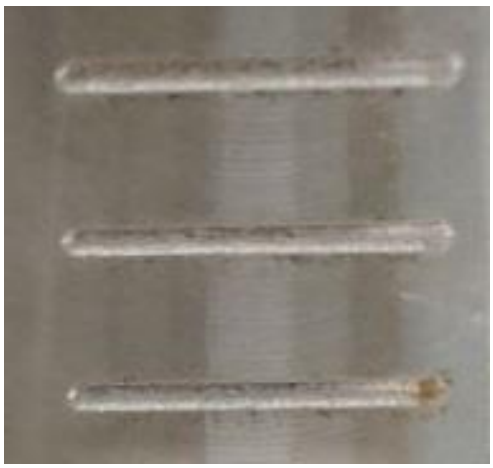


FIGURA 11 DEPOSIZIONE 1

Acquisizione immagini allo stereomicroscopio

Dopo aver effettuato la deposizione, le tracce sono state analizzate al microscopio ottico digitale ''S9'' della Leica *figura 12*, che produce delle immagini ad altissima risoluzione 3840x2160 pixel (4K).

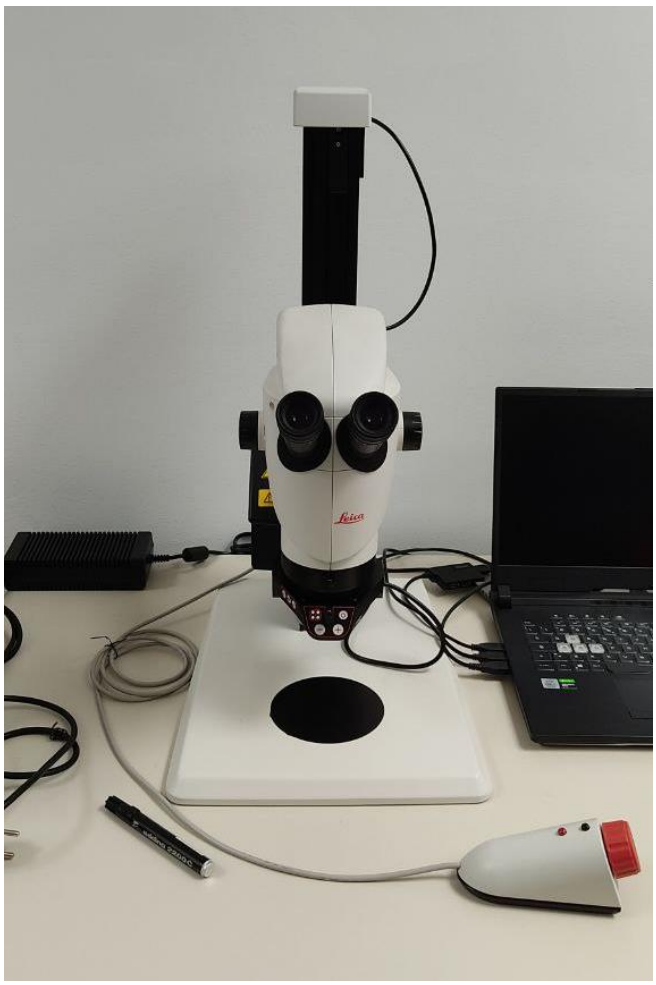


FIGURA 12 STEREOMICROSCOPIO S9 LEICA

Le immagini sono state ottenute per tutte e 3 le tracce ma non potendo acquisire con il livello di dettaglio necessario l'intera traccia, è stato necessario acquisire due fotografie, dapprima da 0 a circa 2/3 della lunghezza L della traccia e poi da circa 1/3 fino alla fine della lunghezza, questo è stato fatto per poter permettere al software Photoshop, utilizzato per unire le fotografie, di riconoscere perfettamente la giunzione delle foto. Il microscopio applica sulle immagini la scala della fotografia che è molto importante per tarare il programma che effettua le misurazioni.

FIGURA 13 LINEA DI DEPOSIZIONE 1 SX

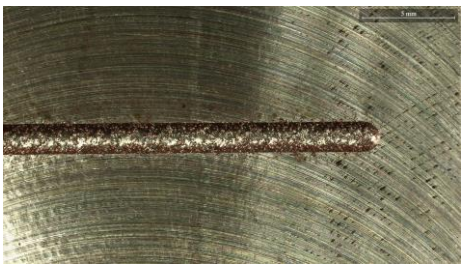


FIGURA 14 LINEA DI DEPOSIZIONE 1 DX

FIGURA 15 LINEA DI DEPOSIZIONE 1 COMPLETA

Misurazione larghezza di traccia

La misurazione delle tracce è stata eseguita con il software ImageJ. Una volta caricata l'immagine sul software la prima operazione da effettuare è la taratura della scala dell'immagine. Per tarare l'immagine è possibile prendere una lunghezza dell'immagine di cui si conosce perfettamente la dimensione e tarare l'intera immagine in base a quella dimensione, in questo caso per la taratura è stata utilizzata la scala di misura presente sull'immagine del microscopio che aveva la dimensione di 5 mm *figura 16*.

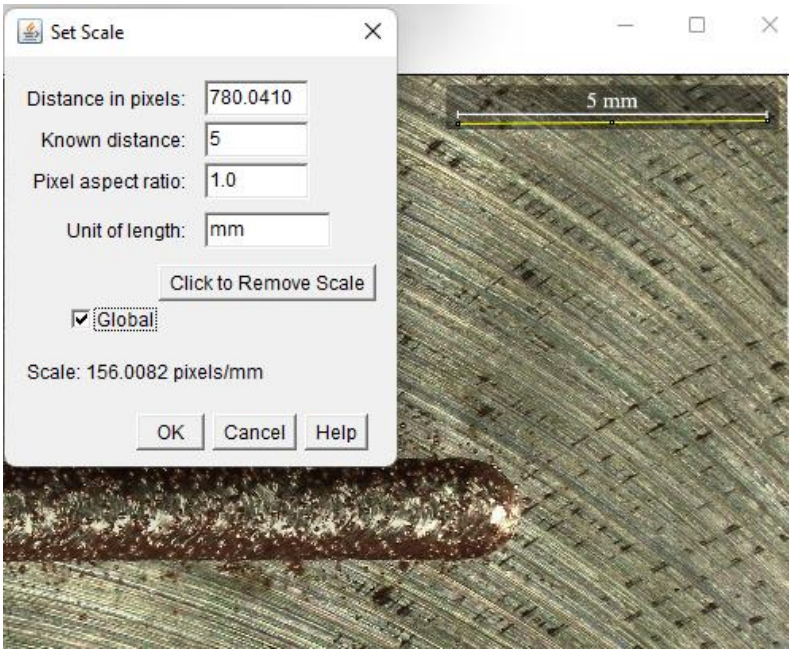


FIGURA 16 IMAGEJ PROCEDURA DI TARATURA IMMAGINE

Successivamente sono state provate due tecniche di acquisizione delle misure della larghezza dav di deposizione.

La prima tecnica mediante l'uso di un box di misura di lunghezza prefissata 20 mm del quale è stata presa l'area mediante il programma ed è stata divisa per la lunghezza stessa, il box è stato preso interpolando il bordo della traccia non per l'intera lunghezza, ma solo nella parte intermedia, perché nelle parti finale e iniziale della deposizione la forma è compromessa dal tempo un po' più prolungato di stazionamento del laser e dall'assenza di vincolo su un lato della deposizione.

Per la seconda tecnica sono state prese 5 misure dirette sulla larghezza dav in 5 diversi punti della traccia ed è stata successivamente fatta una media.

Infine, è stata fatta una media delle tre misure per ogni tecnica ed è stata assunta come larghezza di riferimento dav=1,65 mm.

MISURA	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	d4 (mm)	d5 (mm)	d_{av} (mm)
1	1,66	1,66	1,66	1,64	1,64	1,65
2	1,68	1,63	1,65	1,62	1,63	1,64
3	1,63	1,66	1,66	1,66	1,66	1,65

MISURA	Lbox(mm)	Area(mm^2)	d_{avArea} (mm)
1	20	32,56	1,63
2	20	33,48	1,67
3	20	33,74	1,69

$d_{avAreaTOT}$ (mm)	d_{avTOT} (mm)	$d_{avRiferimento}$
1,66	1,65	1,65

TABELLA 1 CALCOLO DAV

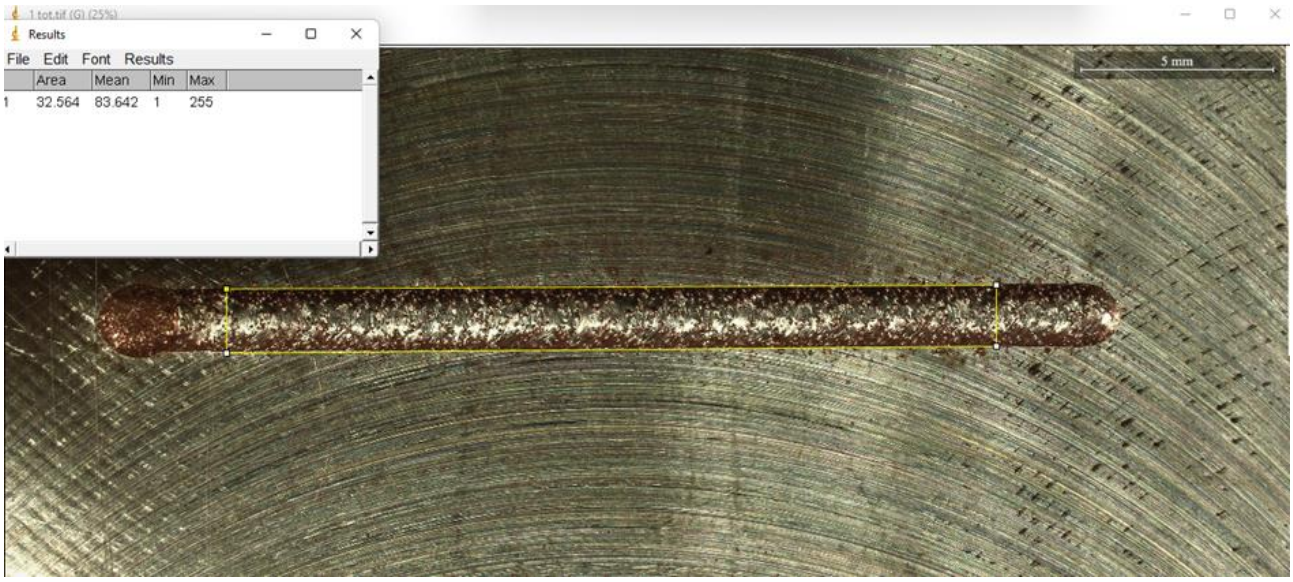


FIGURA 17 TECNICA DEL BOX DI MISURA

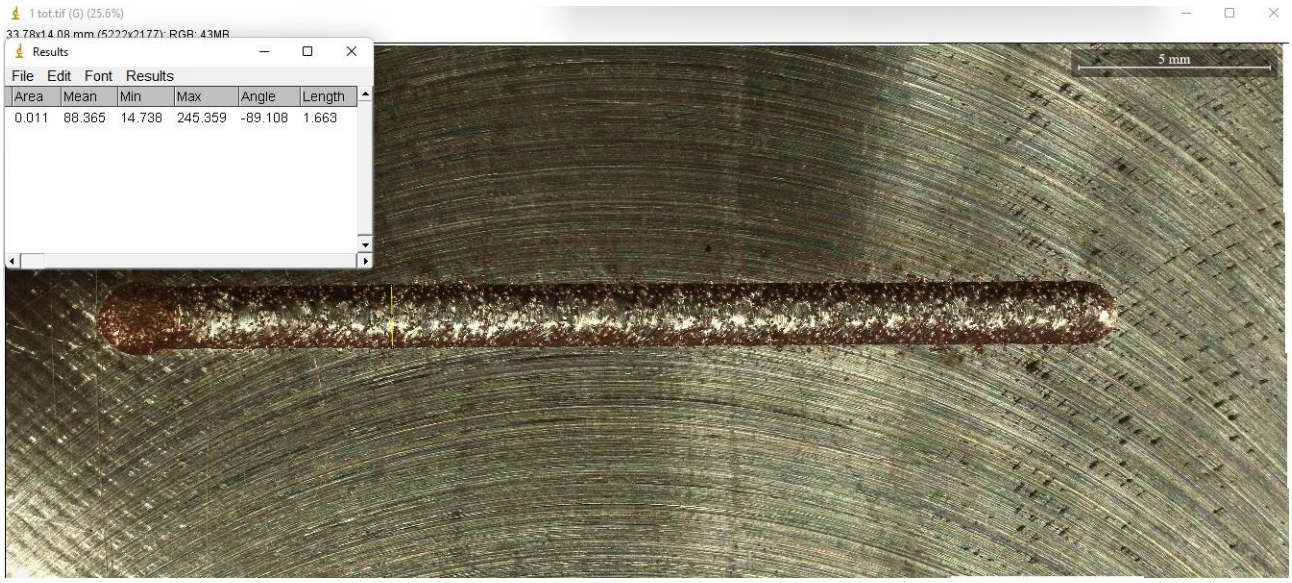


FIGURA 18 TECNICA DELLA MEDIA DELLE MISURE

Fase 2

Obiettivi

Per costruire un livello, è necessaria la sovrapposizione di strati. Nella maggior parte delle applicazioni di produzione additiva, o anche nei rivestimenti, è preferibile la strategia di sovrapposizione consecutiva. Questa è una strategia semplice poiché gli strati vengono depositati in sequenza. Sebbene gli strati sovrapposti consecutivi costituiscano la strategia più comune a causa della loro semplicità, presenta alcune limitazioni. Poiché il bordo dello strato depositato è vincolato su un solo lato, è asimmetrico rispetto all'asse verticale.

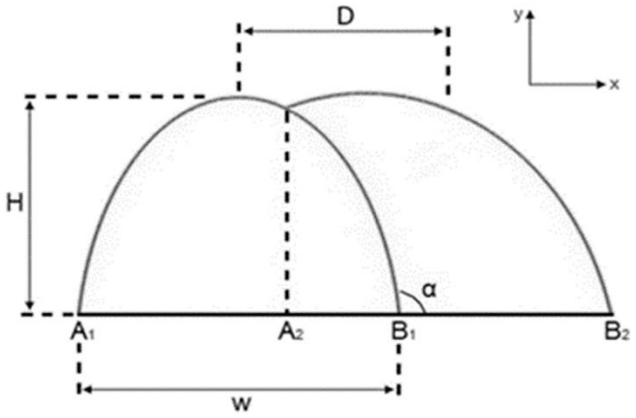


FIGURA 19 STRATEGIA DI DEPOSIZIONE CLASSICA CONSECUTIVA

Per ovviare a questo problema, è possibile adottare la strategia alternata di sovrapposizione degli strati. Con la strategia di sovrapposizione alternata, è possibile ottenere una migliore distribuzione del calore e, di conseguenza, una geometria più uniforme.

In questa strategia, la deposizione viene effettuata in due fasi. Gli strati del Gruppo 1 vengono depositati per prima e quelli del Gruppo 2 vengono depositati successivamente e posizionati tra quelli del Gruppo 1. Pertanto, a differenza della strategia di strati sovrapposti consecutivi, gli strati del Gruppo 2 presentano lo stesso livello di vincolo su entrambi i lati, il che si traduce in simmetria geometrica con la conseguente riduzione delle deformazioni *figura 20* e *figura 21*.

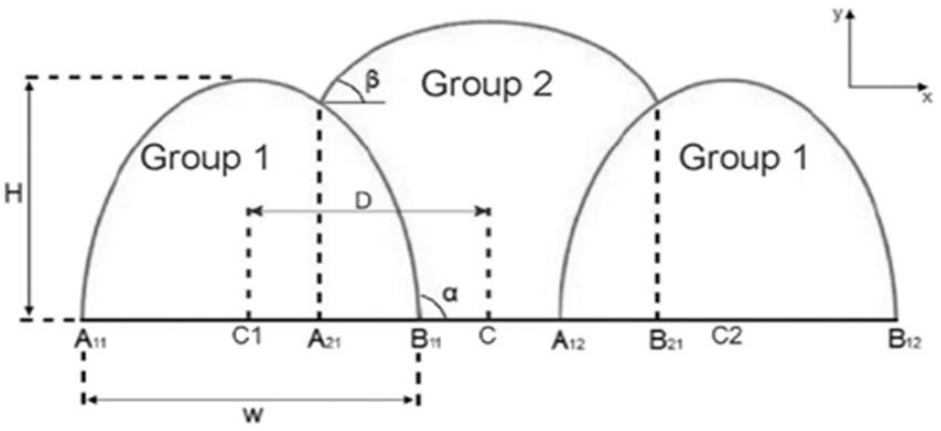


FIGURA 20 STRATEGIA DI DEPOSIZIONE ALTERNATA

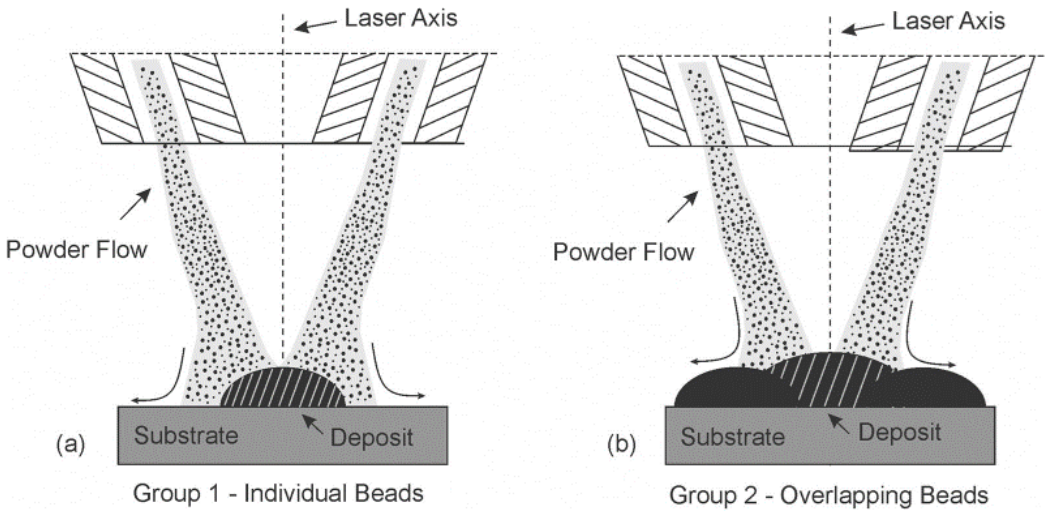


FIGURA 21 STRATEGIA DI DEPOSIZIONE ALTERNATA

L'obiettivo della seconda fase dello studio è stato quello di valutare la migliore soluzione per l'applicazione di una strategia di deposizione alternata, studiando deposizioni con distanza di sovrapposizione differenti, valutando la larghezza totale dei provini dtot, la larghezza delle 2 linee di deposizione superiori dsup (*figura 22*) e la rugosità della superficie.

Deposizione tracce

Nella seconda fase dello studio, sono state prodotte 6 deposizioni. È stato preso come riferimento la larghezza media della singola deposizione dav per cercare di ottimizzare una strategia di deposizione alternata. In questo caso sono state depositate dapprima 3 tracce ad una distanza d che è stata variata per ogni deposizione: il primo set di deposizione è avvenuto ad una distanza d=dav, il secondo a d=1,1dav, il terzo a d=1,2dav, il quarto a d=1,3dav, il quinto a d=1,4dav e l'ultimo provino a d=1,5dav. Successivamente sono state depositate in verso contrario altre 2 tracce in mezzo tra la deposizione 1-2 e 2-3 nell'ordine dato dalla numerazione in *figura* 22.

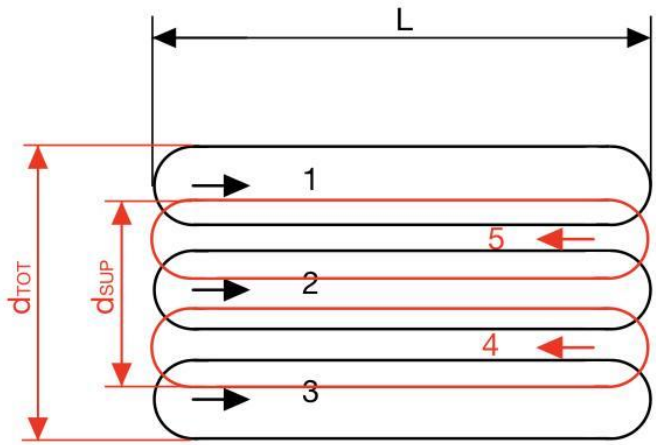


FIGURA 22 PARAMETRI SECONDA DEPOSIZIONE

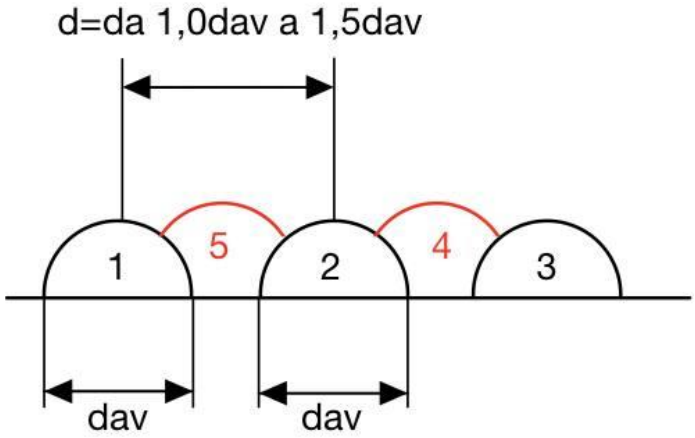


FIGURA 23 PARAMETRI SECONDA DEPOSIZIONE

FIGURA 24 DEPOSIZIONE 2

Acquisizione immagini allo stereomicroscopio

Dopo aver effettuato la deposizione, le tracce sono state analizzate al microscopio ottico digitale, facendo sempre due acquisizioni e unendole successivamente come si vede nelle *figure 26, 27, 28*.

Si evidenzia come all'aumentare della larghezza di traccia d, l'altezza del provino h diminuisce *figura 25*.

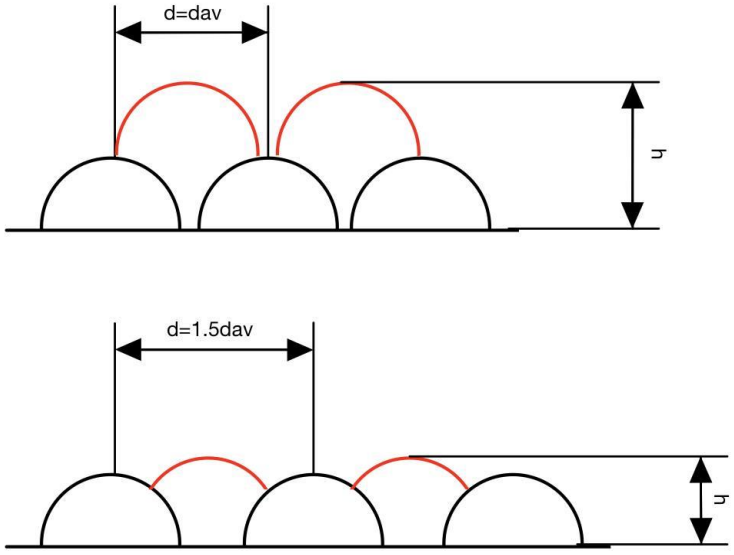


FIGURA 25 ALTEZZA H IN FUNZIONE DI DAV

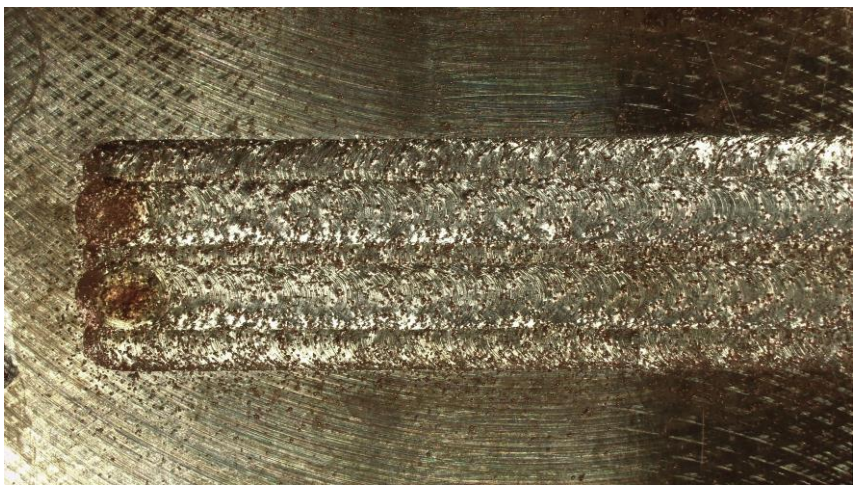


FIGURA 26 DEPOSIZIONE 2 SX

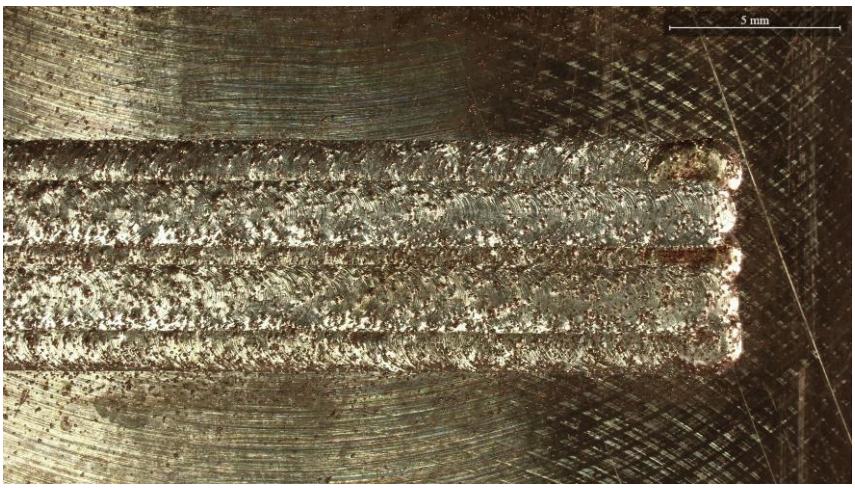


FIGURA 27 DEPOSIZIONE 2 DX

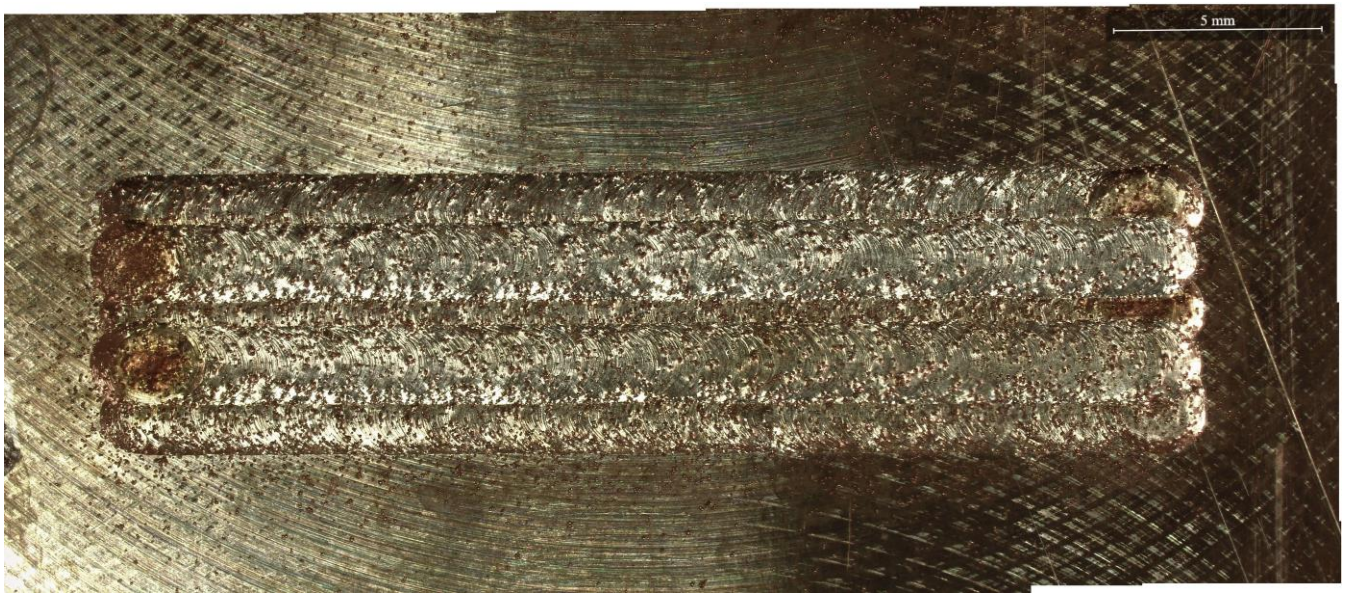


FIGURA 28 DEPOSIZIONE 2 COMPLETA

Misurazione larghezze delle tracce

Anche in questo caso dopo aver impostato la scala di ogni immagine sono state utilizzate due tecniche di acquisizione, per la misura della larghezza totale del campione dtot e della larghezza delle deposizioni superiori dsup.

Chiaramente aumentando la distanza dav tra le tracce sia dtot che dsup aumentano.

MISURA	Lbox	Area	$d_{TOTArea}$ (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	d4 (mm)	d5 (mm)	d_{TOT} (mm)
1	20	99,266	4,963	4,924	4,924	4,949	5,025	4,974	4,959
$1,1d_{AV}$	20	102,796	5,140	5,076	5,076	5,102	5,153	5,179	5,117
$1,2d_{AV}$	20	114,077	5,704	5,668	5,666	5,666	5,769	5,769	5,708
$1,3d_{AV}$	20	119,584	5,979	5,954	5,954	6,057	6,057	6,108	6,026
$1,4d_{AV}$	20	126,397	6,320	6,307	6,282	6,436	6,307	6,384	6,343
$1,5d_{AV}$	20	133,576	6,679	6,666	6,668	6,718	6,641	6,589	6,656

TABELLA 2 CALCOLO DTOT

MISURA	Lbox	Area	d_{SUP} (mm)
1	20	70,654	3,533
$1,1d_{AV}$	20	75,497	3,775
$1,2d_{AV}$	20	77,930	3,897
$1,3d_{AV}$	20	82,730	4,137
$1,4d_{AV}$	20	85,358	4,268
$1,5d_{AV}$	20	87,170	4,359

TABELLA 3 CALCOLO DSUP

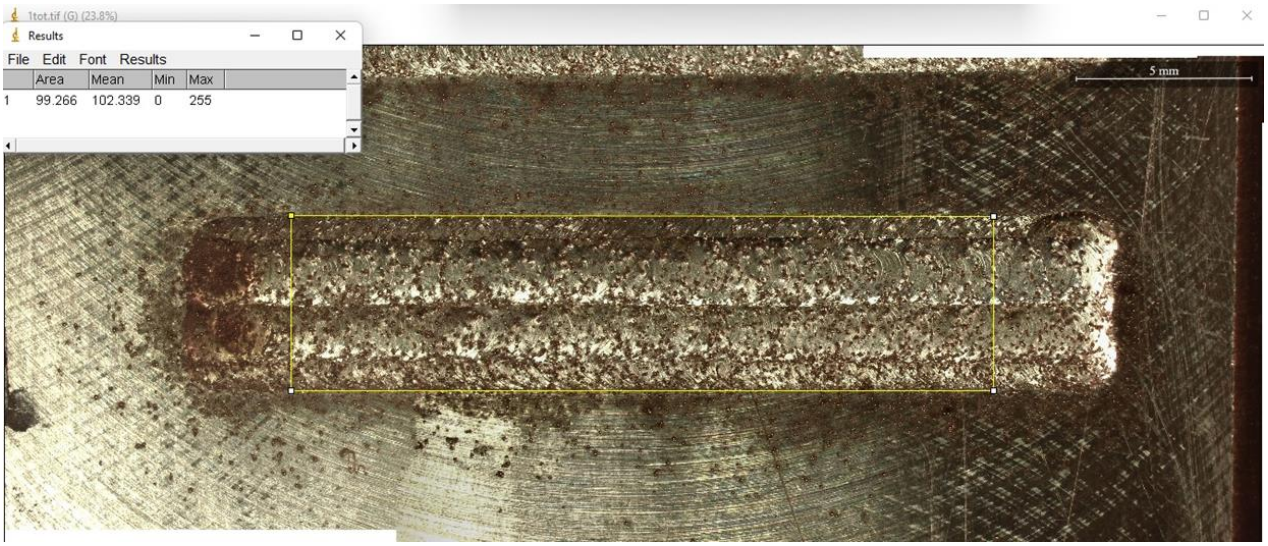


FIGURA 29 TECNICA BOX MISURA DTOT

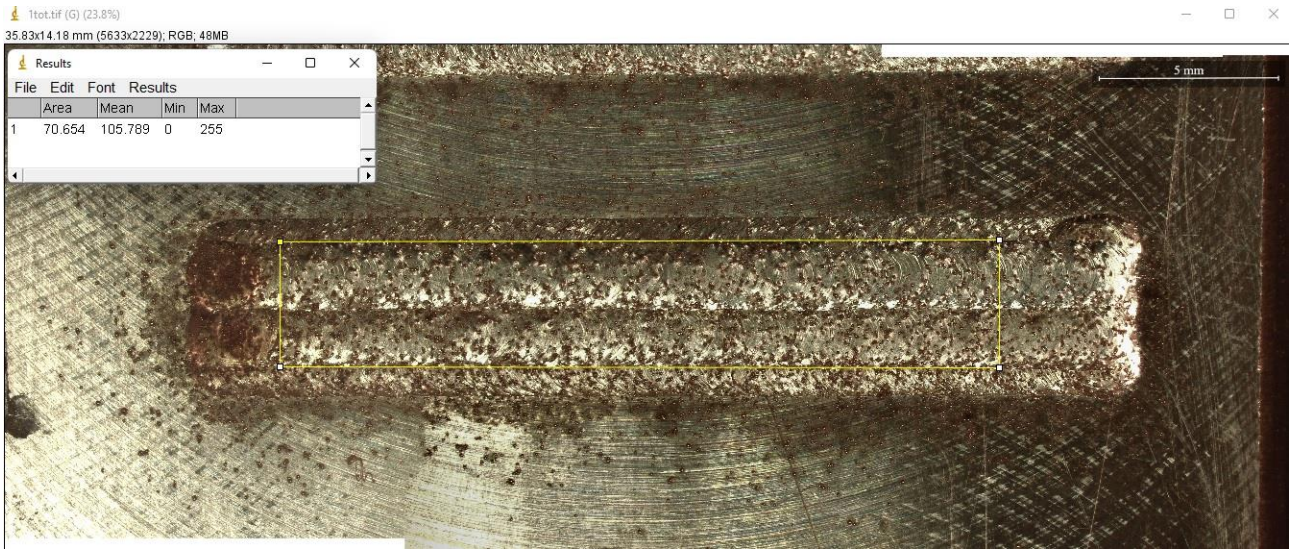


FIGURA 30 TECNICA BOX MISURA DSUP

Acquisizione rugosità

In seguito, sono state eseguite delle misurazioni sulla rugosità dei campioni depositati con un rugosimetro RTP80 della Sm Instruments (*figura 31*) che è composto da un'unità di calcolo e controllo e da un traslatore con un tastatore.

FIGURA 31 RUGOSIMETRO RTP80 SM INSTRUMENTS

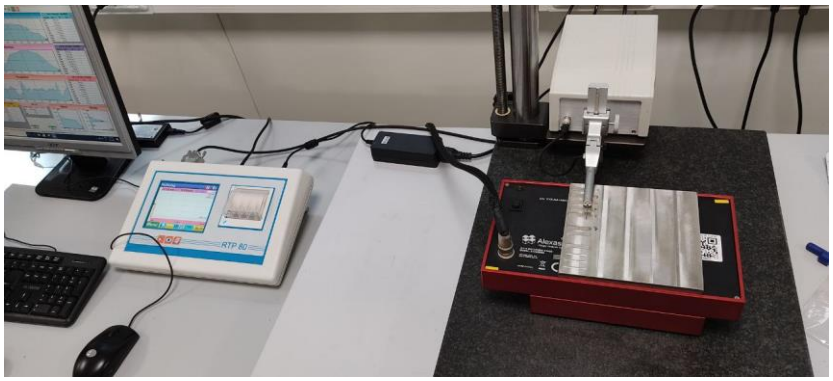


FIGURA 32 RUGOSIMETRO RTP80 CON UNITÀ DI CALCOLO

Con il rugosimetro sono state dunque effettuate due tipologie di misure: una orizzontale rispetto alla lunghezza del campione (*figura 33*) e una lungo la lunghezza del campione (*figura 34*) per fare un confronto tra i valori ottenuti.

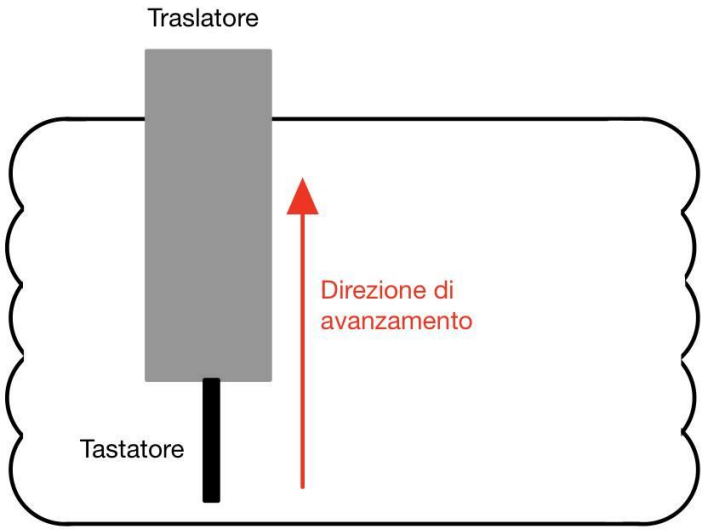


FIGURA 33 MISURA ORIZZONTALE RISPETTO ALLA LUNGHEZZA DEL CAMPIONE

Prima di effettuare la misurazione si deve impostare la lunghezza di cut-off del rugosimetro sull'unità di controllo, presa da normativa ISO 4288 a 0.8 in quanto la lunghezza di valutazione della rugosità è di circa 4 mm. Ad ogni successiva misura deve essere effettuato il posizionamento del tastatore sulla faccia. Una volta effettuato il posizionamento del tastatore, il traslatore avanza ed esegue la misura che può essere visualizzata sia direttamente sull'unità di controllo che su un pc esterno. La misura è data in termini di Ra,Rq,Rt,Rz,Wa,Wq,Wt.

- Ra viene definito come valore medio aritmetico degli scostamenti (presi in valore assoluto) del profilo reale della superficie rispetto alla linea media;
- Rq viene definito come media quadratica degli scostamenti dei punti del profilo dalla linea media;
- Rt viene definito come la somma della massima altezza di picco (Zp) e della misura massima della valle più profonda (Zv) nella lunghezza di valutazione (non della lunghezza di campionamento);
- Rz viene definito come la distanza tra due linee parallele alla linea media passanti mediamente fra i cinque picchi più alti e le cinque valli più basse, entro i limiti della lunghezza di base;
- Wa viene definito come media aritmetica dell'ondulazione;
- Wq viene definito come errore quadratico medio dell'ondulazione;
- Wt viene definito come altezza massima totale dell'ondulazione.

MISURA	Ra1	Ra2	Ra3	Ra_{Media}
$1d_{AV}$	4,63	2,736	3,701	3,689
$1,1d_{AV}$	5,339	4,542	4,417	4,766
$1,2d_{AV}$	3,878	6,184	6,209	5,424
$1,3d_{AV}$	3,074	4,925	4,334	4,111
$1,4d_{AV}$	6,96	5,712	4,765	5,812
$1,5d_{AV}$	6,434	4,033	7,948	6,138

TABELLA 4 VALORI RA

MISURA	Rq1	Rq2	Rq3	Rq_{Media}
$1d_{AV}$	6,339	4,003	4,618	4,987
$1,1d_{AV}$	7,151	6,085	6,558	6,598
$1,2d_{AV}$	5,528	9,442	8,201	7,724
$1,3d_{AV}$	4,083	7,005	5,917	5,668
$1,4d_{AV}$	8,468	7,403	6,122	7,331
$1,5d_{AV}$	8,353	5,378	9,93	7,887

TABELLA 5 VALORI RQ

MISURA	Rt1	Rt2	Rt3	Rt_{Media}
$1d_{AV}$	48,748	49,409	44,113	47,423
$1,1d_{AV}$	59,134	41,338	58,094	52,855
$1,2d_{AV}$	47,389	72,84	56,31	58,846
$1,3d_{AV}$	27,057	53,896	55,323	45,425
$1,4d_{AV}$	72,733	55,356	52,226	60,105
$1,5d_{AV}$	64,115	44,816	63,136	57,356

TABELLA 6 VALORI RT

MISURA	Rz1	Rz2	Rz3	Rz_{Media}
$1d_{AV}$	27,481	19,494	21,04	22,672
$1,1d_{AV}$	32,267	22,804	32,009	29,027
$1,2d_{AV}$	26,588	45,217	33,104	34,970
$1,3d_{AV}$	17,056	31,457	29,55	26,021
$1,4d_{AV}$	32,747	38,482	27,521	32,917
$1,5d_{AV}$	35,768	28,543	37,401	33,904

TABELLA 7 VALORI RZ

MISURA	Wa1	Wa2	Wa3	Wa_{Media}
$1d_{AV}$	26,446	25,954	25,71	26,037
$1,1d_{AV}$	24,714	24,845	19,303	22,954
$1,2d_{AV}$	21,498	12,677	20,982	18,386
$1,3d_{AV}$	22,637	22,701	20,019	21,786
$1,4d_{AV}$	21,466	13,897	23,404	19,589
$1,5d_{AV}$	9,416	9,003	15,488	11,302

TABELLA 8 VALORI WA

MISURA	Wq1	Wq2	Wq3	Wq_{Media}
$1d_{AV}$	32,294	34,893	32,632	33,273
$1,1d_{AV}$	29,256	29,218	23,056	27,177
$1,2d_{AV}$	25,82	14,736	26,072	22,209
$1,3d_{AV}$	27,955	27,402	23,987	26,448
$1,4d_{AV}$	25,481	16,995	27,48	23,319
$1,5d_{AV}$	11,476	10,554	17,904	13,311

TABELLA 9 VALORI WQ

MISURA	Wz1=Wt1	Wz2=Wt2	Wz3=Wt3	Wz_{Media}
$1d_{AV}$	130,309	141,813	125,585	132,569
$1,1d_{AV}$	117,423	109,234	96,893	107,850
$1,2d_{AV}$	82,627	51,004	91,599	75,077
$1,3d_{AV}$	99,152	86,992	87,067	91,070
$1,4d_{AV}$	86,098	59,264	85,668	77,010
$1,5d_{AV}$	42,649	37,203	62,076	47,309

TABELLA 10 VALORI WZ

Si può notare che non è presente un trend caratteristico all'aumentare della larghezza d tra le tracce per quanto riguarda i valori di Ra,Rq,Rt ed Rz mentre per quanto riguarda l'ondulazione Wa, Wq e Wt si osserva, come ci si aspettava, un decremento dei valori di ondulazione all'aumentare della distanza tra le tracce.

Per la seconda tipologia di misurazione (parallela alla lunghezza del campione) è stata utilizzata una lunghezza di cut-off di 0,8 mm x5 e di 2,5 mm x5 per uno spostamento massimo del rugosimetro rispettivamente di 4 mm e di 12,5 mm. Ma non è stato riscontrato alcun trend nei valori ottenuti come si evince anche dalla *tabella 13*, questo risultato era atteso in quanto le tracce sono state eseguite a parità di parametri di processo.

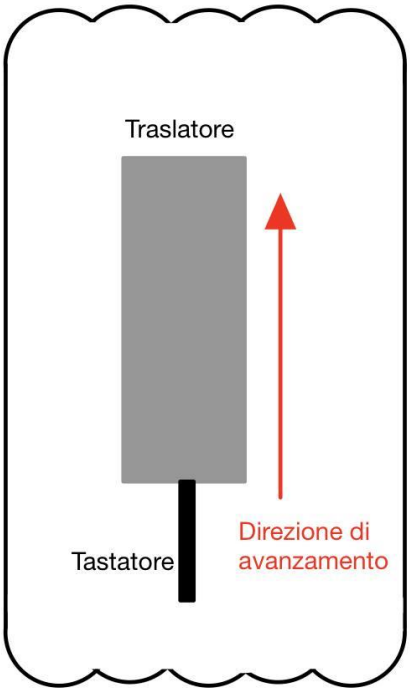


FIGURA 34 MISURA LUNGO LA LUNGHEZZA DEL CAMPIONE

Misurazione lato lungo [micron]				Cut-off	0,8	x5	
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
$1d_{AV}$	8,916	11,576	73,997	47,651	5,247	7,05	33,056
$1,1d_{AV}$	5,248	6,991	47,942	30,917	5,2	7,047	31,876
$1,2d_{AV}$	10,081	13,889	106,381	62,273	14,169	18,38	71,872
$1,3d_{AV}$	8,665	10,547	59,341	43,465	5,68	6,89	25,055
$1,4d_{AV}$	10,308	12,652	69,667	47,863	7,658	10,355	49,142
$1,5d_{AV}$	7,167	9,166	47,41	36,152	9,472	11,316	39,543
Media	8,398	10,804	67,456	44,720	7,904	10,173	41,757

TABELLA 11 VALORI RUGOSIMETRO CUT-OFF 0.8 X5

Misurazione lato lungo [micron]				Cut-off	2,5	x5	
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
$1d_{AV}$	11,324	13,797	82,372	60,156	6,743	8,201	27,838
$1,1d_{AV}$	10,442	13,953	74,973	64,613	7,094	8,272	30,695
$1,2d_{AV}$	14,631	19,651	129,965	94,618	4,551	5,607	21,571
$1,3d_{AV}$	12,38	16,481	96,677	76,847	5,619	7,7	33,661
$1,4d_{AV}$	9,27	12,645	91,448	68,608	7,25	8,716	35,783
$1,5d_{AV}$	10,805	14,268	100,506	65,3	10,12	11,571	44,255
Media	11,475	15,133	95,990	71,690	6,896	8,345	32,301

TABELLA 12 VALORI RUGOSIMETRO CUT-OFF 2.5 X5

Misurazione lato lungo [micron]				Cut-off	0,8	x5	
MISURA	Dev. Ra	Dev. Rq	Dev. Rt	Dev. Rz	Dev. Wa	Dev. Wq	Dev. Wt=Wz
$1d_{AV}$	0,367	0,546	4,625	2,072	1,879	2,208	6,153
$1,1d_{AV}$	2,227	2,696	13,799	9,760	1,912	2,210	6,987
$1,2d_{AV}$	1,190	2,182	27,524	12,412	4,430	5,803	21,294
$1,3d_{AV}$	0,189	0,181	5,738	0,888	1,573	2,321	11,810
$1,4d_{AV}$	1,351	1,307	1,563	2,222	0,174	0,129	5,222
$1,5d_{AV}$	0,870	1,158	14,175	6,059	1,109	0,808	1,566

TABELLA 13 DEVIAZIONE STANDARD RUGOSITÀ MISURAZIONE LONGITUDINALE

MISURA	RaMedia	RqMedia	RtMedia	Rz_{Media}	Wa_{Media}	Wq_{Media}	Wz_{Media}
Media misurazione trasversale	4,990	6,699	53,669	29,918	20,009	24,290	88,481
Media misurazione longitudinale	8,398	10,804	67,456	44,720	7,904	10,173	41,757

TABELLA 14 CONFRONTO RUGOSITÀ MEDIA MISURAZIONE TRASVERSALE E LONGITUDINALE

Dal confronto delle medie delle rugosità trasversale e longitudinale si nota che per quanto riguarda i valori di Ra, Rq, Rt ed Rz si hanno dei valori simili, mentre per le misurazioni di ondulazione Wa, Wq e Wz si nota che quelle prese longitudinalmente hanno valori più bassi, in quanto durante il percorso del tastatore non sono presenti picchi o valli molto accentuati, a differenza della misurazione trasversale che presenta un'ondulazione maggiore.

Taglio dei campioni

In seguito, i provini sono stati tagliati con il metodo dell'elettroerosione a filo WEDM, il macchinario è una BAOMA BMW-3000 *figura 35*. Il taglio è avvenuto perpendicolarmente alla lunghezza delle tracce, in modo da poter osservare la sezione delle singole tracce.

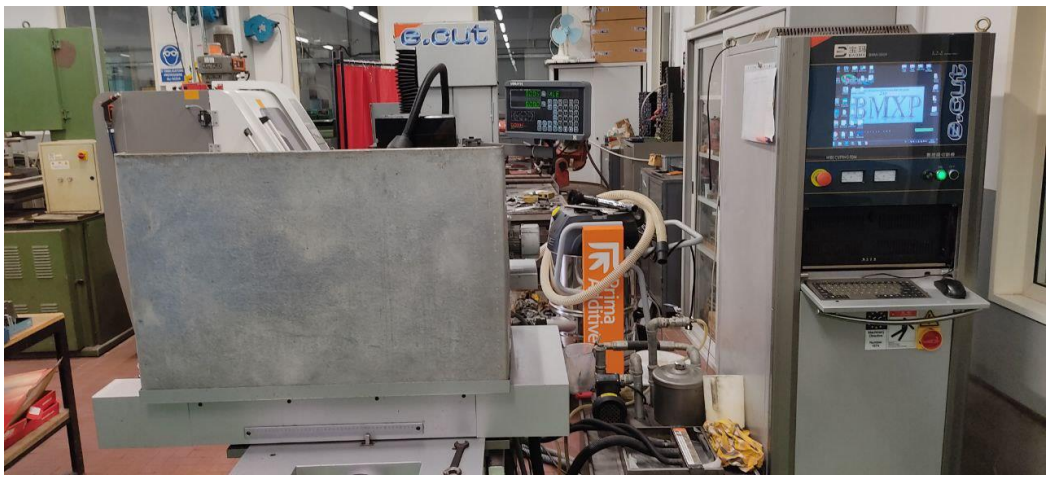


FIGURA 35 WEDM BAOMA BMW-3000

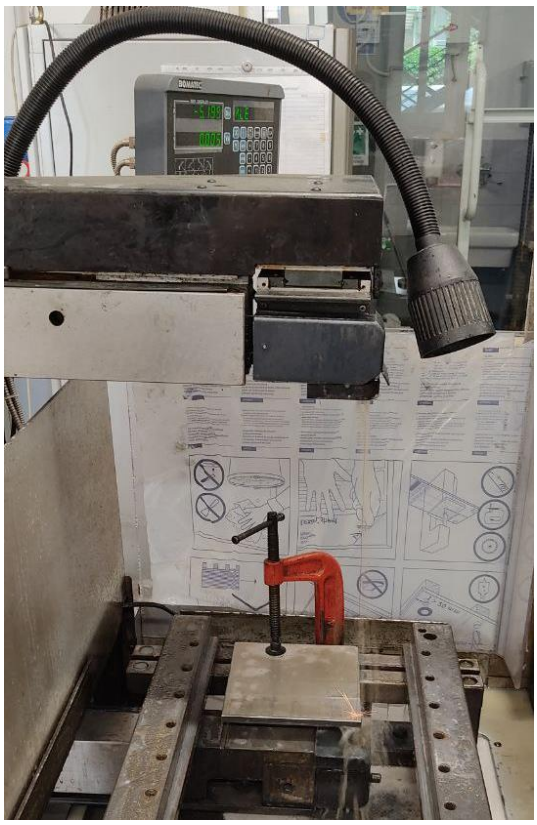


FIGURA 36 TAGLIO PROVINI WEDM

FIGURA 37 TAGLIO PROVINI WEDM

Inglobamento in resina dei campioni

Dopo aver tagliato i provini, è stato necessario eseguire un inglobamento in resina dei campioni per avere una maggiore superficie del campione e dunque consentire una lucidatura più uniforme.

Per inglobare i campioni essi sono stati posizionati in dei cilindri di diametro 25 mm con la faccia, in cui si trova la sezione delle tracce, rivolta verso il basso come si vede in *figura 38*.

FIGURA 38 PREPARAZIONE DEI CILINDRI PER INGLOBAMENTO

La resina è stata prodotta con un kit della ''Presi'' *(figura 39)* attraverso la miscelazione di una polvere e un catalizzatore liquido: 2 parti di polvere e 1 parte di liquido.

FIGURA 39 KIT RESINA PRESI

Una volta ottenuto il composto e opportunamente miscelato, è stato colato nei cilindri contenenti i campioni.

FIGURA 40 RESINA COLATA ALL'INTERNO DEI CILINDRI

In seguito, sono stati lasciati indurire ottenendo così i campioni cilindrici inglobati con resina trasparente come in *figura 41*.

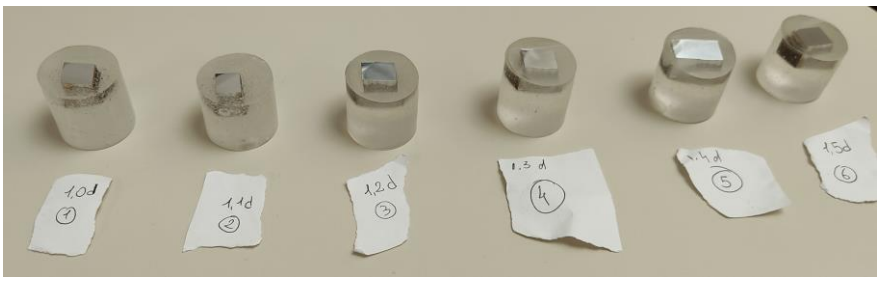


FIGURA 41 CAMPIONI CILINDRICI INGLOBATI CON RESINA

Lucidatura dei campioni

Per poter osservare bene al microscopio la sezione dei provini è stato necessario effettuare una lucidatura abbastanza spinta. La lucidatura è stata effettuata con una lucidatrice della ''Presi, Minitech 250 sp1'' che è una lucidatrice che fa ruotare dei dischi abrasivi (fino a 300 rpm) su cui vengono premuti i campioni da lucidare, come lubrificante viene utilizzata dell'acqua.

FIGURA 42 LUCIDATRICE MINITECH 250 SP1 PRESI

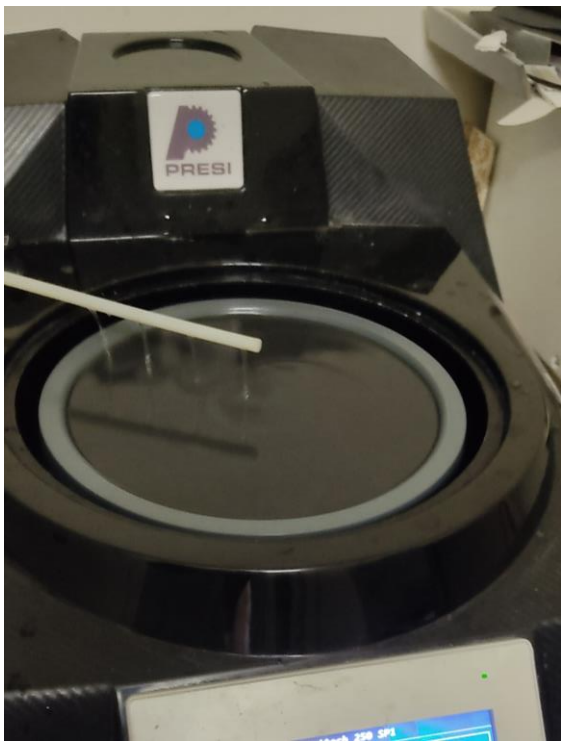


FIGURA 43 LUCIDATRICE MINITECH 250 SP1 PRESI

I dischi abrasivi sono in ordine di utilizzo con grana: 180, 320, 600, 800, 1200, 2400, 4000.

FIGURA 44 DISCHI ABRASIVI PER LUCIDATRICE

Una volta terminata la lucidatura i campioni sono diventati ''a specchio'' ed è stato possibile analizzarli al microscopio.

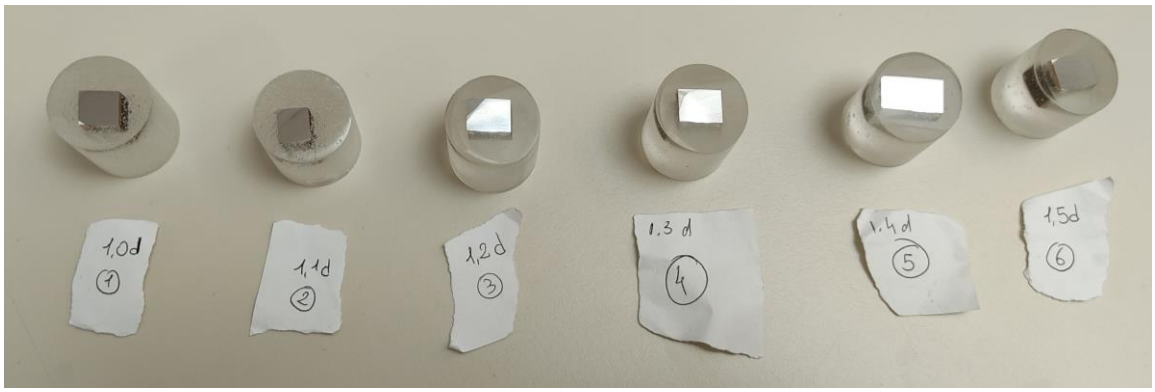


FIGURA 45 CAMPIONI CILINDRICI LUCIDATI

Acquisizione immagini allo stereomicroscopio

Una volta ottenuti i campioni lucidati sono stati portati al microscopio per acquisire le immagini delle sezioni per poter misurare l'altezza delle tracce.

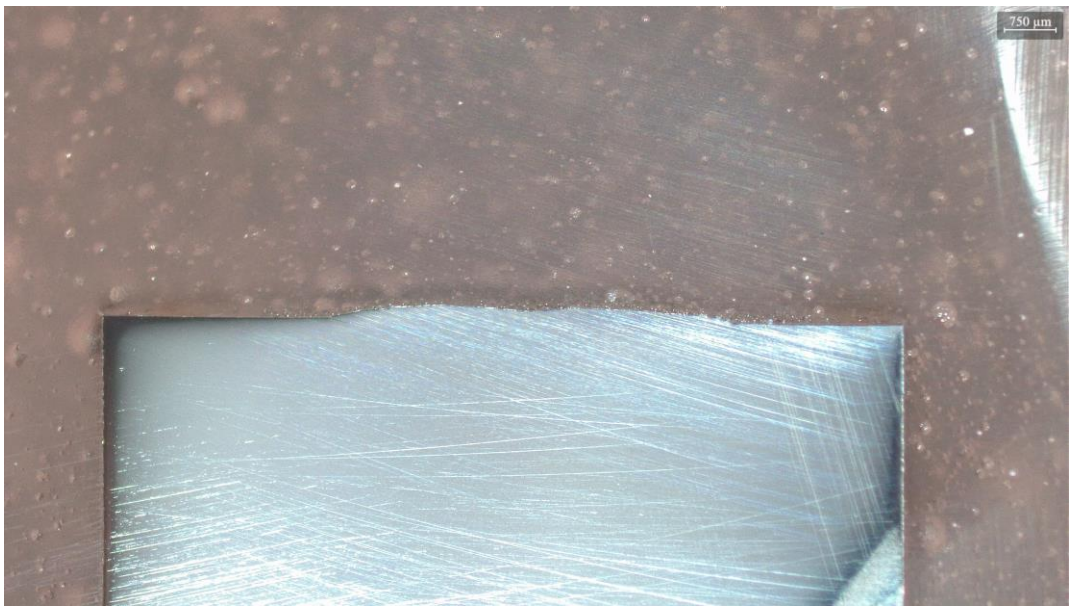


FIGURA 46 SEZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO

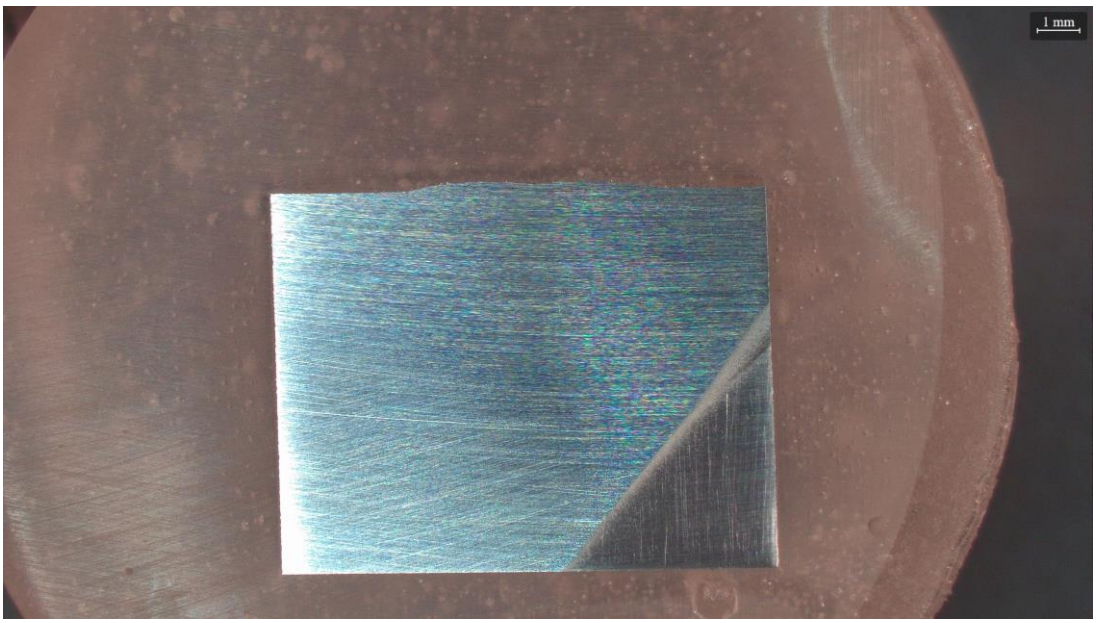


FIGURA 47 SEZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO

Misura altezza delle tracce

L'altezza di deposizione è un parametro molto importante per la progettazione di componenti più complessi, in quanto ci consente di capire di quanto si deve alzare la testa di deposizione (asse Z) ad ogni superficie depositata. Quindi la misura è stata effettuata creando dapprima due linee di riferimento sulle acquisizioni prese al microscopio. Come si vede in figura la linea inferiore è una linea che rappresenta la base del campione quindi sullo stesso livello della piastra di base. Per quanto riguarda invece la linea superiore, come si vede in figura, è stata presa interpolando i due massimi delle deposizioni presenti sul campione. Dunque, prendendo come riferimento queste due linee con il software ImageJ sono state prese 3 misure, 2 sui picchi e una nella mezzeria, come si vede in figura, di cui è stata fatta la media e lo scarto massimo.

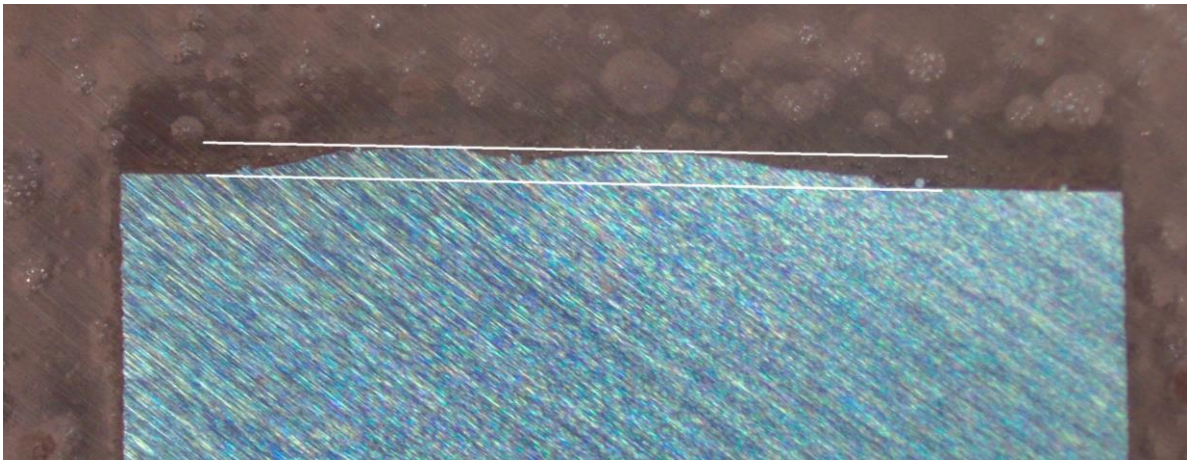


FIGURA 48 MISURA ALTEZZA DI TRACCIA

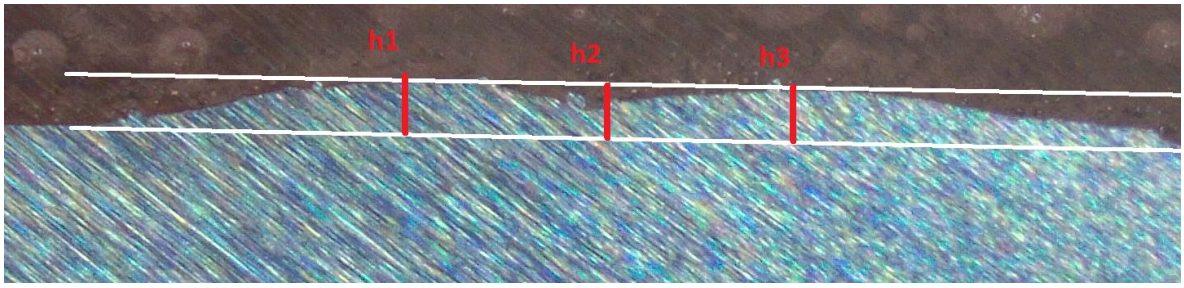


FIGURA 49 MISURA ALTEZZA DI TRACCIA

Come si può osservare l'altezza delle tracce diminuisce all'aumentare della distanza di deposizione e anche lo scarto minore tra le tracce si ha nell'ultimo campione con una distanza tra le tracce di 1.5dav.

L'ultimo campione sembra essere la soluzione migliore per quanto riguarda la corretta geometria di deposizione, ma si deve tenere in conto anche l'elevato valore di passate, dato da un'altezza per passata minore, e quindi di tempo che impiegherebbe la macchina per depositare utilizzando una distanza tra le linee di deposizione così grande.

Dunque, la scelta della distanza tra le linee di deposizione dovrà essere un compromesso tra diversi fattori.

MISURA	h1	h2	h3	h_{Media}	h_{Max}	Scartomax
$1d_{AV}$	0,274	0,261	0,274	0,270	0,274	0,013
$1,1d_{AV}$	0,274	0,270	0,262	0,269	0,274	0,012
$1,2d_{AV}$	0,258	0,226	0,242	0,242	0,258	0,032
$1,3d_{AV}$	0,247	0,239	0,231	0,239	0,247	0,016
$1,4d_{AV}$	0,207	0,215	0,223	0,215	0,223	0,016
$1,5d_{AV}$	0,160	0,152	0,152	0,155	0,160	0,008

TABELLA 15 ALTEZZA DI TRACCIA

Fase 3

Obiettivi

Dopo le precedenti prove, si è convenuto che la soluzione migliore in termini di tempo impiegato a depositare e qualità delle tracce è con una distanza intertraccia di 1,25*dav.

Dunque, l'obiettivo principale della terza fase è la determinazione dei parametri di altezza di traccia e larghezza di traccia del campione ottimale per poi poter effettuare un confronto con le successive fasi dello studio.

Deposizione tracce

È stata eseguita dunque una deposizione uguale ai test precedenti con una distanza tra le tracce di 1.25*dav. Anche in questo caso sono state acquisite con il rugosimetro le misure di rugosità e ondulazione. Con i rispettivi grafici.

In questo caso le tracce sono risultate molto più uniformi rispetto ai casi precedenti. Questo può essere dovuto a una molteplicità di fattori (piastra di base fredda, Power feeder utilizzato, temperatura della stanza che si è visto influenzare pesantemente lo scambiatore di calore del laser).

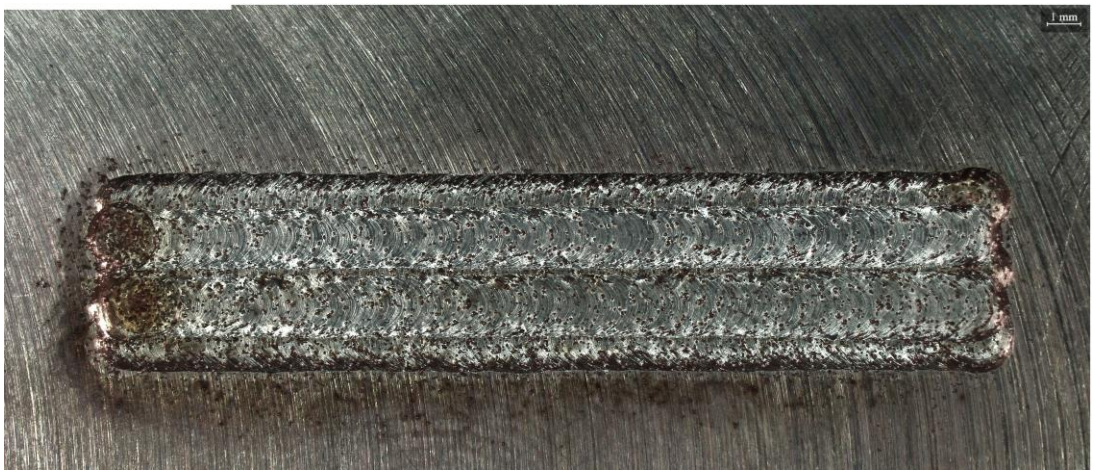


FIGURA 50 TRACCIA 1.25 DAV

Acquisizione al rugosimetro

Dalle misurazioni prese dal rugosimetro è stato possibile ricavare i profili delle tracce, in quanto il rugosimetro quando esegue la misura tiene traccia delle coordinate del tastatore lungo x e y. Utilizzando questa serie di coordinate è possibile plottare un grafico del profilo.

Inoltre, lo strumento è in grado di plottare 3 grafici diversi. Il grafico primario, che è esattamente il percorso seguito dal tastatore, in cui è inglobata l'ondulazione e la rugosità superficiale, gli altri 2 grafici, rugosità e ondulazione sono ottenuti grazie ad un filtro integrato nello strumento che è in grado di separare le 2 misurazioni, come si evince dalle *figure 51, 52, 53*.

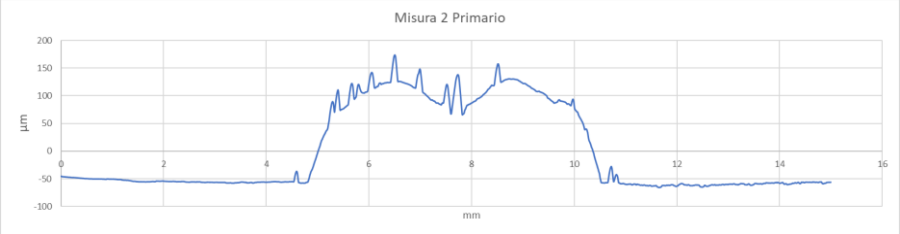


FIGURA 51 PROFILO PRIMARIO

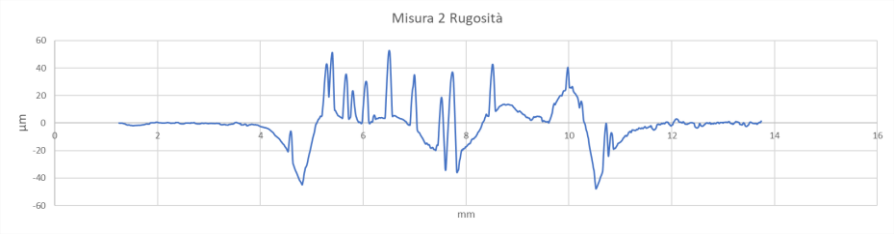


FIGURA 52 PROFILO RUGOSITÀ

FIGURA 53 PROFILO ONDULAZIONE

Misurazione altezza di traccia

In questo caso si è voluta calcolare l'altezza di traccia direttamente dai profili acquisiti dal rugosimetro. Questo è stato possibile dal grafico dell'ondulazione in cui l'altezza è stata ottenuta facendo una differenza tra il massimo e una media dei valori di altezza della piastra di base come evidenziato in figura. Queste misurazioni sono state effettuate tra la piastra di base e 3 picchi (h1, h2, h3) ed è stata fatta una media.

FIGURA 54 MISURA ALTEZZA DI TRACCIA DA PROFILO DI ONDULAZIONE

MISURA	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h_{Media} [mm]	h_{Max} [mm]
1,25d	0,200	0,179	0,209	0,196	0,209

TABELLA 16 ALTEZZA DI TRACCIA

Per confrontare questa altezza con quelle ricavate dal test 2 sono state acquisite le altezze dei provini del test 2 anche attraverso i profili per avere un confronto basato sulla stessa tecnica di misurazione.

Da Profili Test 2		
MISURA	h_{Media}	h_{Max}
$1d_{AV}$	0,222	0,226
$1,1d_{AV}$	0,213	0,219
$1,2d_{AV}$	0,211	0,215
$1,3d_{AV}$	0,207	0,209
$1,4d_{AV}$	0,204	0,208
$1,5d_{AV}$	0,140	0,145

TABELLA 17 ALTEZZA DI TRACCIA FASE 2 DA PROFILI

Da questo confronto si evince che la traccia depositata nel test 3 è leggermente più bassa rispetto a quanto ci si aspettava dal test 2, questo è dovuto molto probabilmente al powder feeder differente utilizzato per le 2 deposizioni e al fatto che per la deposizione del test 3 la piastra era fredda e dunque l'efficienza di deposizione era minore.

Misurazione larghezza di traccia

Dopo aver impostato la scala dell'immagine con ImageJ sono state acquisite la larghezza totale del campione dtot e della larghezza delle deposizioni superiori dsup. In questo caso le misure di larghezza rientrano perfettamente in quelle del test 2 tra 1,2dav e 1,3dav.

MISURA	Lbox	$Area_{TOT}$	$d_{TOTArea}$ (mm)	$Area_{SUP}$	d_{SUP} (mm)
1,25dav	20	116,579	5,829	78,135	3,907

TABELLA 18 LARGHEZZA DI TRACCIA

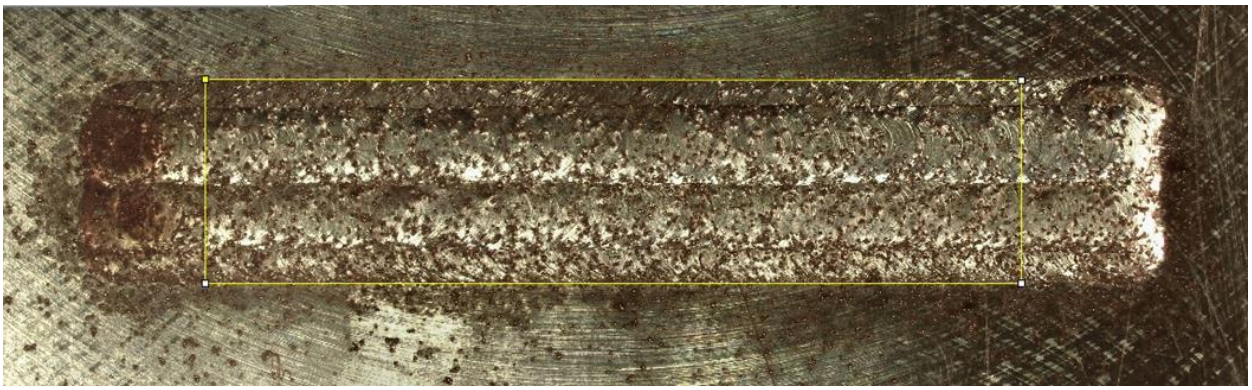


FIGURA 55 TECNICA DEL BOX DI MISURA

Fase 4

Studio della strategia

Dopo aver selezionato la distanza tra le tracce ideale, è stato possibile progettare una strategia di deposizione che fosse in grado di unire tutte le peculiarità delle strategie presenti in letteratura per depositare un parallelepipedo di base 25x25 mm e altezza 10 mm.

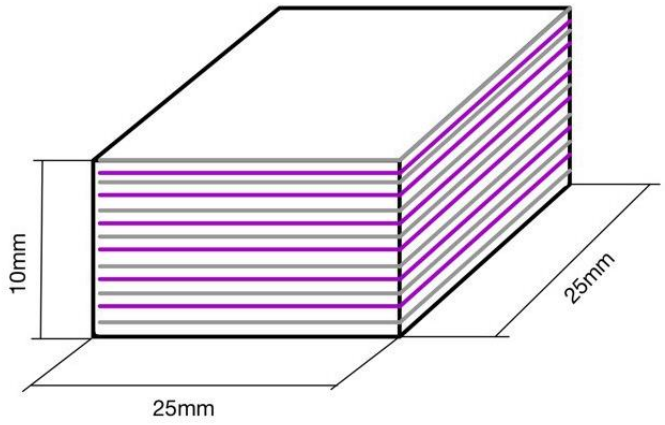


FIGURA 56 PARALLELEPIPEDO FASE 4

La strategia studiata è una doppia spirale alternata con una rotazione di 90° per layer e contour esterno. La doppia spirale serve per uniformare la deposizione, la deposizione alternata serve per aumentare la precisione geometrica del prodotto stampato, in quanto la linea di deposizione ha sempre 2 vincoli idealmente uguali per entrambi i lati, la rotazione di 90° serve per fare acquisire al prodotto una maggiore rigidezza in ogni direzione, mentre il contour esterno ha il compito di migliorare la geometria del campione delimitando in maniera uniforme il campione (inserisce un vincolo uguale in tutti i lati).

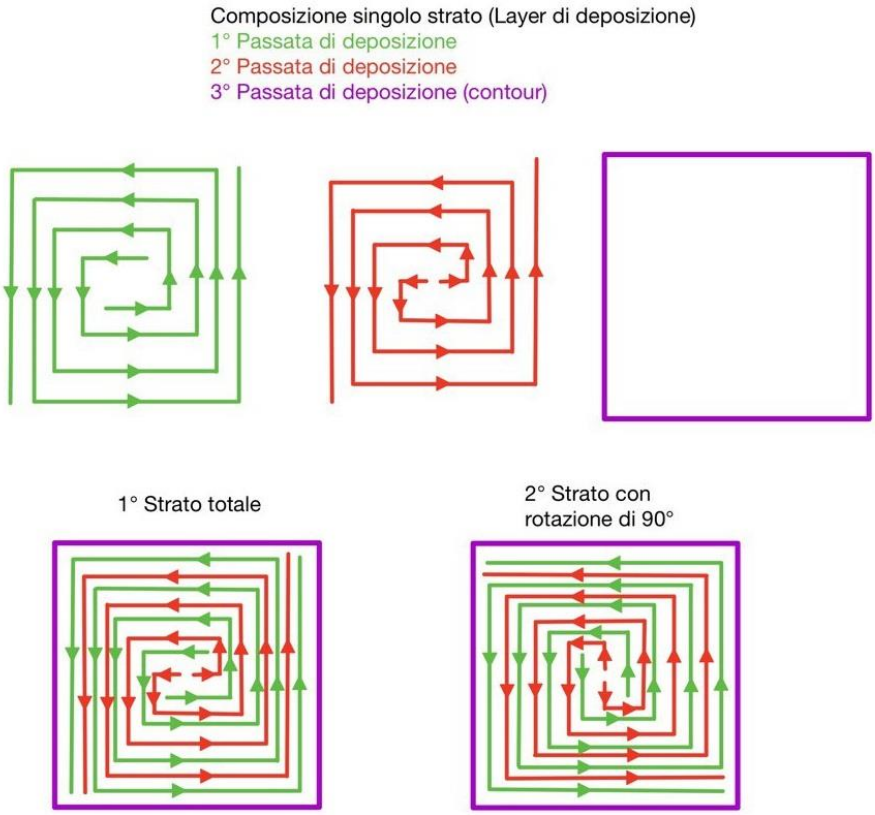


FIGURA 57 SINGOLO LAYER

Dopo aver calcolato le distanze esatte per ogni linea di deposizione che va a creare lo strato, è stato fatto un disegno su cad dei singoli layer. Successivamente il file con i disegni in 2d degli strati è stato esportato sul programma Mastercam con cui è stato estrapolato il G-code che è stato opportunamente analizzato e modificato per evitare errori e successivamente immesso nella macchina DED per la stampa. Nella costruzione di ogni strato è stata rispettata la distanza di 1.25d per ogni linea di deposizione del singolo layer. Come si evince dall'immagine quando due layer consecutivi si sovrappongono sono presenti sulle diagonali del parallelepipedo delle zone in cui il materiale è depositato in due direzioni ortogonali tra loro, questa sovrapposizione tende a far aumentare maggiormente la rigidezza del materiale.

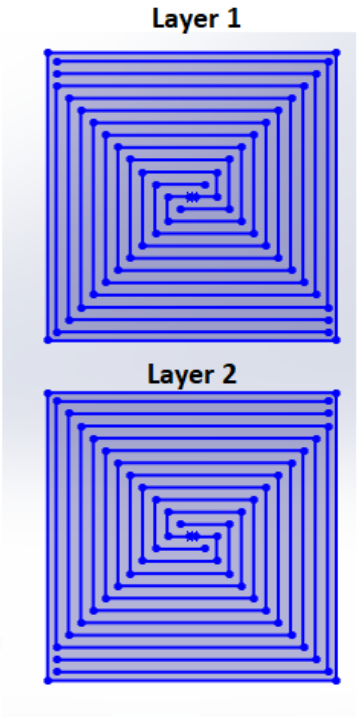


FIGURA 58 LAYER 1 E 2

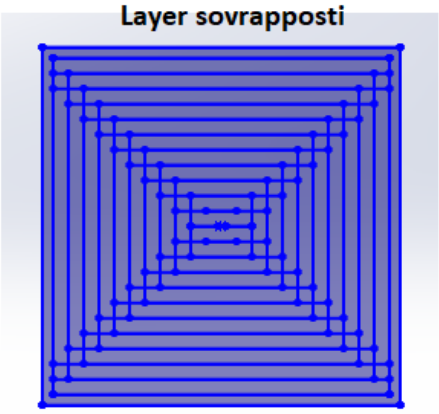


FIGURA 59 LAYER 1 E 2 SOVRAPPOSTI

Deposizione parallelepipedo

Sono state dunque eseguite con gli stessi parametri di processo dei test precedenti, 4 deposizioni; 2 con sollevamento della testa di deposizione per ogni layer di 0,35 mm e 2 con sollevamento della testa di deposizione per ogni layer di 0,50 mm. Questa altezza di sollevamento è diversa dall'altezza della singola traccia dei casi precedenti perché anche se la singola traccia, come visto nel Test 3 ha un'altezza di 0,209 mm bisogna tenere in considerazione l'aumento di efficienza dovuto all'utilizzo prolungato del laser (rispetto alla deposizione di una singola traccia) che produce un aumento di altezza della traccia.

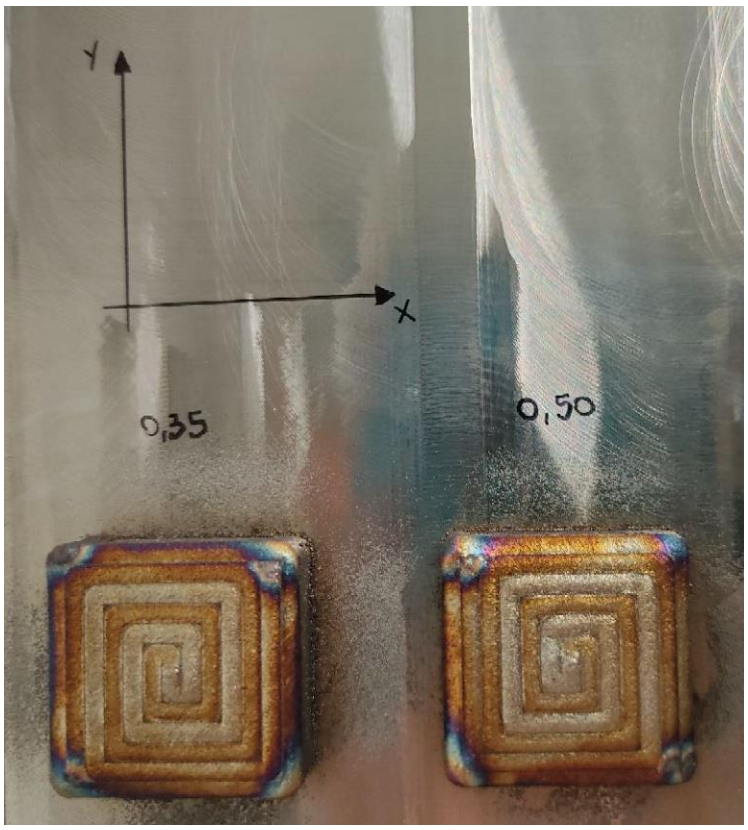


FIGURA 60 PARALLELEPIPEDI VISTA SUPERIORE

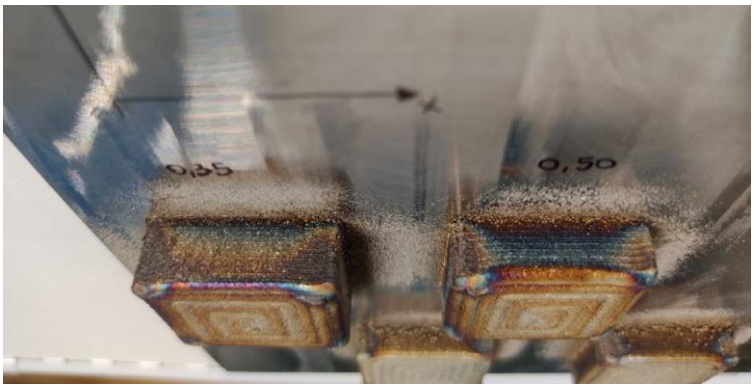


FIGURA 61 PARALLELEPIPEDI VISTA LATERALE

Acquisizione immagini allo stereomicroscopio

Dopo aver stampato i 4 campioni sono stati osservati allo stereomicroscopio con i risultati ottenuti nelle *figure 62, 63, 64, 65*.

Come si evince dalle acquisizioni è evidente la colorazione accesa sia sulla faccia superiore che sulle facce laterali che è uguale su ogni lato del parallelepipedo. Il manifestarsi di questa zona termicamente alterata può portare problemi alla resistenza meccanica e alla corrosione influenzando le proprietà meccaniche del materiale.

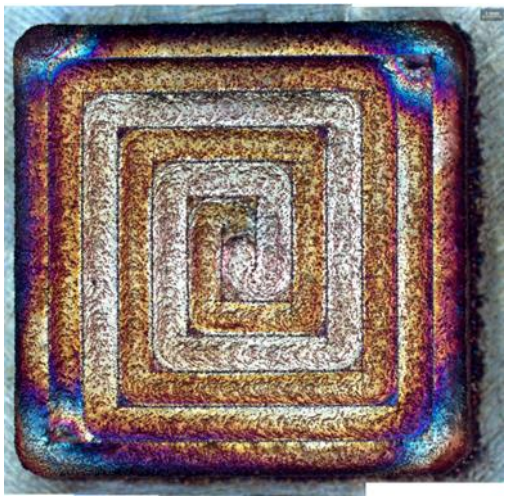


FIGURA 62 PARALLELEPIPEDO 0.35 MM VISTA SUPERIORE STEREOMICROSCOPIO

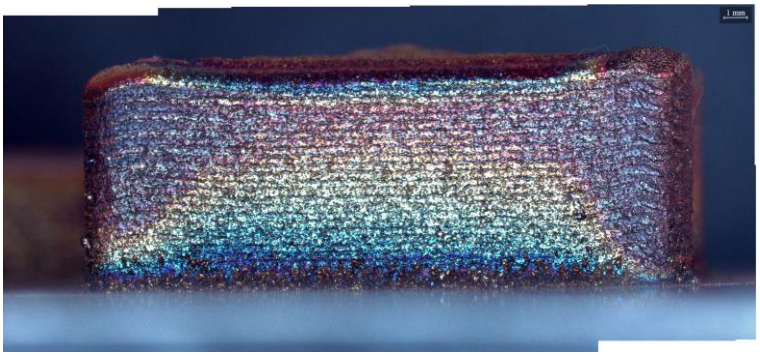


FIGURA 63 PARALLELEPIPEDO 0.35 MM VISTA LATERALE STEREOMICROSCOPIO

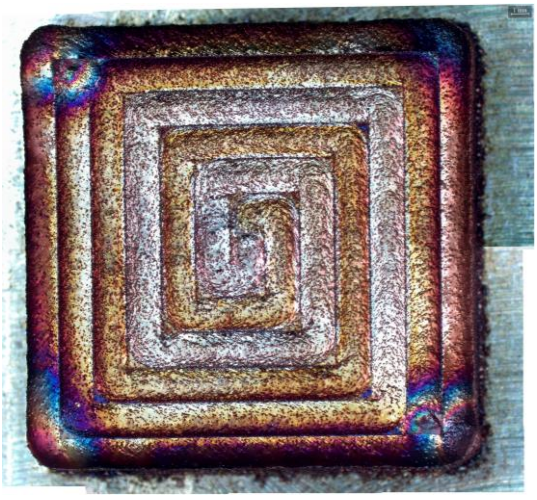


FIGURA 64 PARALLELEPIPEDO 0.50 MM VISTA SUPERIORE STEREOMICROSCOPIO

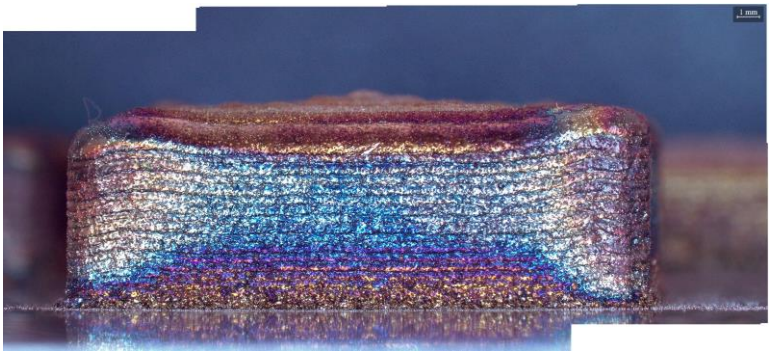


FIGURA 65 PARALLELEPIPEDO 0.50 MM VISTA LATERALE STEREOMICROSCOPIO

Colorazione degli ossidi

Si può avere un feedback immediato delle temperature raggiunte da un componente quando lo si realizza analizzando i colori degli ossidi sulla sua superficie, detti Heat Tint. In base alla composizione chimica del materiale ed in particolare al contenuto di cromo nell'acciaio (questo metallo aumenta la resistenza del materiale all'ossidazione, quindi anche la colorazione sarà meno accentuata o rallentata), al livello di ossigeno (l'uso di gas di protezione riduce la colorazione perché protegge in parte il metallo dall'ossidazione) e alla rugosità (una maggiore rugosità della superficie aumenta la velocità di ossidazione e rende i colori più intensi), le temperature a cui si registrano cambiamenti di colore nell'acciaio variano. Per valutare queste zone si sono presi in considerazione i dati dell'AISI 304 in cui si trascurano le differenze con l'AISI 316L. Le colorazioni a cui si assiste e le relative temperature in cui si registrano tali colorazioni sono:

- 290°C - giallo chiaro
- 340°C - giallo paglierino
- 370°C - giallo intenso
- 390°C - marrone
- 420°C - marrone violaceo
- 450°C - viola scuro
- 540°C - blu
- 600°C - blu scuro

Test 4 campione 1 (0,35 mm)

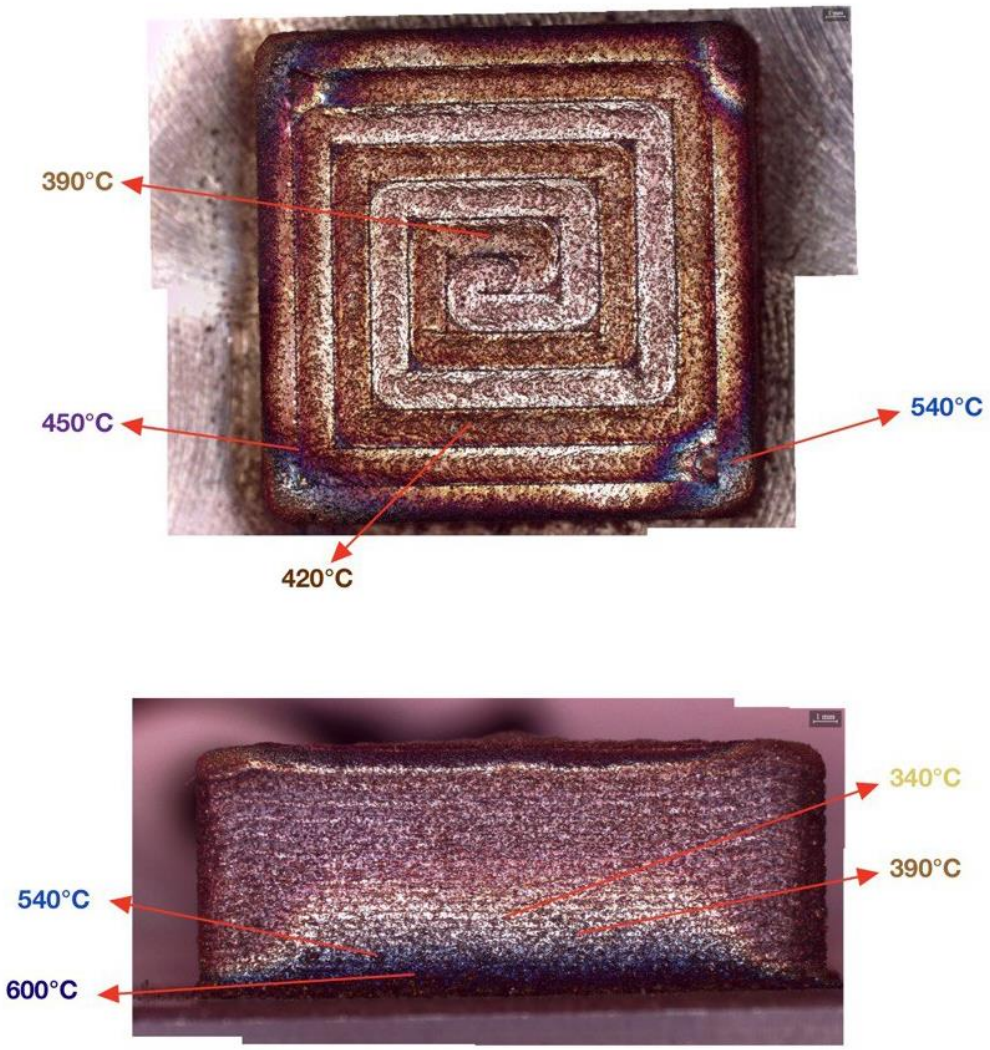


FIGURA 66 COLORAZIONE OSSIDI TEST 4 CAMPIONE 1 0.35 MM

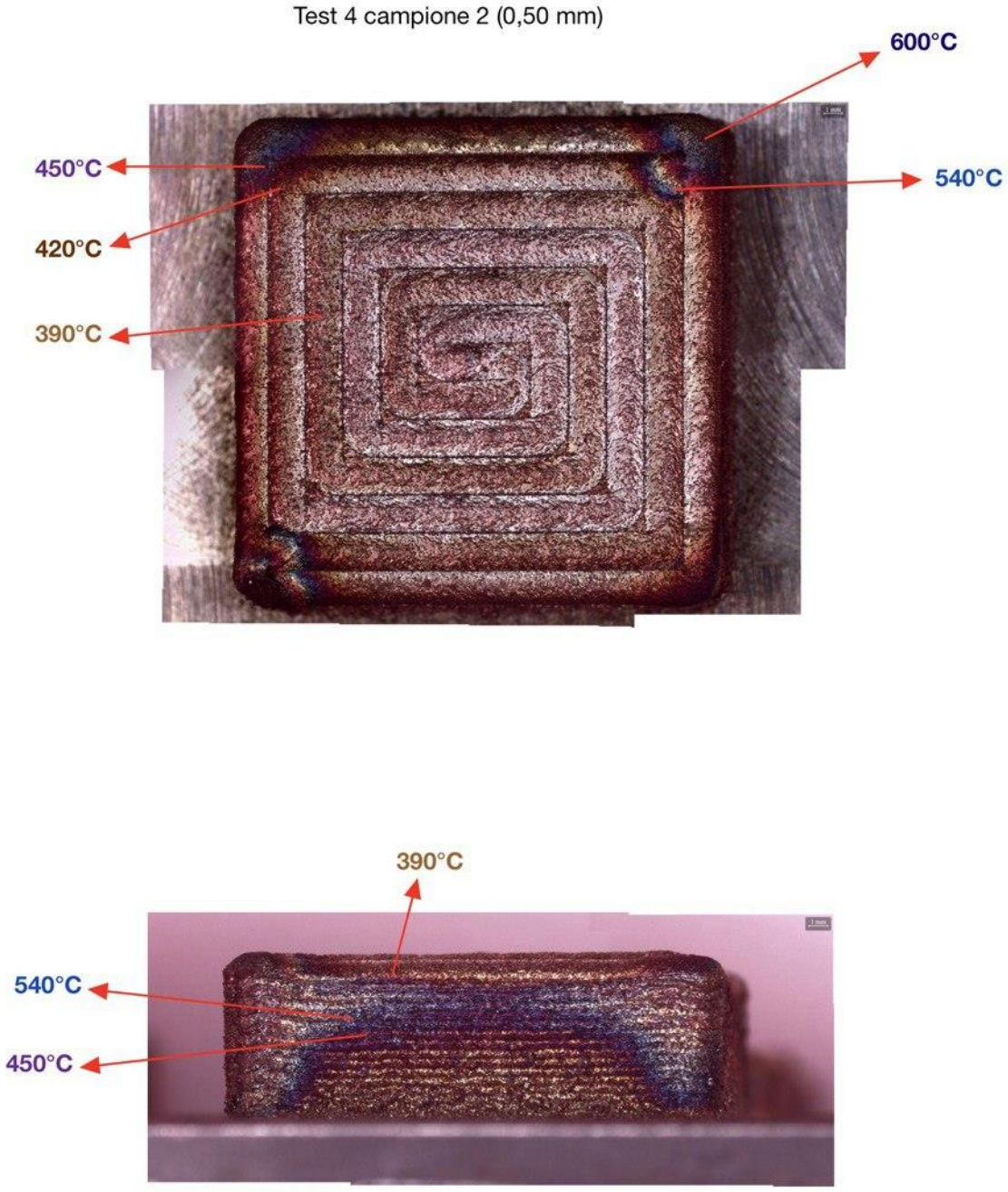
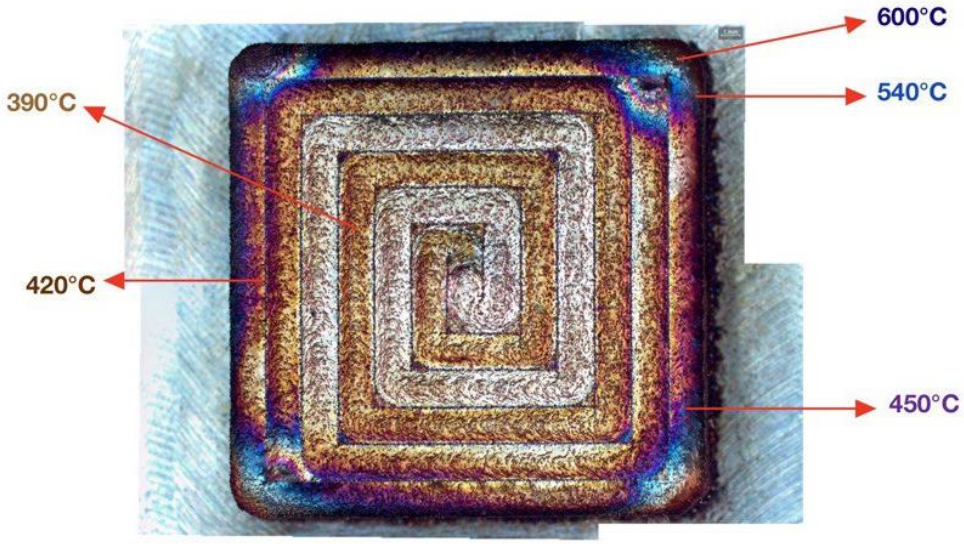


FIGURA 67 COLORAZIONE OSSIDI TEST 4 CAMPIONE 2 0.50 MM

Test 4 campione 3 (0,35 mm)



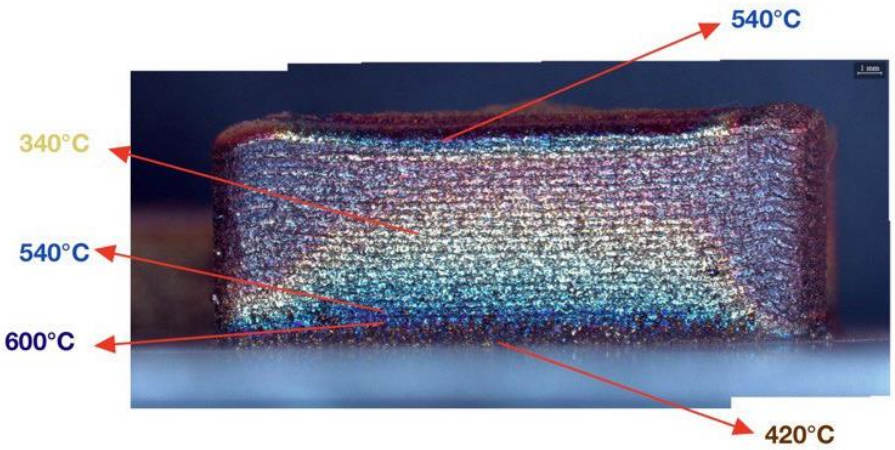


FIGURA 68 COLORAZIONE OSSIDI TEST 4 CAMPIONE 3 0.35 MM

Test 4 campione 4 (0,50 mm)

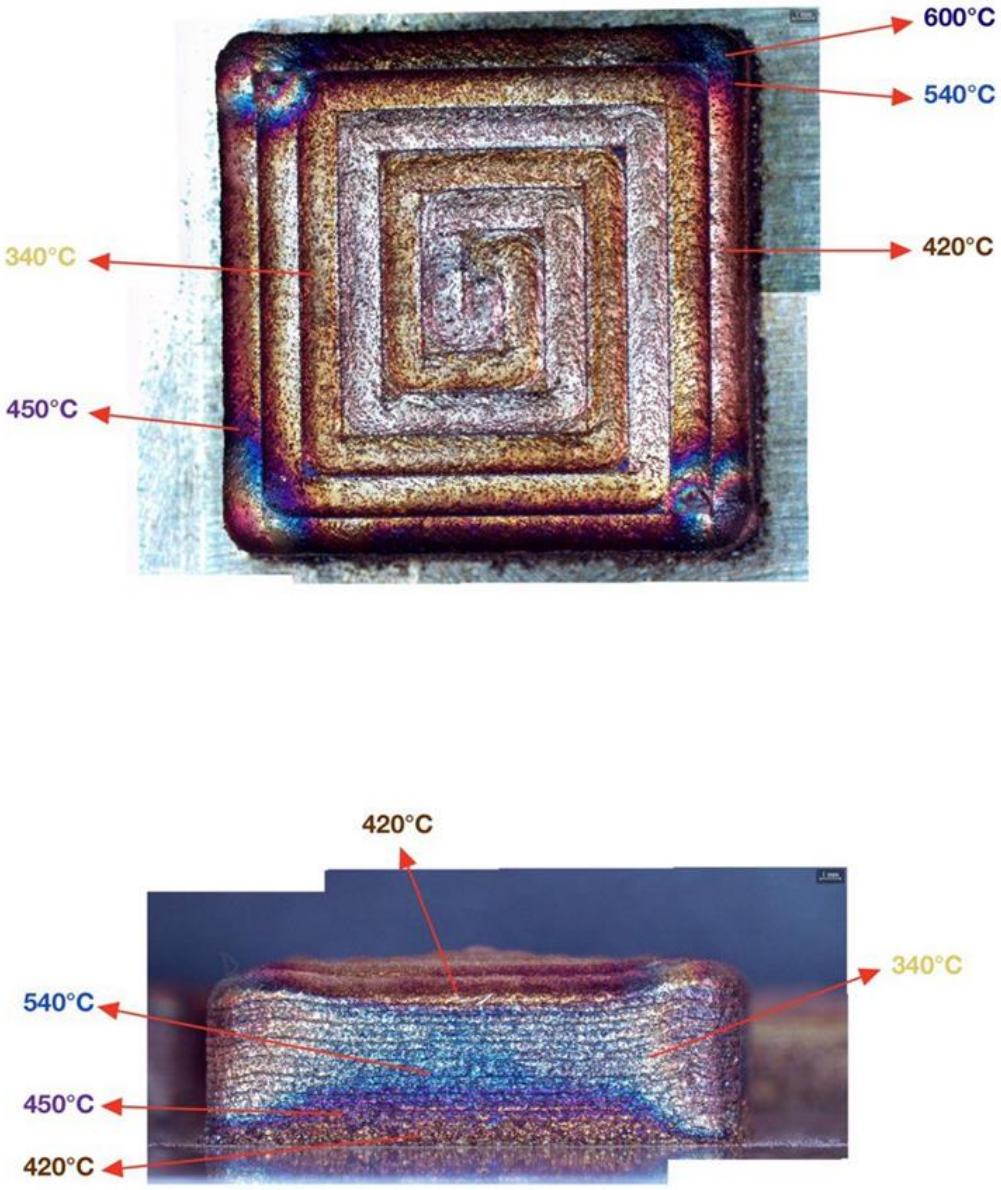


FIGURA 69 COLORAZIONE OSSIDI TEST 4 CAMPIONE 4 0.50 MM

Si evince dall'analisi degli ossidi che nel caso dei campioni con un innalzamento della testa di 0,35 mm è presente in entrambi un picco di temperatura (circa 600°) vicino alla base del campione, che man mano che gli strati aumentano tende ad affievolirsi. Questo profilo di temperatura è dato probabilmente dal troppo calore accumulato nella prima fase di deposizione, dovuto alla vicinanza della testa, che strato dopo strato si alza e aumenta leggermente la sua distanza rispetto allo strato depositato per poi raggiungere l'equilibrio termico con l'aumentare anche dell'efficienza di deposizione.

Diversamente nel caso dei campioni con un innalzamento della testa di deposizione di 0,50 mm, accade che dopo pochi strati il provino va in equilibrio termico, ma successivamente con l'alzarsi della testa di deposizione e dunque la distanza dallo strato, che aumenta maggiormente rispetto al caso precedente, il materiale tende a scaldarsi maggiormente senza depositare la stessa quantità di polvere e dunque tende a espandersi maggiormente in larghezza e ad accumulare più calore che si traduce in una colorazione degl'ossidi bluastra.

In tutti e quattro i campioni si nota che i punti più critici per la temperatura sono gli angoli, in quanto negli angoli accade che la testa di deposizione permane per più tempo a causa dei cambi di direzione; infatti, nei cambi di direzione la testa decelera e riscalda maggiormente la parte interessata come si evince dalla colorazione degli ossidi.

Si evidenzia inoltre che l'ultima passata di deposizione dell'ultimo strato, in quasi tutti i campioni risulta con una temperatura maggiore intorno ai 390°, dovuto probabilmente all'accumulo di calore delle passate precedenti.

Acquisizione al rugosimetro

In seguito, sono state eseguite delle misurazioni sulla rugosità dei campioni. Per i campioni 3 e 4 sono state eseguite 6 misure, come si vede in figura: 3 sulla superficie superiore dei campioni (misure 1,2,3) e 3 sulla superficie laterale (misure 4,5,6). Anche in questo caso in media le rugosità dei campioni sono simili (Ra, Rq, Rt, Rz) con Ra intorno ai 13 µm, quello che varia con l'aumentare dell'altezza di sollevamento della testa sono le misure di ondulazione (Wa, Wq, Wt) infatti con un sollevamento della testa di deposizione maggiore aumenta l'altezza del singolo strato e dunque anche la misura dell'ondulazione e questo vale sia per le misure superiori che per quelle laterali.

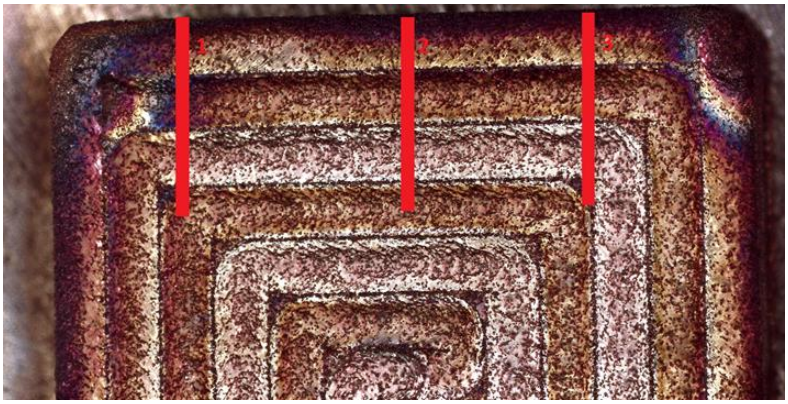


FIGURA 70 ACQUISIZIONE AL RUGOSIMETRO SUPERFICIE SUPERIORE

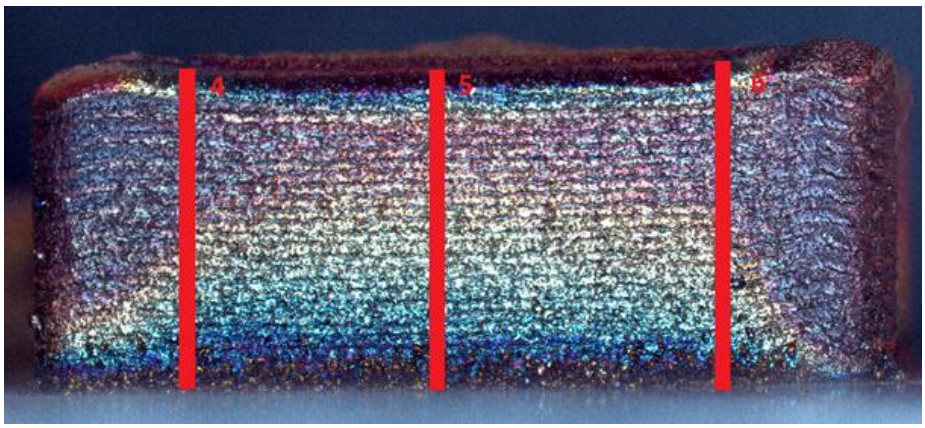


FIGURA 71 ACQUISIZIONE AL RUGOSIMETRO SUPERFICIE LATERALE

Provino 3	0,35	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
1	14,361	17,391	87,401	65,574	33,846	42,793	170,622
2	12,727	16,738	85,018	66,758	42,211	47,947	164,215
3	14,47	17,526	84,7	66,389	40,683	46,773	158,33
medie	13,85	17,22	85,71	66,24	38,91	45,84	164,39

TABELLA 19 MISURE RUGOSITÀ CAMPIONE 3

Provino 3	0,35	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
4	12,884	15,73	89,384	64,871	10,615	13,683	51,291
5	11,495	13,865	72,517	57,509	16,167	18,992	70,333
6	12,82	16,254	101,284	67,901	15,272	17,411	54,58
medie	12,40	15,28	87,73	63,43	14,02	16,70	58,74

TABELLA 20 MISURE RUGOSITÀ CAMPIONE 3

Provino 4	0,5	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
1	13,389	16,471	86,94	63,112	47,538	54,081	177,806
2	12,986	16,118	88,934	60,814	60,848	68,552	216,876
3	11,438	13,994	75,295	56,924	36,03	40,859	137,29
medie	12,60	15,53	83,72	60,28	48,14	54,50	177,32

TABELLA 21 MISURE RUGOSITÀ CAMPIONE 4

Provino 4	0,5	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
4	14,564	18,518	103,263	75,857	14,667	17,538	69,91
5	14,345	17,613	105,313	69,955	14,882	17,443	60,282
6	15,007	19,365	100,919	79,284	26,462	31,971	125,06
medie	14,64	18,50	103,17	75,03	18,67	22,32	85,08

TABELLA 22 MISURE RUGOSITÀ CAMPIONE 4

Per le misure della rugosità 2 e 5 sono stati estratti anche i profili, primario, rugosità e ondulazione, (in figura i risultati dell'ondulazione più significativa). Come già notato dai risultati i valori di ondulazione aumentano con l'aumentare dell'altezza della testa di deposizione.

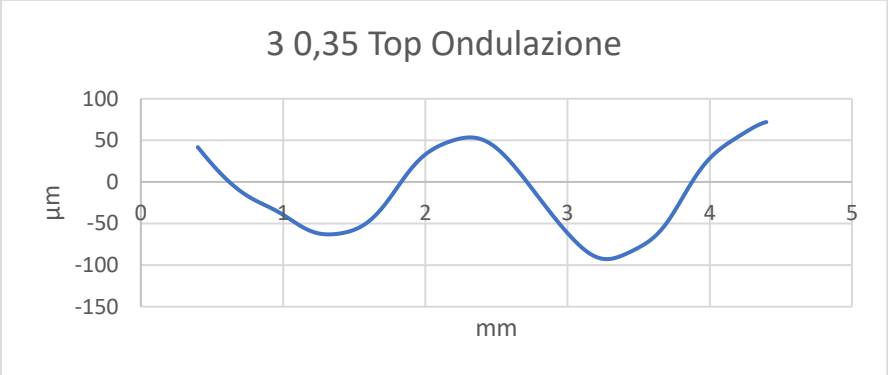


FIGURA 72 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 3

FIGURA 73 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 3

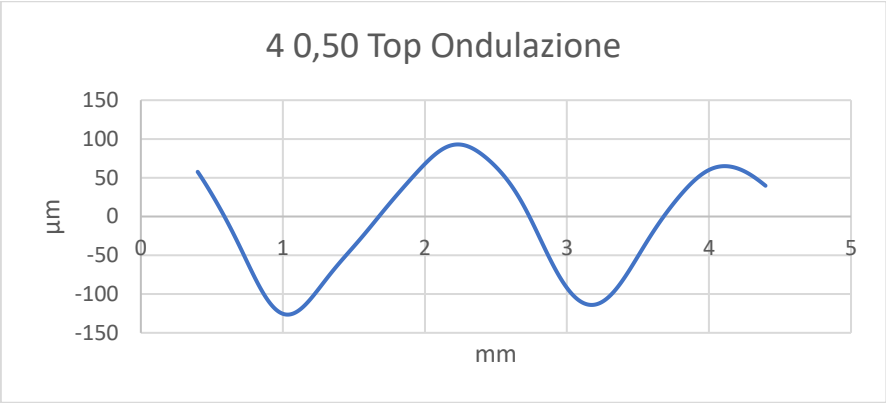


FIGURA 74 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 4

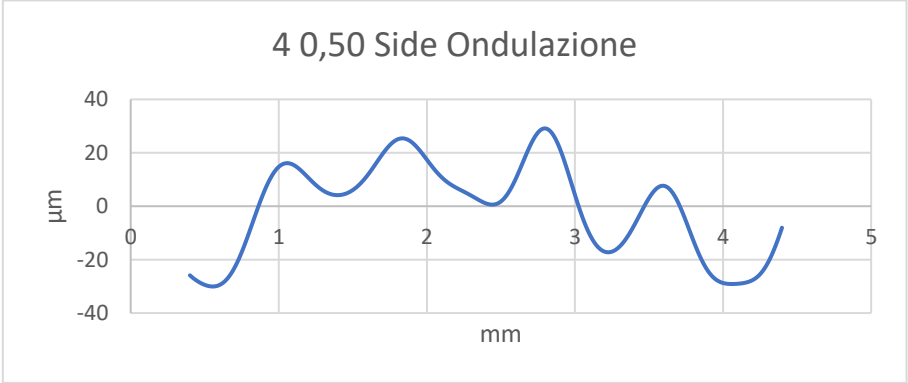


FIGURA 75 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 4

Come si può notare è difficile ricavare dai profili di ondulazione laterali le altezze del singolo layer, in quanto le superfici non presentano delle ondulazioni corrispondenti effettivamente al singolo layer o con dei massimi o minimi ben definiti, motivo per cui verranno calcolate con un altro metodo.

Misura e confronto della larghezza di traccia

Si è inoltre voluto fare un confronto tra la larghezza di traccia del test 3 e quelle del test 4, per quanto riguarda la larghezza superiore dsup (in *figura 76* quota gialla), è possibile misurarla osservando due tracce affiancate, per quanto riguarda la larghezza di traccia totale per confrontare i valori con il test 3 non è possibile misurare direttamente gli strati inferiori perché non sono visibili, essendo teoricamente, la traccia inferiore uguale alla traccia superiore la larghezza totale dtot (in *figura 76* quota blu) può essere misurata come la distanza tra 3 tracce affiancate.

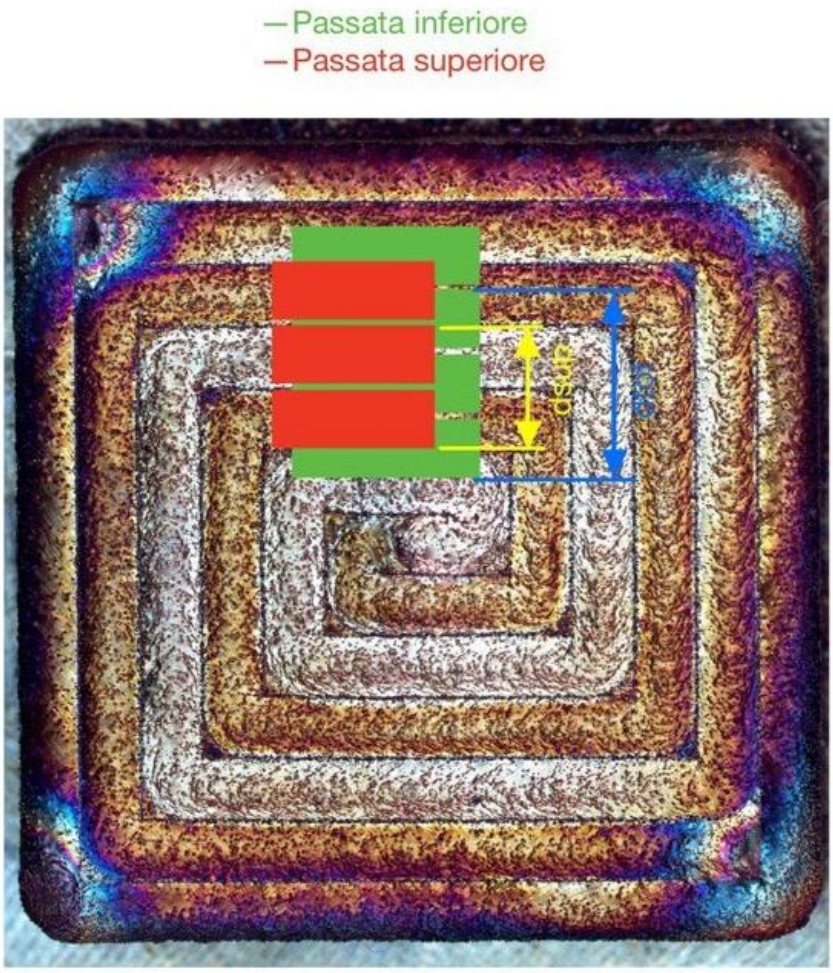


FIGURA 76 LARGHEZZA DI TRACCIA DSUP E DTOT

Con il software ImageJ sono state acquisite le misure sulle immagini del microscopio (*figura 77*), le misurazioni sono state effettuate per tutti e quattro i parallelepipedi del test 4.

FIGURA 77 MISURA LARGHEZZA DI TRACCIA TECNICA BOX

Confrontando i risultati con quelli ottenuti per la singola traccia, test 3, si nota che nei parallelepipedi hanno una larghezza di traccia, sia superiore che totale, leggermente maggiore in media del 3.5%, dovuta probabilmente all'aumento di temperatura nel parallelepipedo (essendo composto da diversi strati rispetto alla singola traccia) e quindi l'aumento dell'efficienza del laser (in *tabella 25* medie e deviazioni standard rispetto al test 3 calcolate per entrambe le tipologie di provini 0,35 mm e 0,50 mm).

Si nota inoltre che le larghezze nel caso dei provini con sollevamento della testa di deposizione di 0,35 mm sono in entrambi i casi minori rispetto ai provini con sollevamento della testa di deposizione di 0,50 mm, questo dovuto alla minore precisione del laser nel secondo caso (0,50 mm) rispetto al primo (0,35 mm) per via della diversa quantità di polvere che si riesce a depositare.

Test 4	Lbox[mm]	Area [mm^2]	d_{TOT} [mm]	$Area_{Sup}$ [mm^2]	d_{SUP} [mm]
1(0,35)	6	35,882	5,980	23,647	3,941
2(0,5)	6	37,200	6,200	24,720	4,120
3(0,35)	6	36,158	6,026	23,842	3,974
4(0,5)	6	36,236	6,039	24,118	4,020

TABELLA 23 DTOT E DSUP FASE 4

Test 3	Lbox[mm]	Area [mm^2]	d_{TOT} [mm]	$Area_{Sup}$ [mm^2]	d_{SUP} [mm]
traccia singola 1,25d	20	116,579	5,829	78,135	3,907

TABELLA 24 DTOT E DSUP FASE 3

Analisi	TOT[mm]	SUP [mm]
Med. d Test 4 (0,35)	6,003	3,957
Med. d Test 4 (0,50)	6,120	4,070
Dev. Test 4 (0,35)	0,103	0,033
Dev. Test 4 (0,50)	0,186	0,107

TABELLA 25 MEDIA E DEVIAZIONE D DELLA FASE 4 RISPETTO ALLA FASE 3

Misura e confronto dell'altezza di traccia

Tramite le acquisizioni al microscopio della superficie laterale è stata valutata l'altezza media dei singoli strati depositati, la misura è stata effettuata con la tecnica del box e dividendo la lunghezza per il numero di strati depositati per ogni campione (28 layer per i campioni con 0,35 mm di sollevamento della testa di deposizione, 20 layer con 0,50 mm di sollevamento della testa di deposizione) si ottiene l'altezza media di ogni strato.

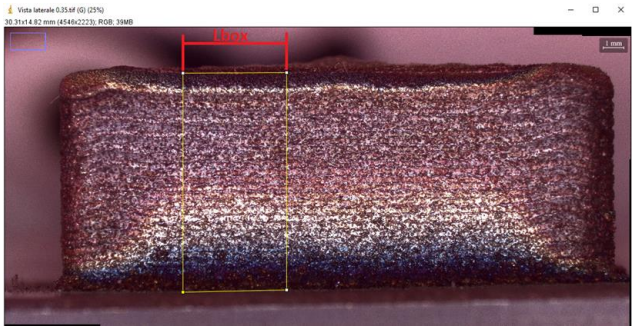


FIGURA 78 MISURA ALTEZZA DI TRACCIA TECNICA BOX

Si evince dalla *tabella 26* che i campioni 1 e 3 (0,35 mm) hanno un'altezza minore rispetto ai campioni 2 e 4 (0,50 mm) questo perché per arrivare alla stessa altezza sono stati depositati un diverso numero di strati con sollevamento della testa differente e dunque aumentando l'altezza di deposizione aumenta in modo direttamente proporzionale anche l'altezza media degli strati come è evidenziato nel grafico.

Test 4	Lbox[mm]	Area [mm^2]	N° layer	h_{Media} [mm]
1(0,35)	5	53,008	28	0,379
2(0,50)	5	45,454	20	0,455
3(0,35)	5	48,509	28	0,346
4(0,50)	5	42,225	20	0,422

TABELLA 26 ALTEZZA LAYER FASE 4

È da notare inoltre che i campioni 1 e 2 sono stati depositati con un powder feeder diverso dai campioni 3 e 4, questo spiega la variazione di altezze di traccia tra campioni con la stessa altezza di sollevamento della testa di deposizione.

Si nota dalle acquisizioni al microscopio, che comunque l'altezza delle tracce cresce man mano che aumentano gli strati depositati, questo è dovuto all'aumento dell'efficienza all'aumentare degli strati (la macchina va a stampare su un materiale che è sempre più caldo).

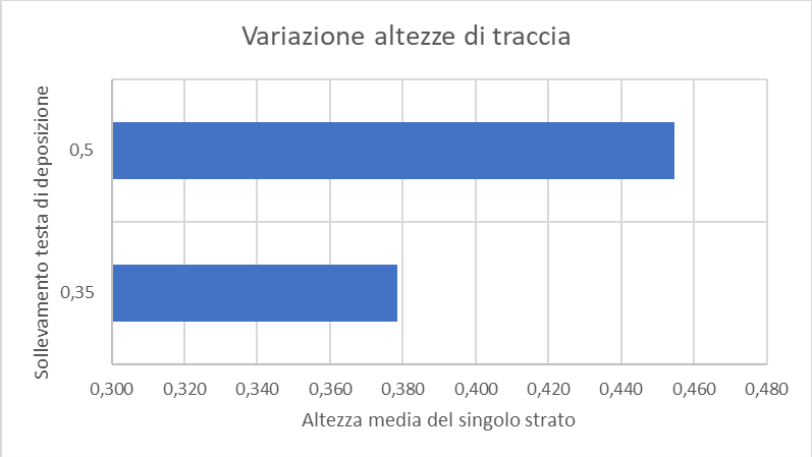


TABELLA 27 VARIAZIONE ALTEZZA DI TRACCIA

Volendo confrontare l'altezza di traccia della singola traccia con l'altezza media dello strato del parallelepipedo, si nota che nei campioni 1 e 3 si ha un aumento dell'altezza dello strato rispetto alla singola traccia rispettivamente del 48.3% e 43.5% mentre nei campioni 2 e 4 si ha un aumento dell'altezza dello strato rispetto alla singola traccia rispettivamente del 56.9% e 53,7% che sono diversi dovuti alle diverse condizioni di deposizione spiegate in precedenza (powder feeder, temperatura piastra di base).

	h_{Media} [mm]	Incremento h %	Deviazione h
1,25d	0,1957	0,0	0,0000
1(0,35)	0,3786	48,3	0,1294
2(0,50)	0,4545	56,9	0,1830
3(0,35)	0,3465	43,5	0,1066
4(0,50)	0,4223	53,7	0,1602

TABELLA 28 MEDIA, INCREMENTO %, DEVIAZIONE DI H DELLA FASE 4 RISPETTO ALLA FASE 3

Misura della densità alla Bilancia di Archimede

È stata inoltre valutata la densità dei cubi per confrontarla con quella teorica per capire di quanto i campioni si discostano dal valore teorico di densità ovvero cercare di capire la presenza di porosità nel materiale.

Per farlo è stata utilizzata la bilancia di Archimede. Questo strumento si utilizza pesando prima il campione per poi immergerlo in un fluido, in questo caso acqua distillata, di densità nota ad ogni temperatura che viene misurata con un termometro e immessa nella macchina. Una volta immerso la macchina conoscendo il peso del campione a secco e il peso del campione all'interno del fluido, calcola la densità del materiale.

FIGURA 79 MISURA DEL PESO CON LA BILANCIA DI ARCHIMEDE

FIGURA 80 MISURA DELLA DENSITÀ CON LA BILANCIA DI ARCHIMEDE

Dai risultati ottenuti, si vede che i campioni hanno una densità inferiore rispetto a quella teorica in media del 2,12% *Tabella 30*.

Si nota inoltre che i campioni 3 e 4 hanno densità maggiore dei rispettivi campioni 1 e 2 con uguale altezza di sollevamento della testa, questo molto probabilmente è dovuto al diverso

powder feeder utilizzato nelle deposizioni che comporta un flusso di polvere leggermente diverso.

Campione	Densità reale [g/mm^3]
1(0,35)	0,0078174
2(0,5)	0,0078006
3(0,35)	0,0078472
4(0,5)	0,0079733

TABELLA 29 DENSITÀ CAMPIONI FASE 4

Campione	Err relativo Volume [mm^3]	Err percentuale Volume
1(0,35)	365,199	6,016
2(0,5)	424,845	8,329
3(0,35)	478,365	8,089
4(0,5)	607,203	11,894
Medie	468,903	8,582

Campione	Err relativo Densità [g/mm^3]	Err percentuale densità
1(0,35)	0,0002126	2,648
2(0,5)	0,0002294	2,857
3(0,35)	0,0001828	2,276
4(0,5)	0,0000567	0,706
Medie	0,0001704	2,122

Campione	Err relativo peso [g]	Err percentuale Peso
1(0,35)	4,146	8,504
2(0,5)	4,484	10,947
3(0,35)	4,835	10,181
4(0,5)	5,131	12,516
Medie	4,649	10,537

TABELLA 30 ERRORI RELATIVI E PERCENTUALI VOLUME, DENSITÀ E PESO

Taglio dei cilindri

Infine, dal campione sono stati ricavati 3 cilindretti di diametro 6 mm con la WEDM Wire Electrical Discharge Machining (elettroerosione a filo). Per tagliare i cilindretti è stato necessario disegnare il percorso di taglio della macchina sul Cad come si vede in *figura 81* e inserirlo nel software della macchina per far partire il taglio. Dopo aver tagliato tutti i cilindri sono stati numerati e catalogati come in *figura 83*.

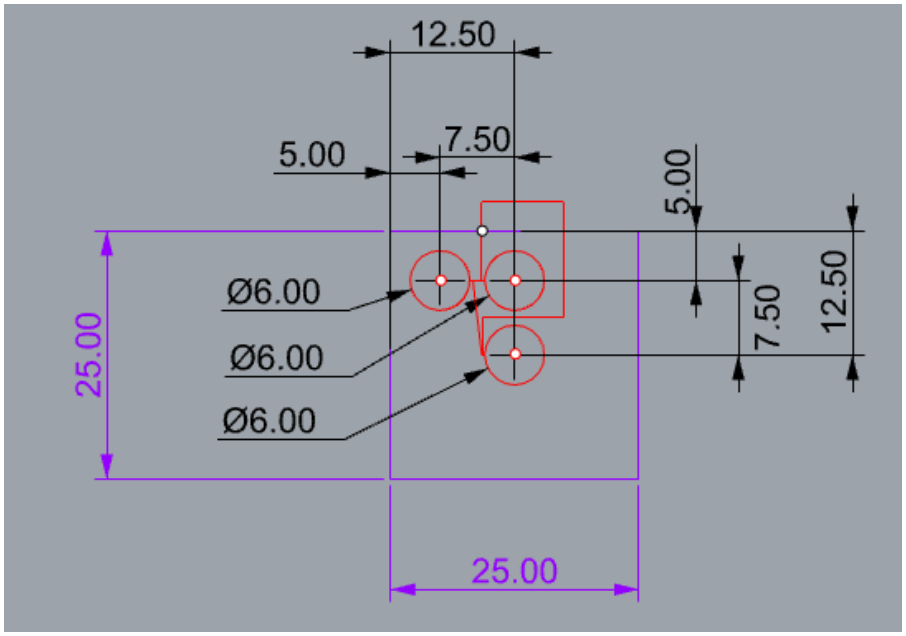


FIGURA 81 PERCORSO WEDM AL CAD

FIGURA 82 PANNELLO DI CONTROLLO WEDM

FIGURA 83 TAGLIO DEI CILINDRI

Di seguito la disposizione dei cilindri nei quattro campioni utile all'identificazione di ogni cilindro:

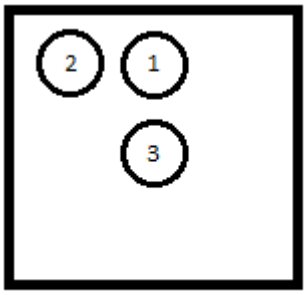


FIGURA 84 DISPOSIZIONE DEI CILINDRI ALL'INTERNO DEL CAMPIONE

Il cilindro numero 1 è preso sul lato del campione, il cilindro numero 2 corrisponde all'angolo del campione e il cilindro numero 3 corrisponde al centro del campione. Sono stati fatti questi tagli in modo da valutare al tomografo tutte le possibili disposizioni presenti all'interno del campione.

Misura della densità dei cilindri

Nel primo campione la densità dei tre cilindretti risulta essere omogenea e abbastanza in linea con quella del campione intero.

Nel secondo campione il cilindro 3 risulta meno denso ma più vicino alla densità totale del campione invece i cilindri 1 e 2 hanno una densità maggiore rispetto a quella del campione intero.

Nel terzo campione i cilindri hanno densità omogenea e molto vicina alla densità del campione intero.

Nel quarto campione la densità è in linea con quella del campione intero però con i valori hanno una certa variabilità.

Campione 1 (0,35)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0079622	1,9742	247,95
2 Cilindro Φ6	0,0079595	1,9775	248,45
3 Cilindro Φ6	0,0079839	1,9307	241,82

Campione 2 (0,50)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0080126	1,6624	207,47
2 Cilindro Φ6	0,0080087	1,6404	204,83
3 Cilindro Φ6	0,0077642	1,6115	207,56

Campione 3 (0,35)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0077132	1,8900	245,03
2 Cilindro Φ6	0,0079574	1,9288	242,39
3 Cilindro Φ6	0,0077158	1,9624	254,34

Campione 4 (0,50)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0076516	1,6244	212,30
2 Cilindro Φ6	0,0077691	1,6437	211,57
3 Cilindro Φ6	0,0078718	1,7117	217,45

TABELLA 31 DENSITÀ, PESO E VOLUME DEI CILINDRI DA BILANCIA DI ARCHIMEDE

Dunque, si evince da queste misurazioni che le deposizioni fatte con il sollevamento della testa di deposizione di 0,35 mm per strato danno risultati leggermente migliori in termini di omogeneità del materiale durante la deposizione che si traduce in meno porosità e quindi proprietà meccaniche migliori. Si nota inoltre, come in precedenza, la differenza di densità tra campioni 1,2 e 3,4 dovuta all'utilizzo di un powder feeder differente per queste deposizioni.

Campione	Densità teorica [g/mm^3]	Media densità cilindri [g/mm^3]	Err relativo Densità [g/mm^3]	Err percentuale densità
1(0,35)	0,00803	0,0079685	0,0000615	0,765
2(0,5)	0,00803	0,0079285	0,0001015	1,264
3(0,35)	0,00803	0,0077955	0,0002345	2,921
4(0,5)	0,00803	0,0077642	0,0002658	3,311

TABELLA 32 ERRORE RELATIVO E PERCENTUALE DENSITÀ

Acquisizione al Tomografo

La tomografia computerizzata è una tecnica storicamente utilizzata in campo medico diagnostico, essa è mirata alla rappresentazione di strati di campioni che con un apposito software vengono opportunamente uniti per creare una rappresentazione tridimensionale del campione.

Le principali applicazioni della tomografia sono:

- Analisi difettologica di tipo non distruttivo, mirata a identificare cricche porosità ed inclusioni;

-Analisi geometrica tridimensionale, mirata al confronto geometrico dei componenti;

-Analisi funzionale, mirata a scovare eventuali criticità di assemblaggio.

In questa fase dello studio è stato utilizzato il tomografo Phoenic V|tome|x s (*figura 85)* per eseguire l'analisi delle porosità. Questo tipo di tomografo ha un sistema ad alta risoluzione per l'ispezione a raggi X ad una tensione di 210kV, una corrente di 80 µA con un filtro a stagno che serve per rendere più nitida l'immagine. Lo strumento può essere usato per un'ampia gamma di applicazioni con una precisione di dettaglio di 0,2 µm.

FIGURA 85 TOMOGRAFO PHOENIC V|TOME|X S

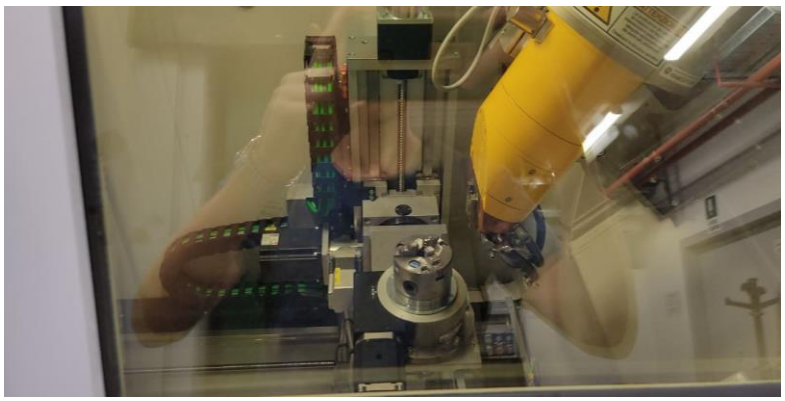


FIGURA 86 TESTA DI ACQUISIZIONE TOMOGRAFO

Una volta ricavati gli strati e stato necessario Unire le immagini per fare una ricostruzione in 3D dei campioni. Il software utilizzato è il ''Phoenix datos|x 2 reconstruction''. I passaggi per arrivare al file 3D del campione sono stati: la selezione del campione per ogni orientamento, la calibrazione geometrica automatica *figura 87*, il beam hardening correction *figura 88* e lo scan optimiser *figura 89.*

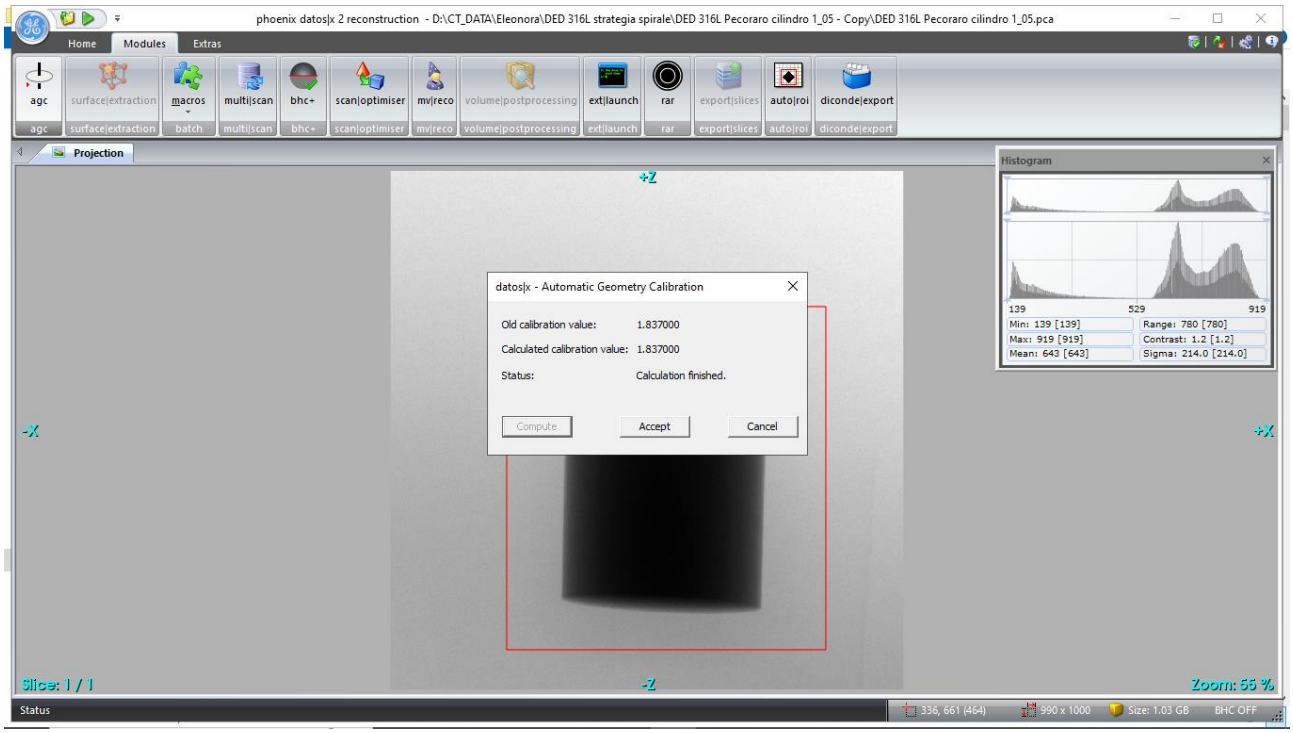


FIGURA 87 CALIBRAZIONE AUTOMATICA

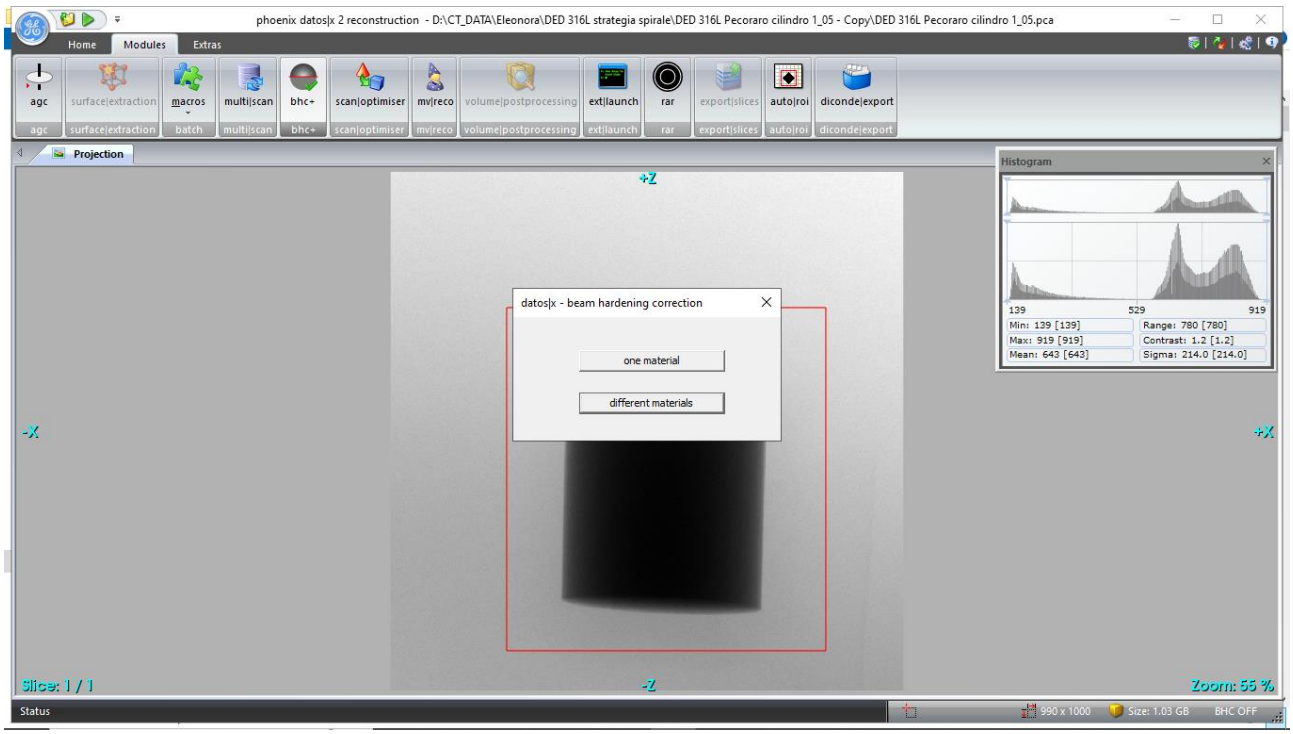


FIGURA 88 BEAM HARDENING CORRECTION

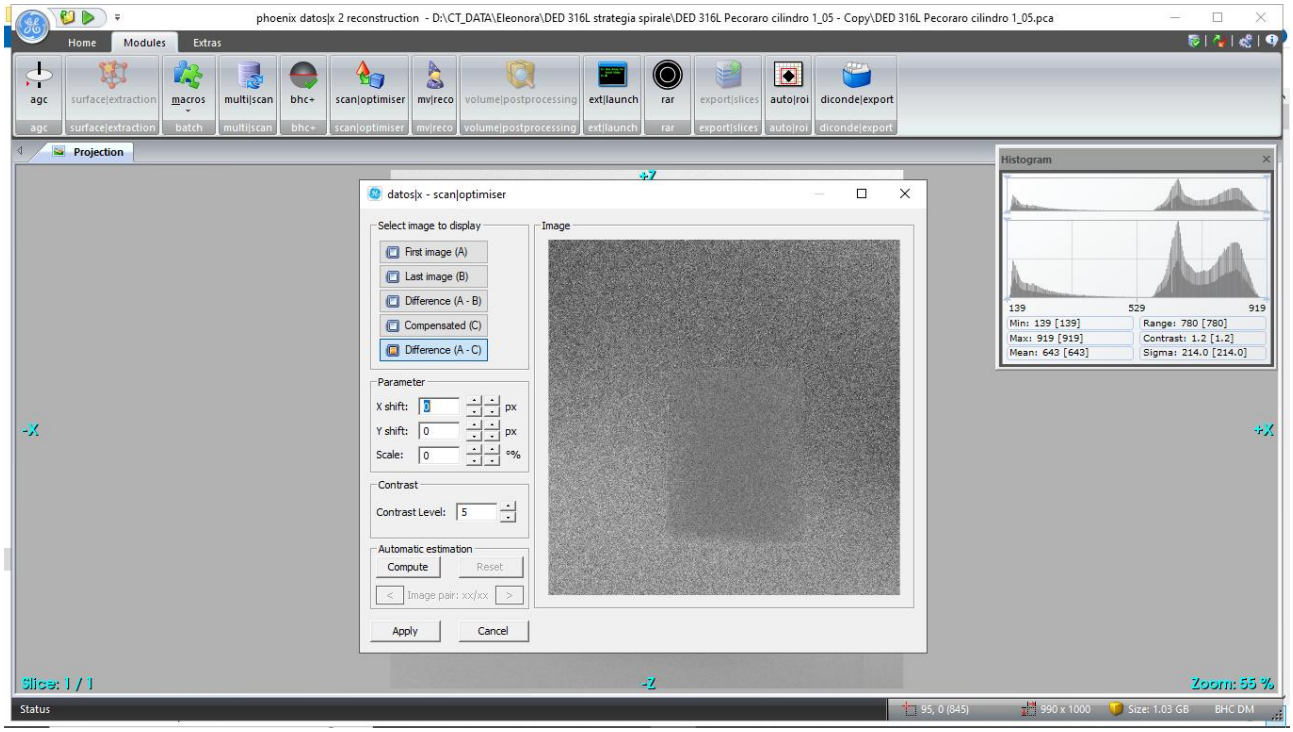


FIGURA 89 SCAN OPTIMISER

Dopo questi passaggi il software salva un file 3D in formato vgl.

Dunque, per fare l'analisi il file viene aperto con il software VGstudio che è un software grafico che permette di valutare le porosità all'interno del materiale in base ai colori *figura 90*.

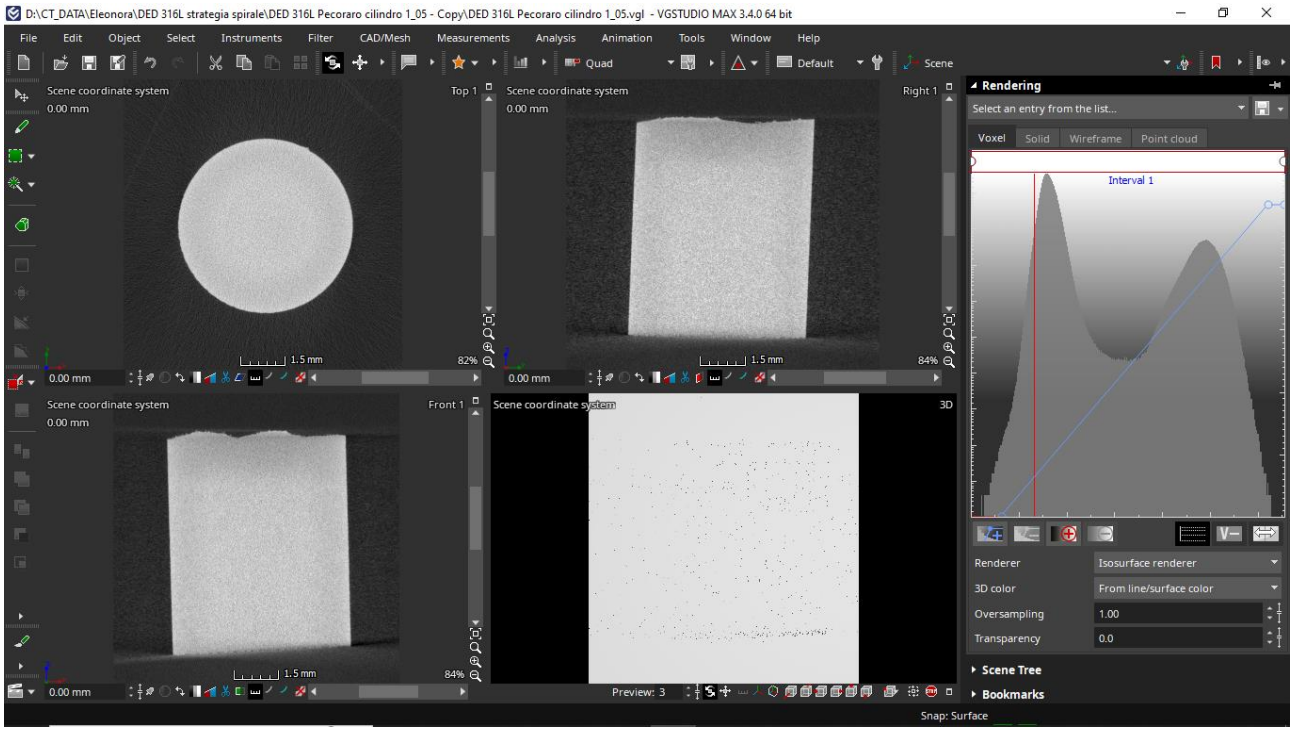


FIGURA 90 VG STUDIO

Una volta aperto il software è necessario correggere il rendering agendo su un istogramma che regola la scala dei grigi, in modo da rendere più chiara possibile l'immagine *figura 91*.

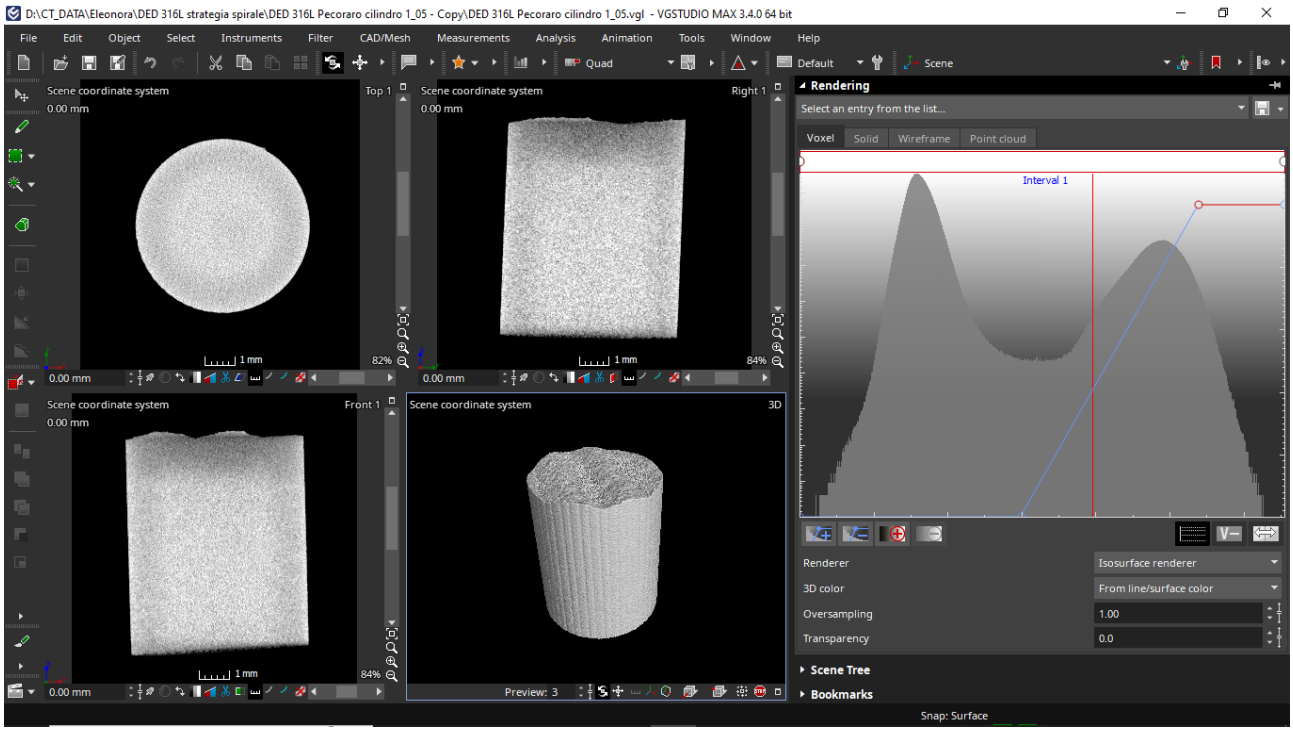


FIGURA 91 CORREZIONE ISTOGRAMMA

In seguito, è necessario registrare il campione in modo da orientarlo correttamente nel verso desiderato *figura 92*.

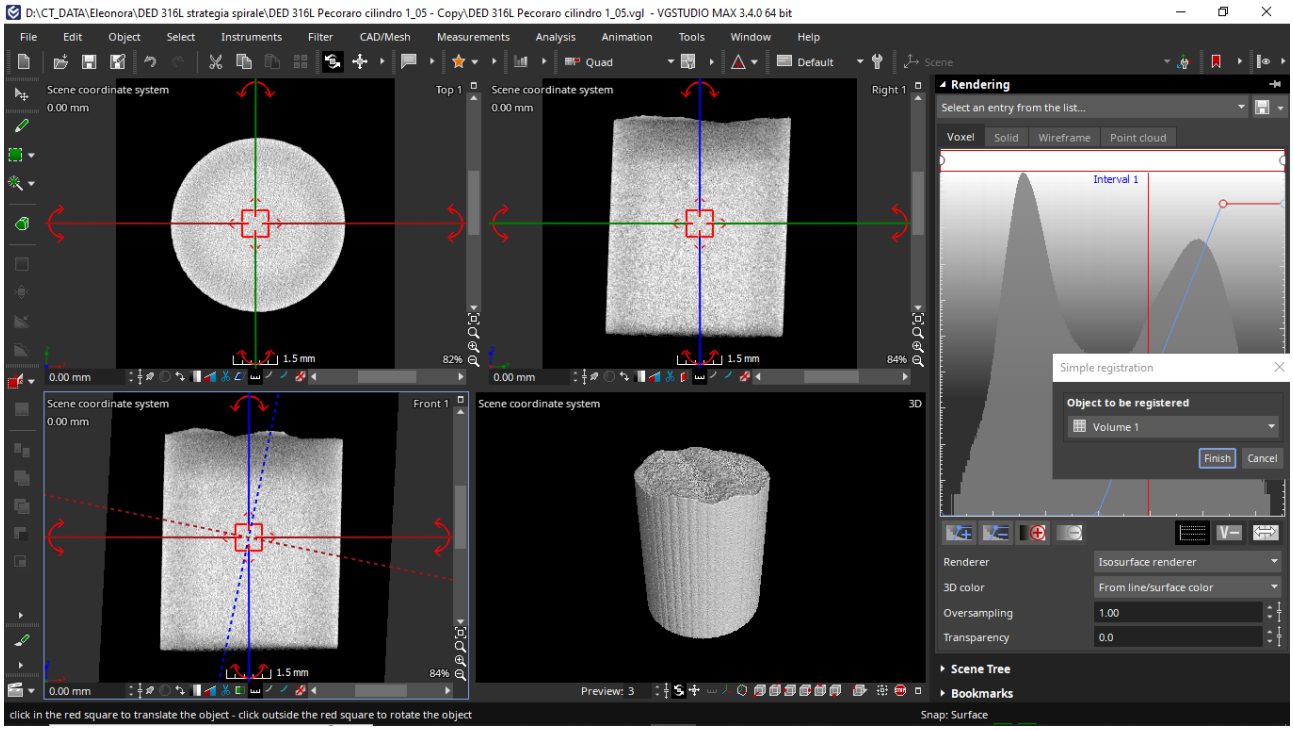


FIGURA 92 REGISTRAZIONE DEL CAMPIONE

Una volta ottenuto il volume, è necessario determinare la superficie del campione con il comando ''Surface determination'' *figura 93*.

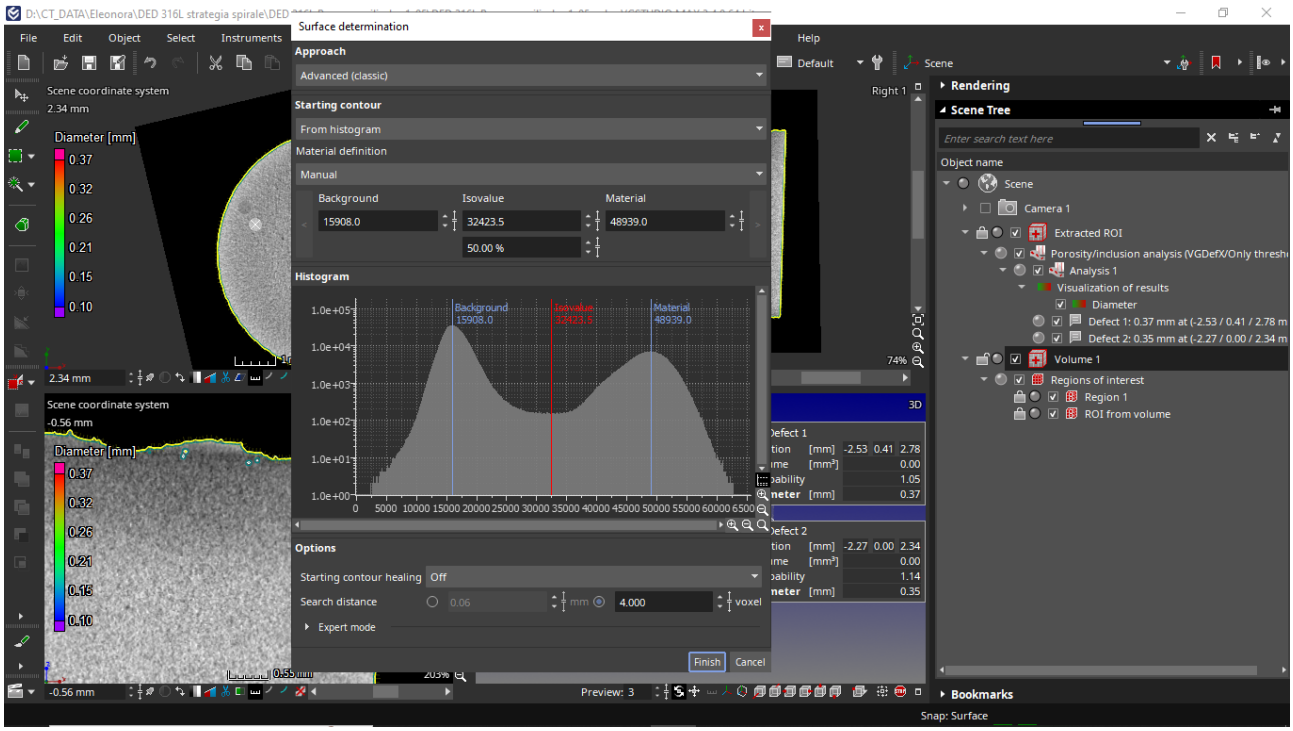


FIGURA 93 SURFACE DETERMINATION

Verrà in seguito creata una Region of interest ROI che sarà modificata con il comando ''erode/dilate'' per non tenere in considerazione i difetti superficiali *figura 94*.

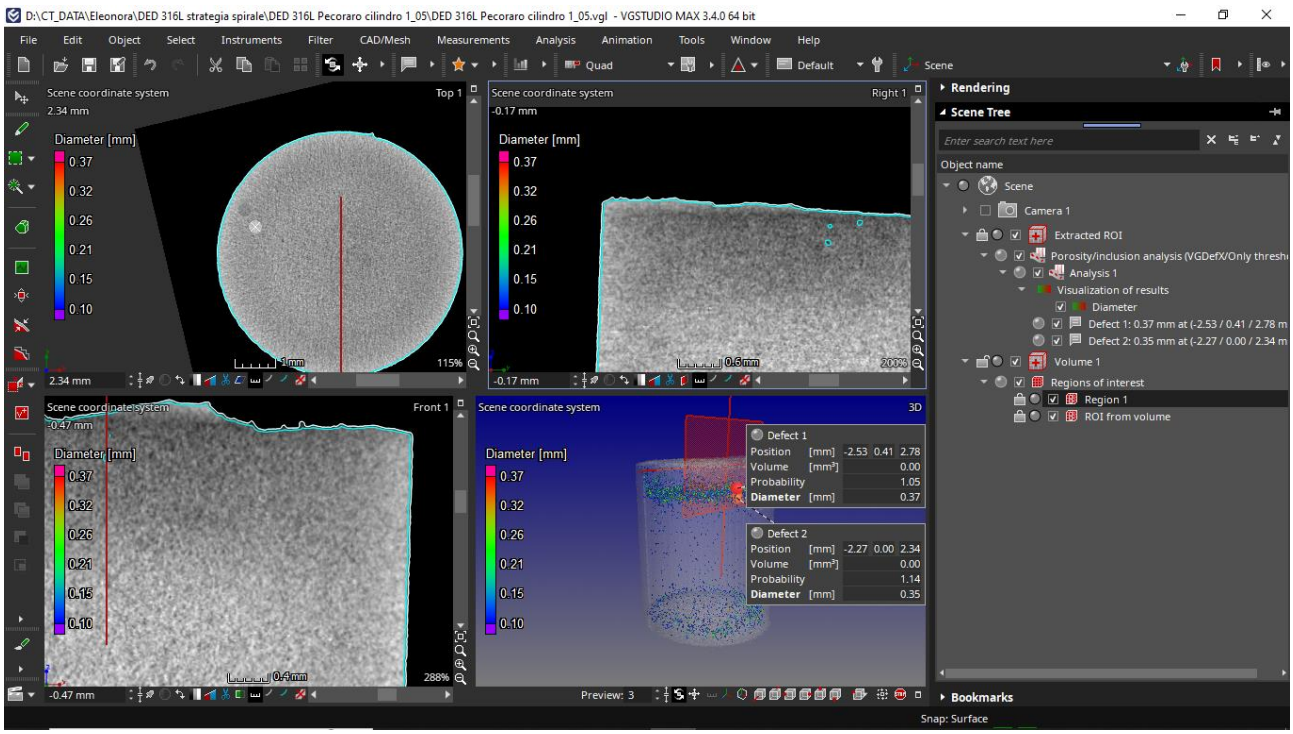


FIGURA 94 COMANDO ERODE/DILATE

Una volta ottenuta la ROI è stato estratto un volume da essa e su questo volume sono state fatte le analisi di porosità. Facendo delle prove è stato possibile ricavare l'interpolation Factor ottimale in grado di dare dei risultati accettabili utilizzando la superficie nuovamente determinata sul nuovo volume. Come altro parametro è stato dato il diametro minimo dei difetti che il software può trovare che è di 0,10 mm *figura 95*.

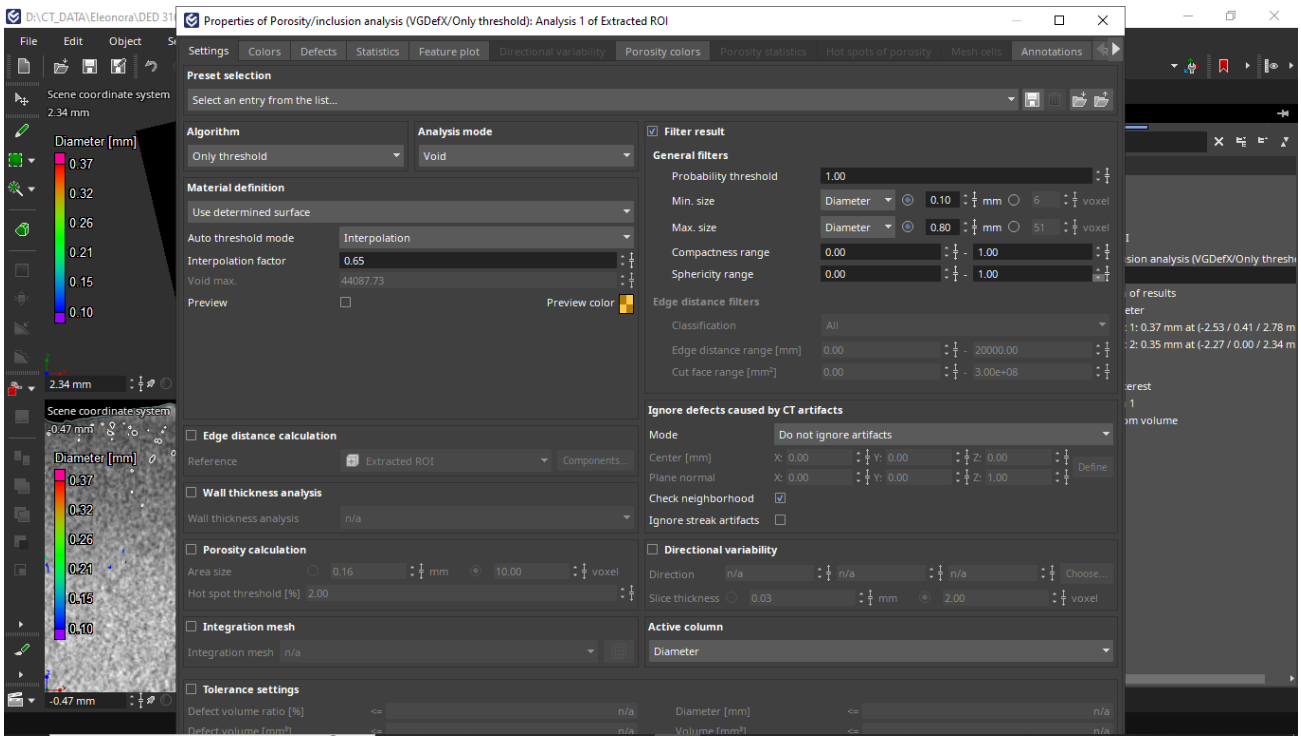


FIGURA 95 IMPOSTAZIONE ANALISI

Dall'analisi dei cilindri appartenenti ai campioni non forati sono stati ricavati i seguenti risultati:

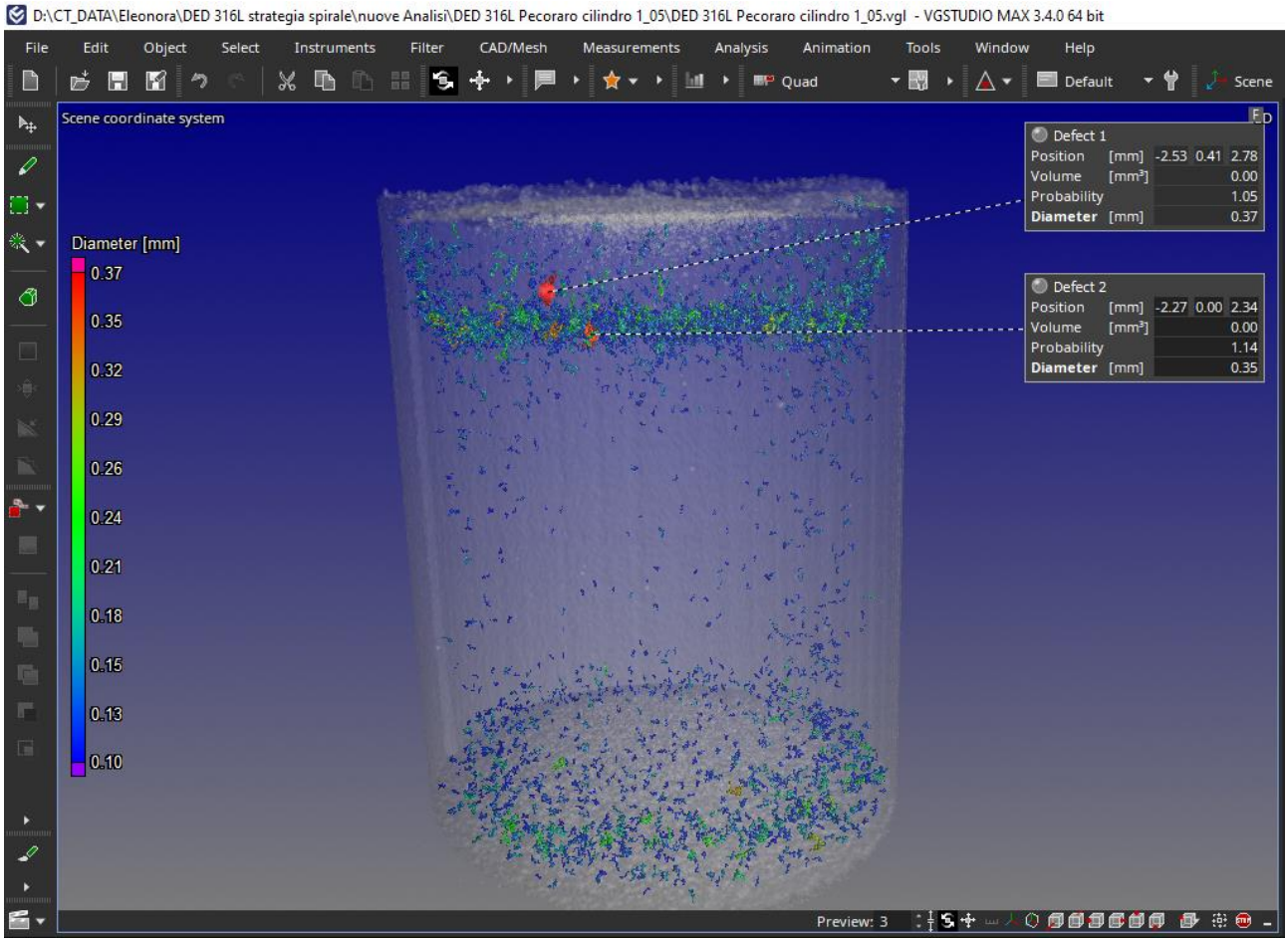


FIGURA 96 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 1 CAMPIONE 0.50 MM

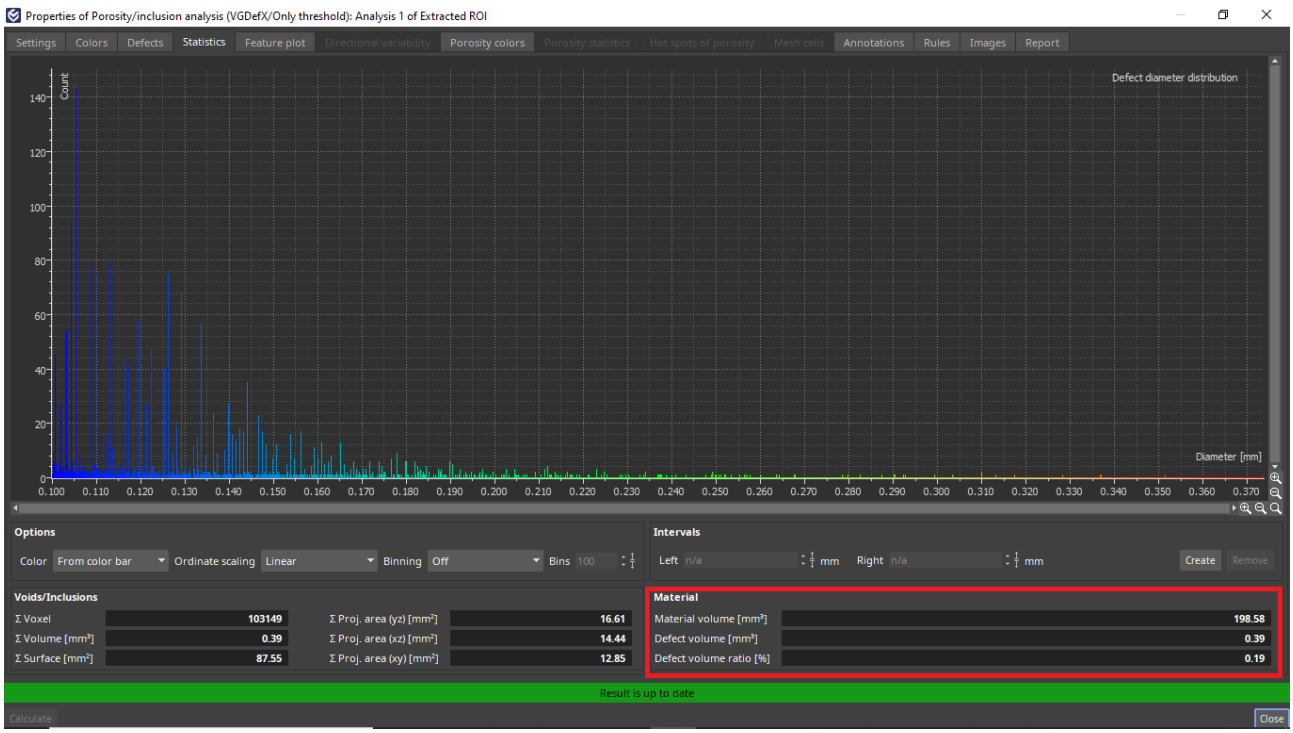


FIGURA 97 RISULTATI ANALISI CILINDRO 1 CAMPIONE 0.50 MM

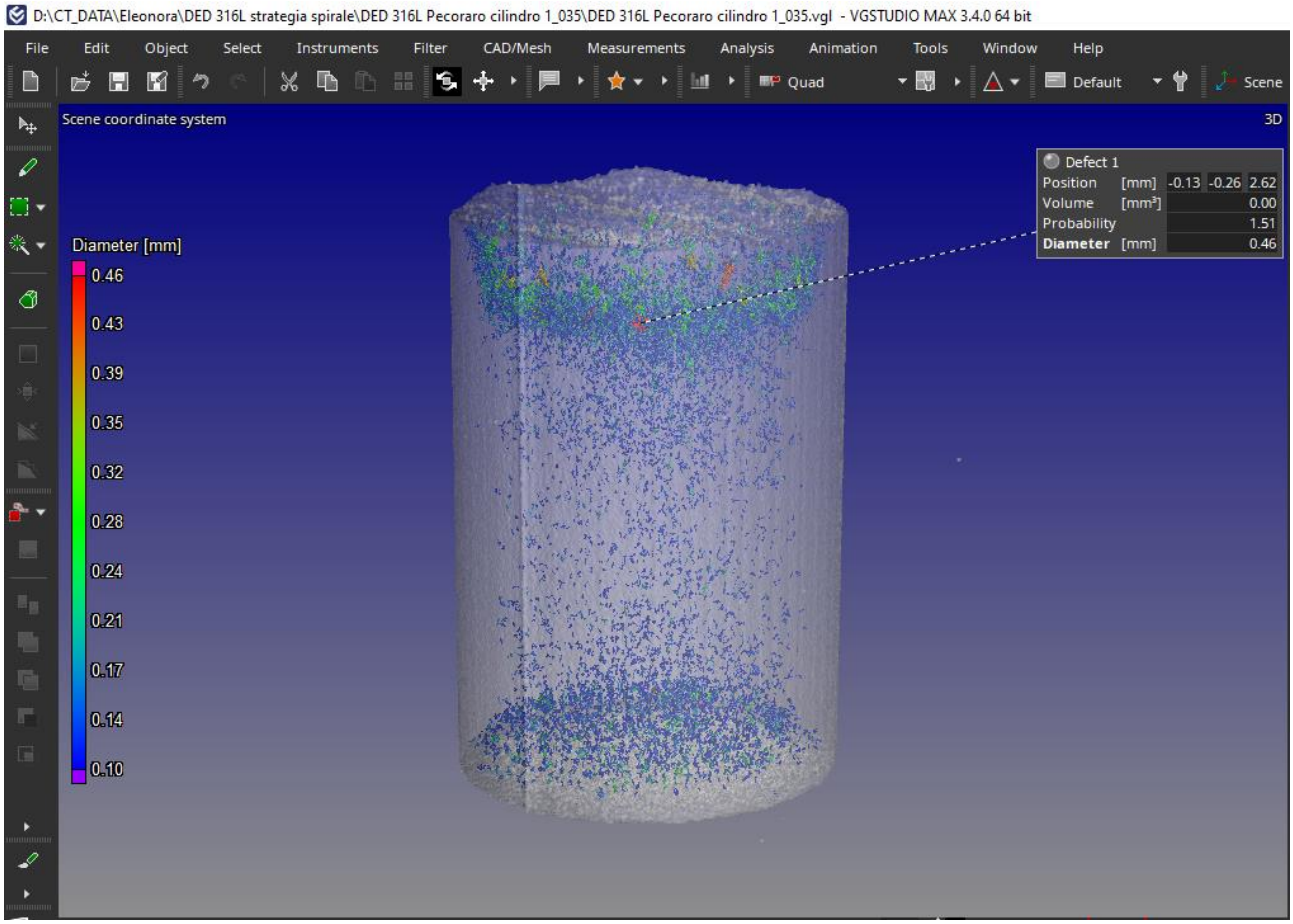


FIGURA 98 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 1 CAMPIONE 0.35 MM

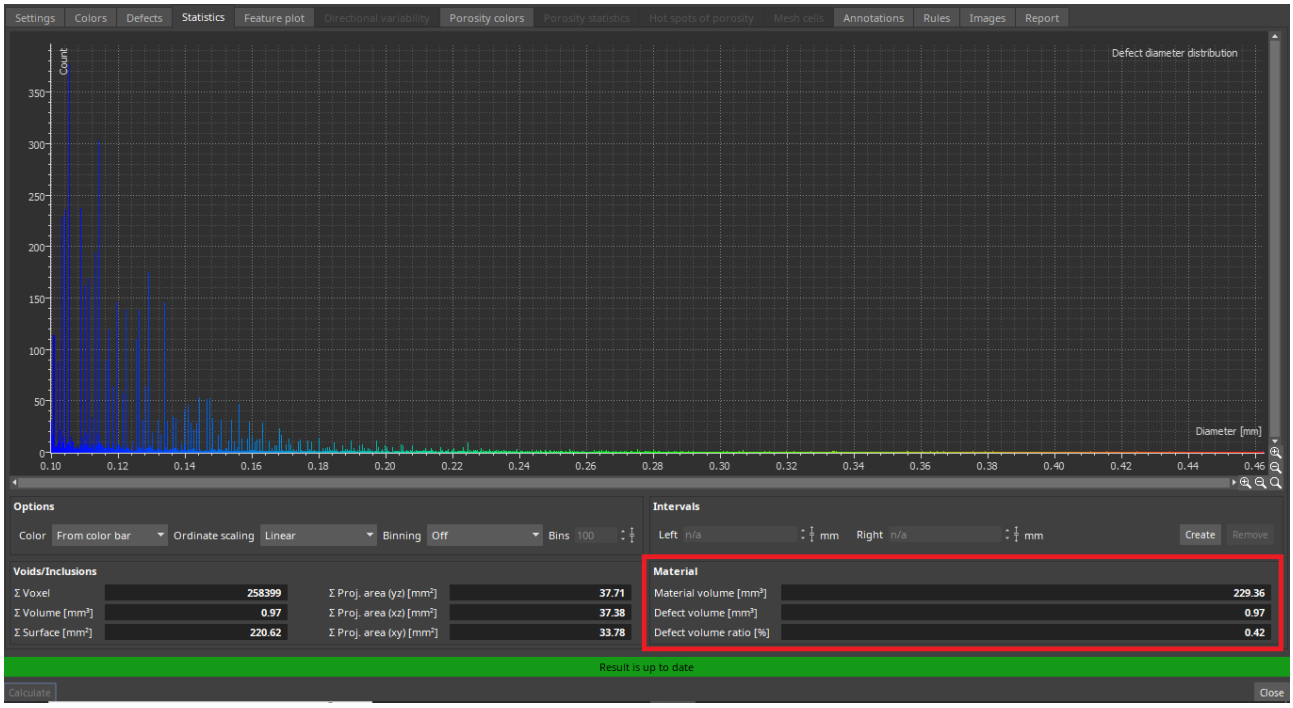


FIGURA 99 RISULTATI ANALISI CILINDRO 1 CAMPIONE 0.35 MM

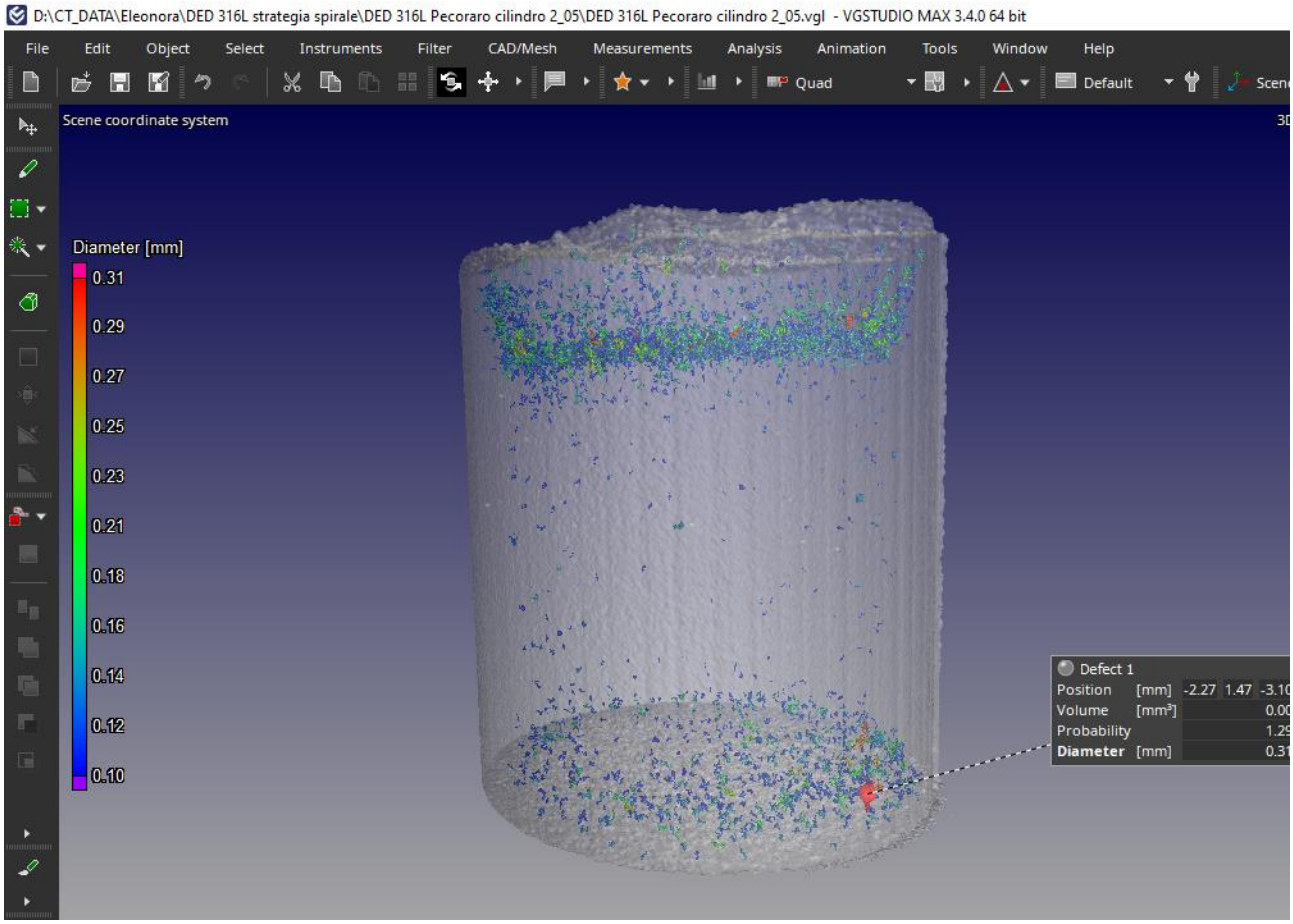


FIGURA 100 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 2 CAMPIONE 0.50 MM

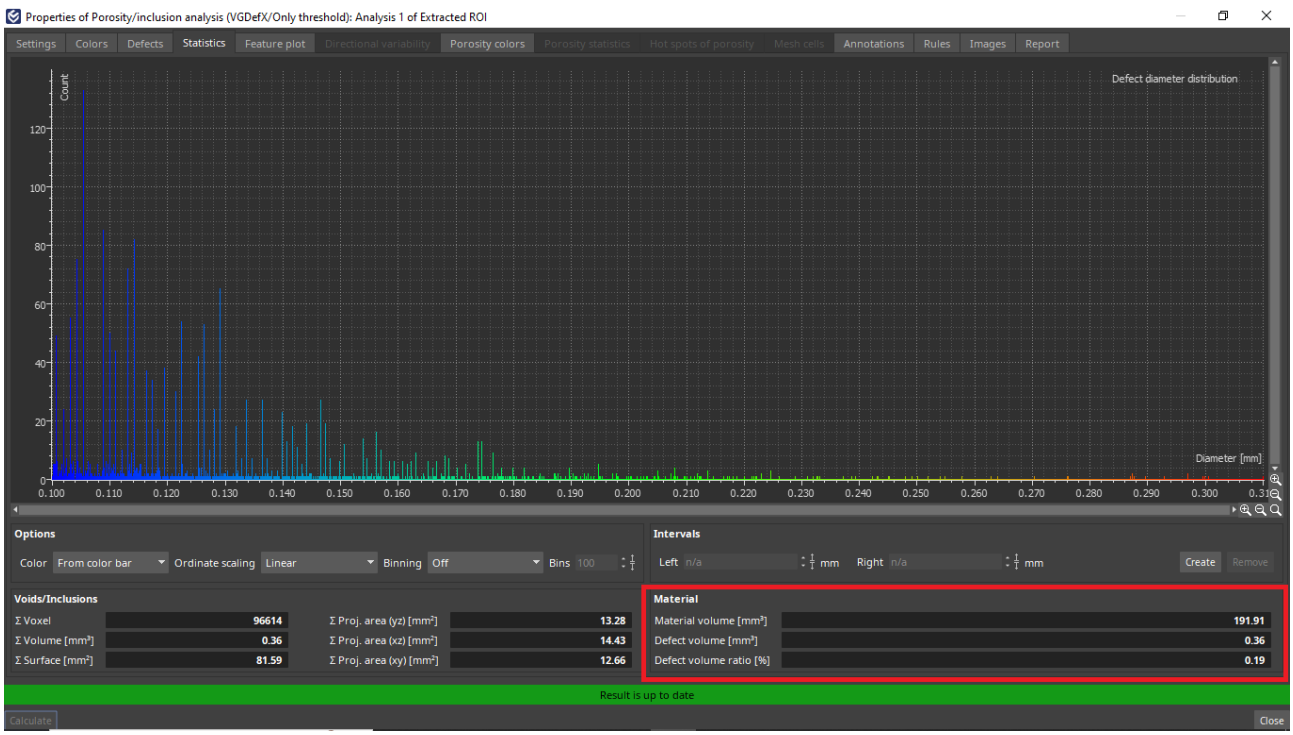


FIGURA 101 RISULTATI ANALISI CILINDRO 2 CAMPIONE 0.50 MM

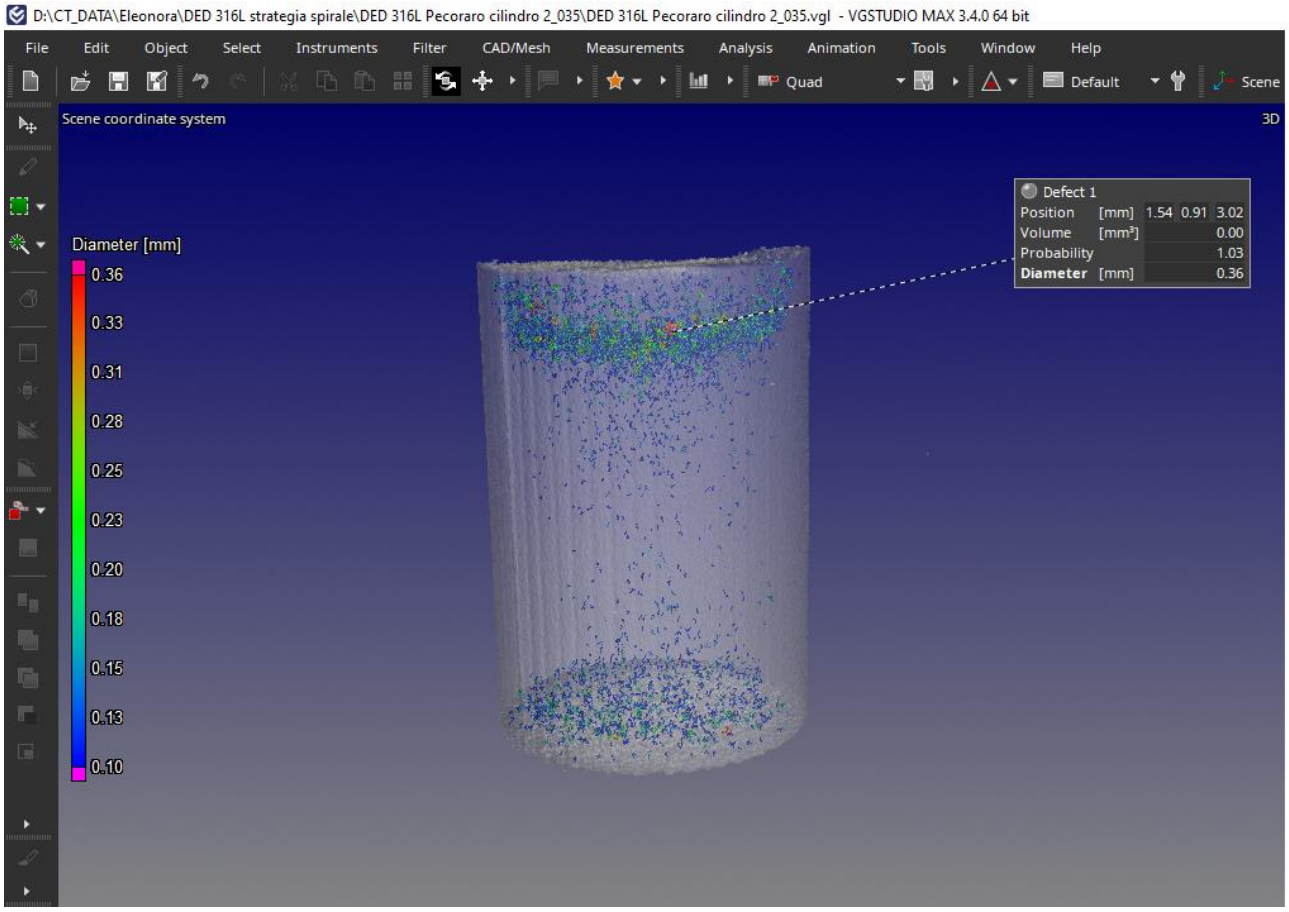


FIGURA 102 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 2 CAMPIONE 0.35 MM

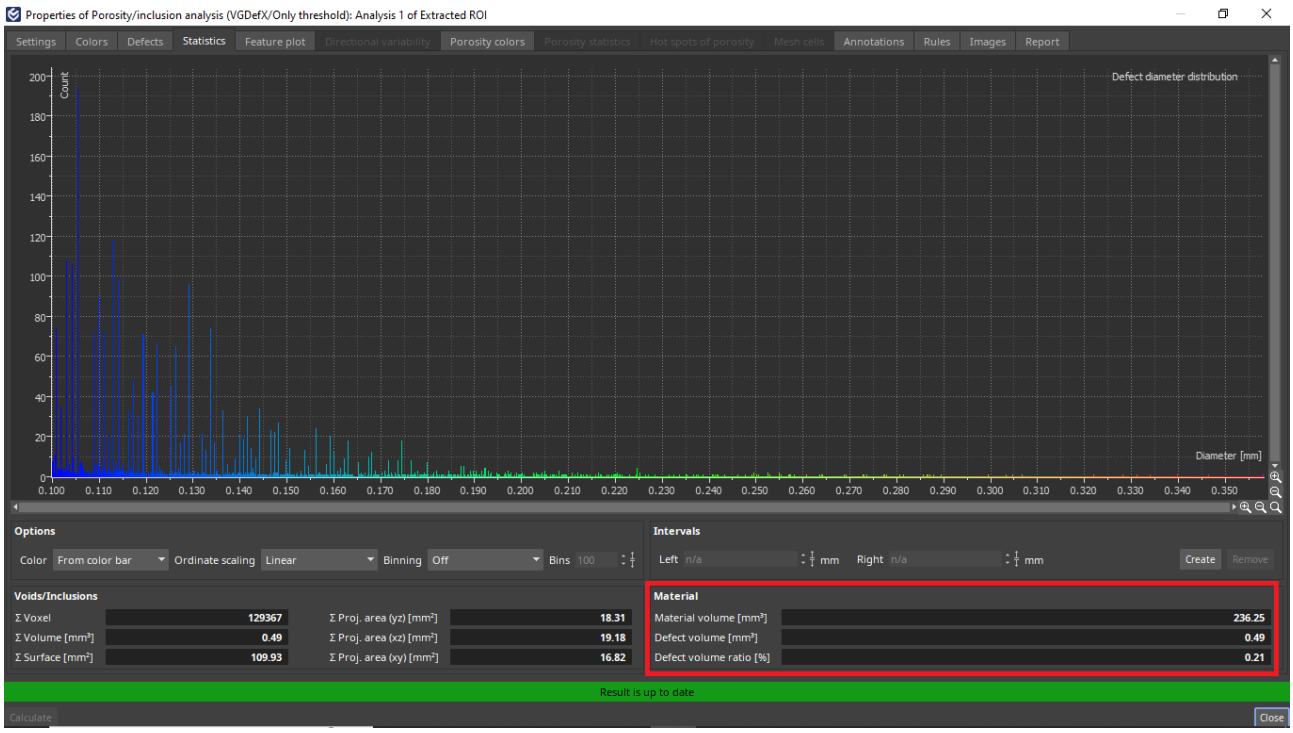


FIGURA 103 RISULTATI ANALISI CILINDRO 2 CAMPIONE 0.35 MM

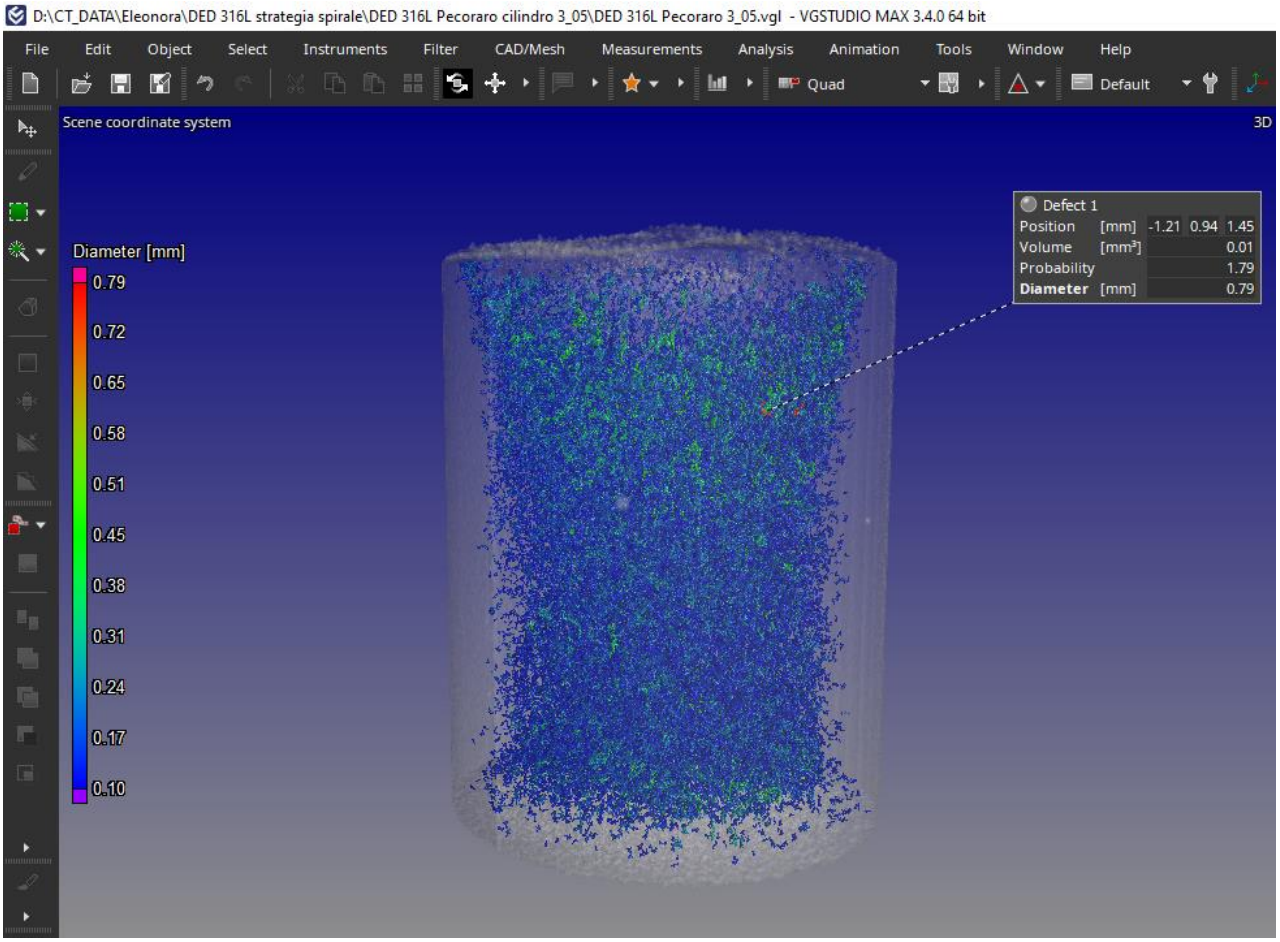


FIGURA 104 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 3 CAMPIONE 0.50 MM

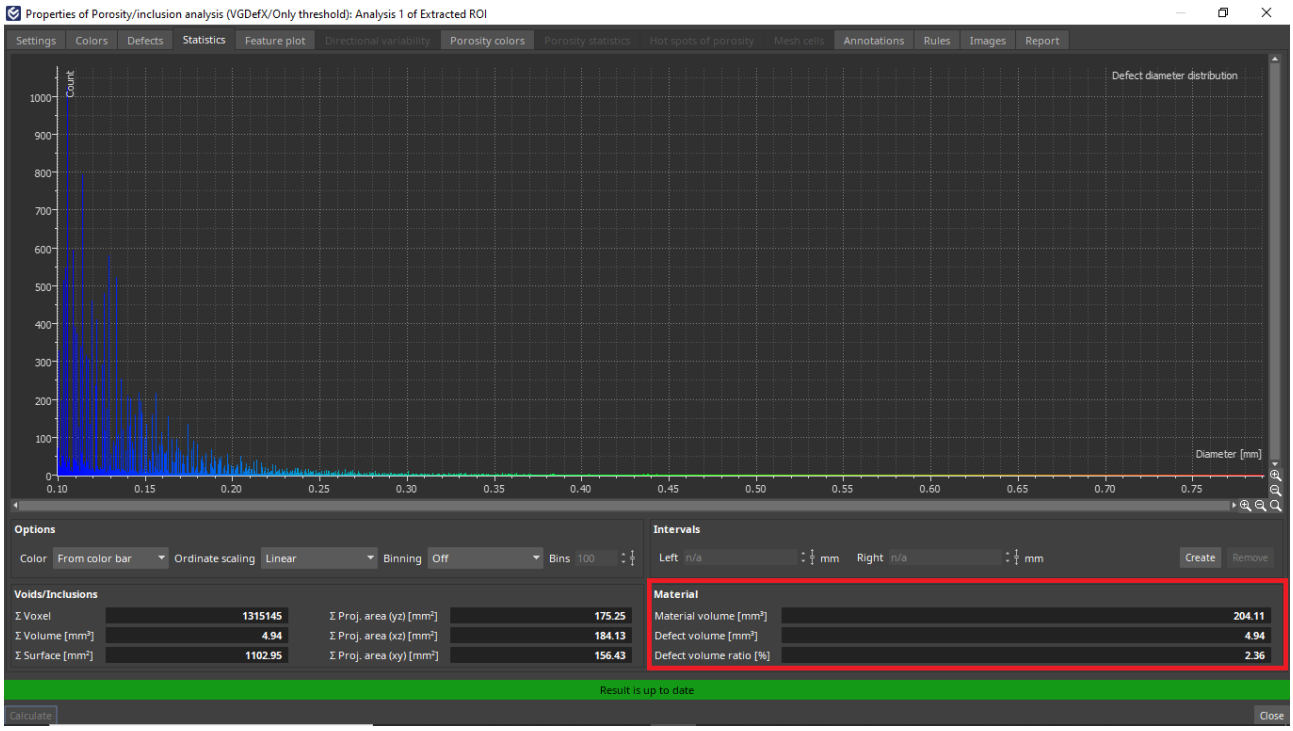


FIGURA 105 RISULTATI ANALISI CILINDRO 3 CAMPIONE 0.50 MM

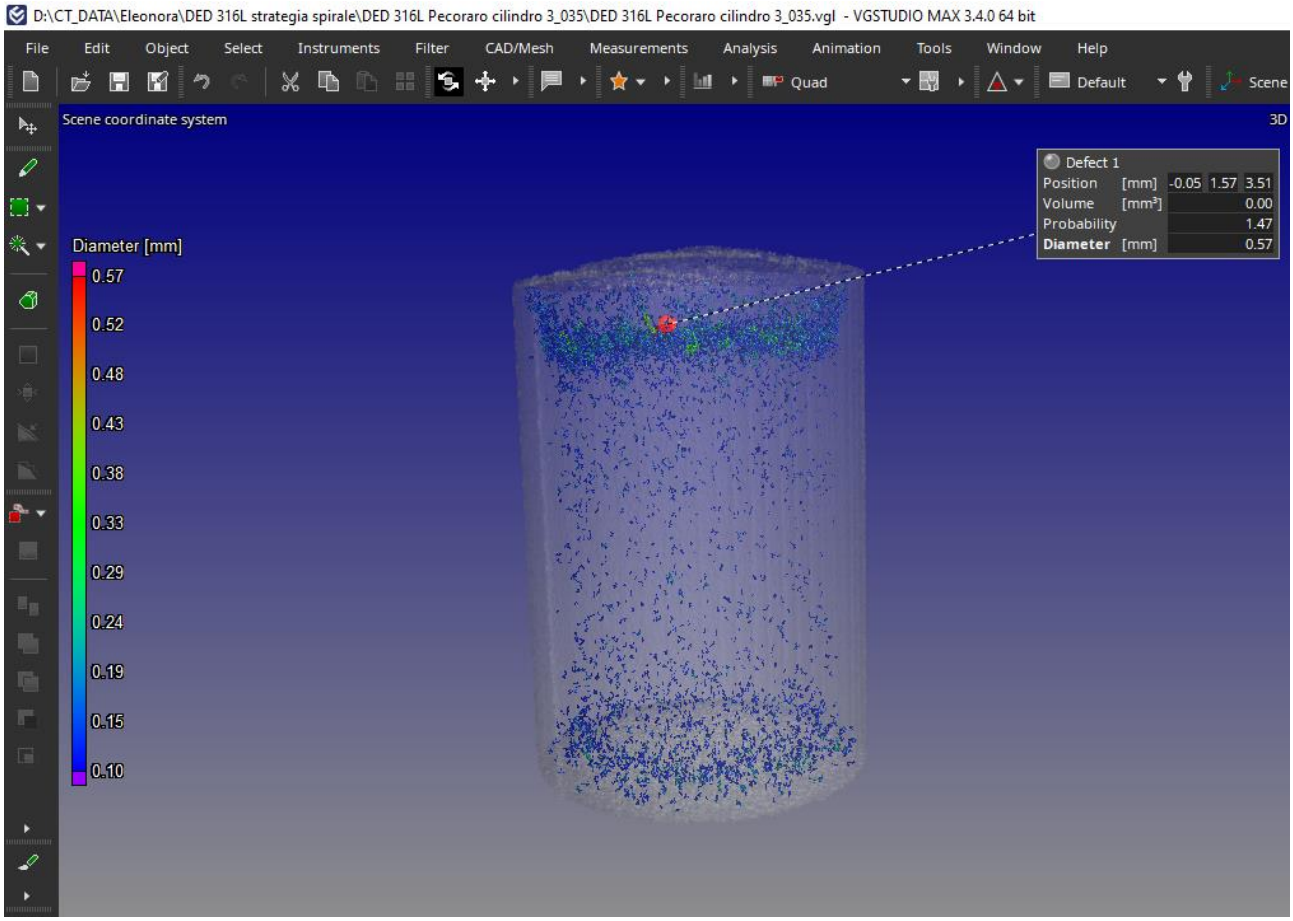


FIGURA 106 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 3 CAMPIONE 0.35 MM

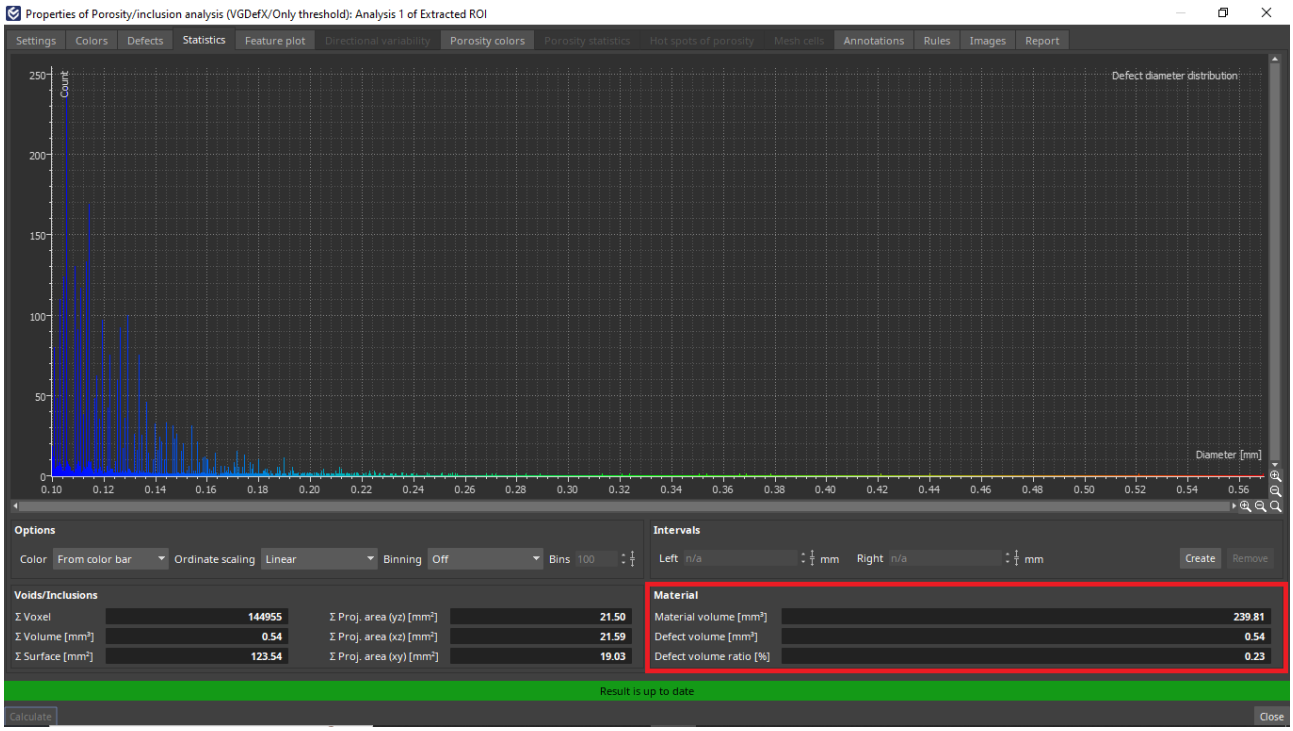


FIGURA 107 RISULTATI ANALISI CILINDRO 3 CAMPIONE 0.35 MM

Dal rendering delle porosità si evince che in tutti i campioni si hanno delle porosità localizzate appena sotto la superficie del campione a circa 2 mm dalla superficie, dovute molto probabilmente al maggiore contatto con l'aria nella parte superiore che si traduce in un raffreddamento più repentino; e nella parte inferiore dove il materiale è a contatto con la piastra di base più fredda dove il calore di fusione tende a disperdersi con più facilità.

Questi fenomeni di raffreddamento repentino hanno portato alla creazione di piccole porosità in quanto il materiale si raffredda prima di diventare omogeneo.

Il cilindro numero 3 con 0.50 mm di altezza layer presenta delle porosità evidenti anche all'interno del pezzo, confermate anche dalla densità minore ricavata dalle misurazioni con la bilancia di Archimede.

Dall'analisi delle porosità, si evince che i difetti maggiori vanno da un diametro di 0.31 mm a 0.79 mm e in ogni provino, sono localizzati nella zona superiore maggiormente affetta dal gradiente di temperatura.

Il Defect volume rate (DVR) è definito da:

$$DVR = \left(1 - \frac{Vnominale}{Vtot}\right) * 100$$

Dove il volume nominale è ricavato dalla densità nominale del materiale e dal peso ricavato dalla bilancia di Archimede, e il volume totale è quello ricavato sperimentalmente dalla densità e peso derivati entrambi dalla Bilancia di Archimede.

Dal Defect Volume Rate fornito dal software, tramite formula inversa sono stati ricavati il volume e la densità derivanti dal software, che verrà in seguito confrontata con la densità ricavata sperimentalmente.

Campione (0,35)	DVR Sperimentale	DVR Vgstudio	Volume Vgstudio	Densità VGstudio [g/mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,84	0,42	246,89	0,0079963
2 Cilindro Φ6	0,88	0,21	246,78	0,0080131
3 Cilindro Φ6	0,57	0,23	240,99	0,0080115
Campione (0,50)	DVR Sperimentale	DVR Vgstudio	Volume Vgstudio	Densità VGstudio [g/mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,22	0,19	207,42	0,0080147
2 Cilindro Φ6	0,27	0,19	204,67	0,0080147
3 Cilindro Φ6	3,31	2,36	205,54	0,0078405

TABELLA 33 DVR, VOLUME E DENSITÀ VGSTUDIO

Fase 5

Studio della strategia

Per l'ultimo test è stato scelto di depositare un parallelepipedo di base 25x25 mm e altezza 10 mm con un foro centrale quadrato di lato 8 mm.

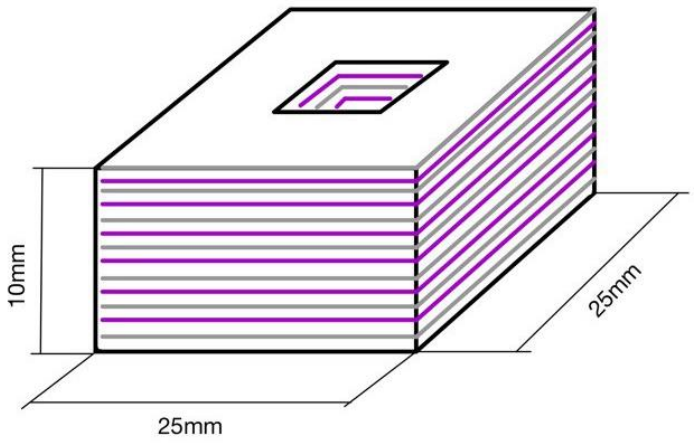


FIGURA 108 PARALLELEPIPEDO FASE 5

La strategia di deposizione utilizzata è simile al caso precedente ovvero una doppia spirale alternata con una rotazione di 90° per layer con contour interno ed esterno. La doppia spirale serve per uniformare la deposizione, la deposizione alternata serve per aumentare la precisione geometrica del prodotto stampato, in quanto la linea di deposizione ha sempre 2 vincoli idealmente uguali per entrambi i lati, la rotazione di 90° serve per fare acquisire al prodotto una maggiore rigidezza in ogni direzione, mentre il contour interno ed esterno ha il compito di migliorare la geometria del campione delimitando in maniera uniforme il campione (inserisce un vincolo uguale in tutti i lati).

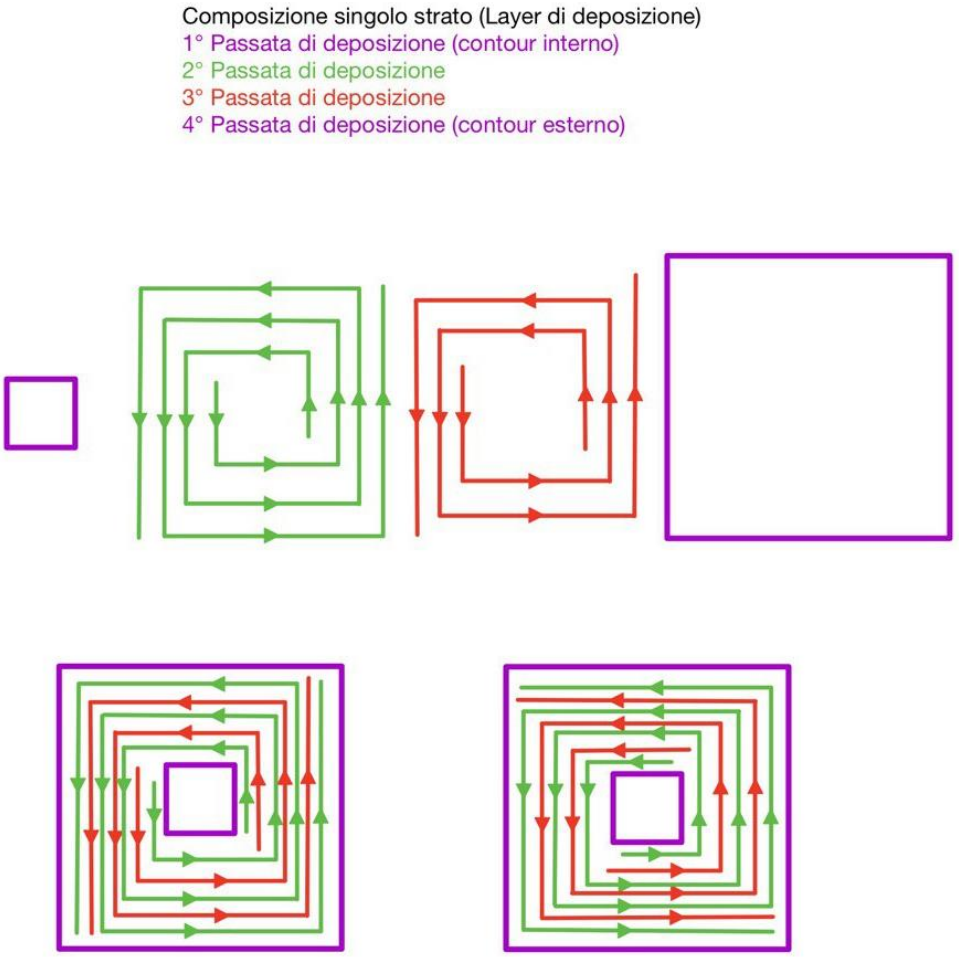


FIGURA 109 SINGOLO LAYER

Anche in questo caso è stato eseguito un disegno su cad dei singoli layer. Successivamente il file con i disegni in 2d degli strati è stato esportato sul programma Mastercam con cui è stato estrapolato il G-code che è stato opportunamente analizzato e modificato per evitare errori e successivamente immesso nella macchina DED per la stampa. Nella costruzione di ogni strato è stata rispettata la distanza di 1.25d per ogni linea di deposizione del singolo layer. Come si evince dall'immagine quando due layer consecutivi si sovrappongono sono presenti sulle diagonali del parallelepipedo delle zone in cui il materiale è depositato in 2 direzioni ortogonali tra loro, questa sovrapposizione tende a far aumentare maggiormente la rigidezza del materiale.

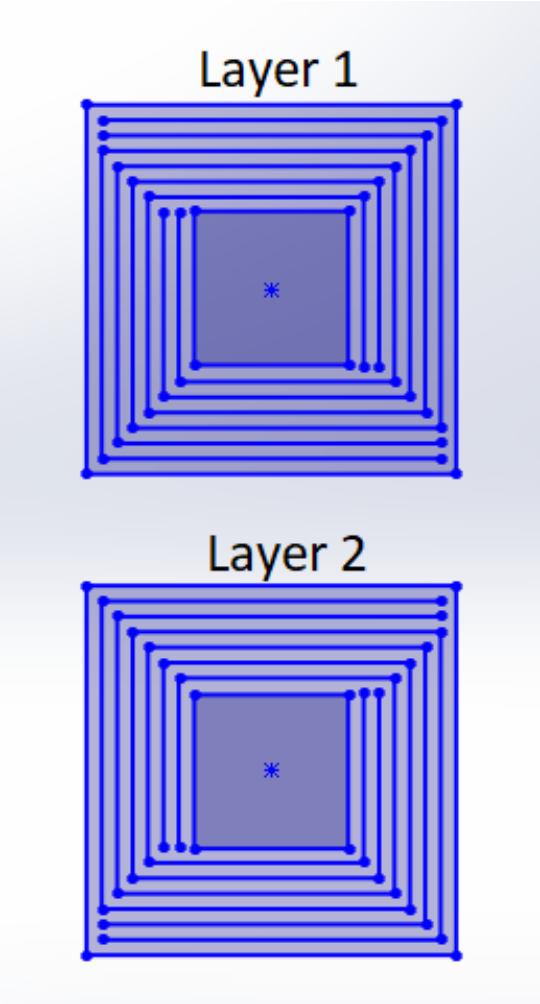


FIGURA 110 LAYER 1 E 2

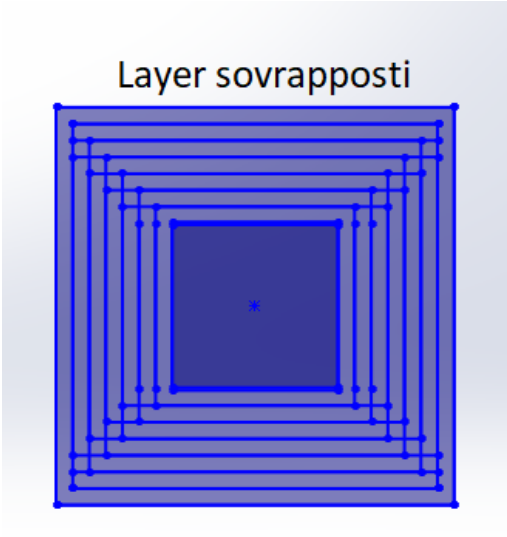


FIGURA 111 LAYER 1 E 2 SOVRAPPOSTI

Deposizione parallelepipedo forato

Sono state dunque eseguite con gli stessi parametri di processo dei test precedenti, 4 deposizioni; 2 con sollevamento della testa di deposizione per ogni layer di 0,35 mm e 2 con sollevamento della testa di deposizione per ogni layer di 0,50 mm.

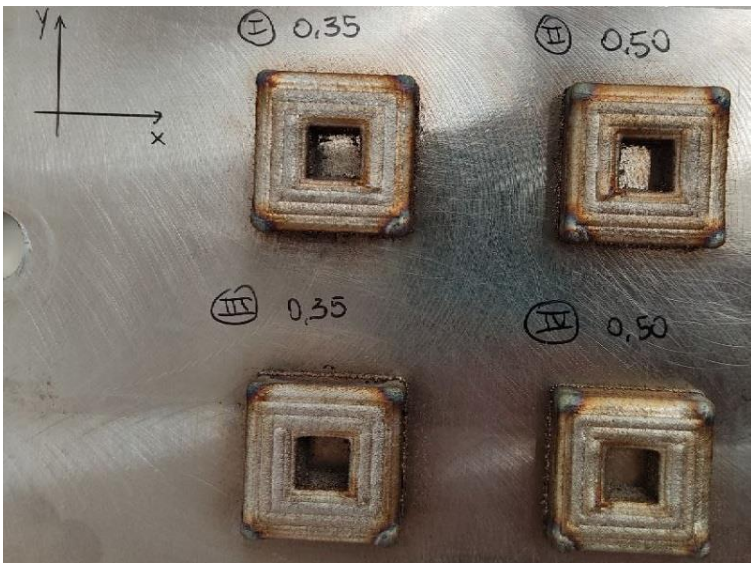


FIGURA 112 DEPOSIZIONE PARALLELEPIPEDI FASE 5

Successivamente i campioni sono stati separati dalla piastra e catalogati come in *figura 113*.

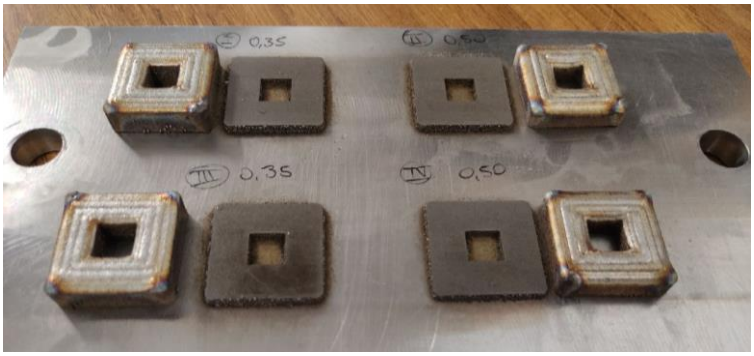


FIGURA 113 SEPARAZIONE DEI CAMPIONI DALLA PIASTRA

Acquisizione immagini allo stereomicroscopio

Dopo aver stampato i 4 campioni, essi sono stati osservati al microscopio a scansione con i risultati ottenuti nelle successive figure.

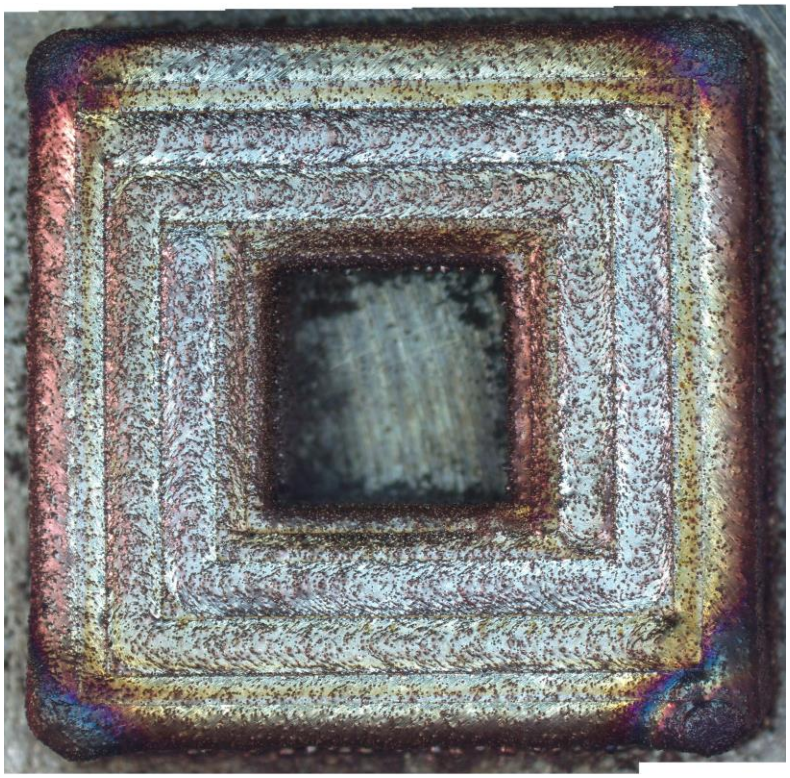


FIGURA 114 SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 0.35 MM

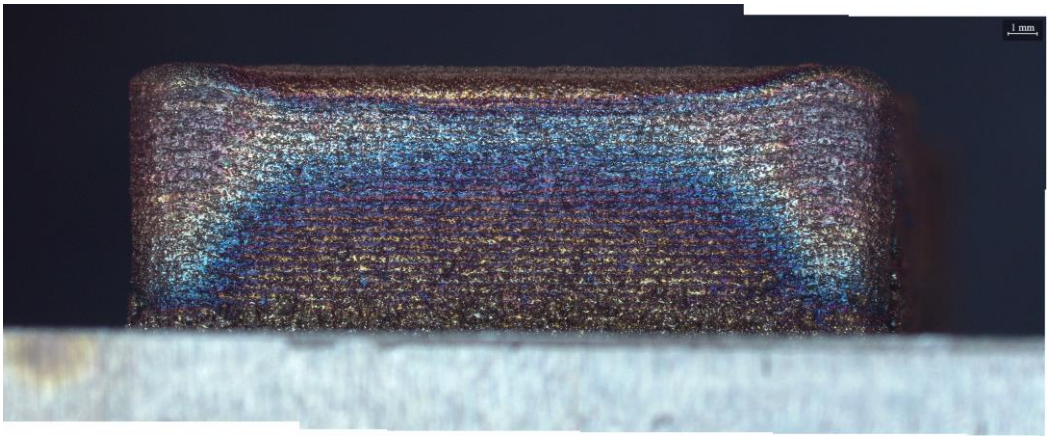


FIGURA 115 SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 0.35 MM

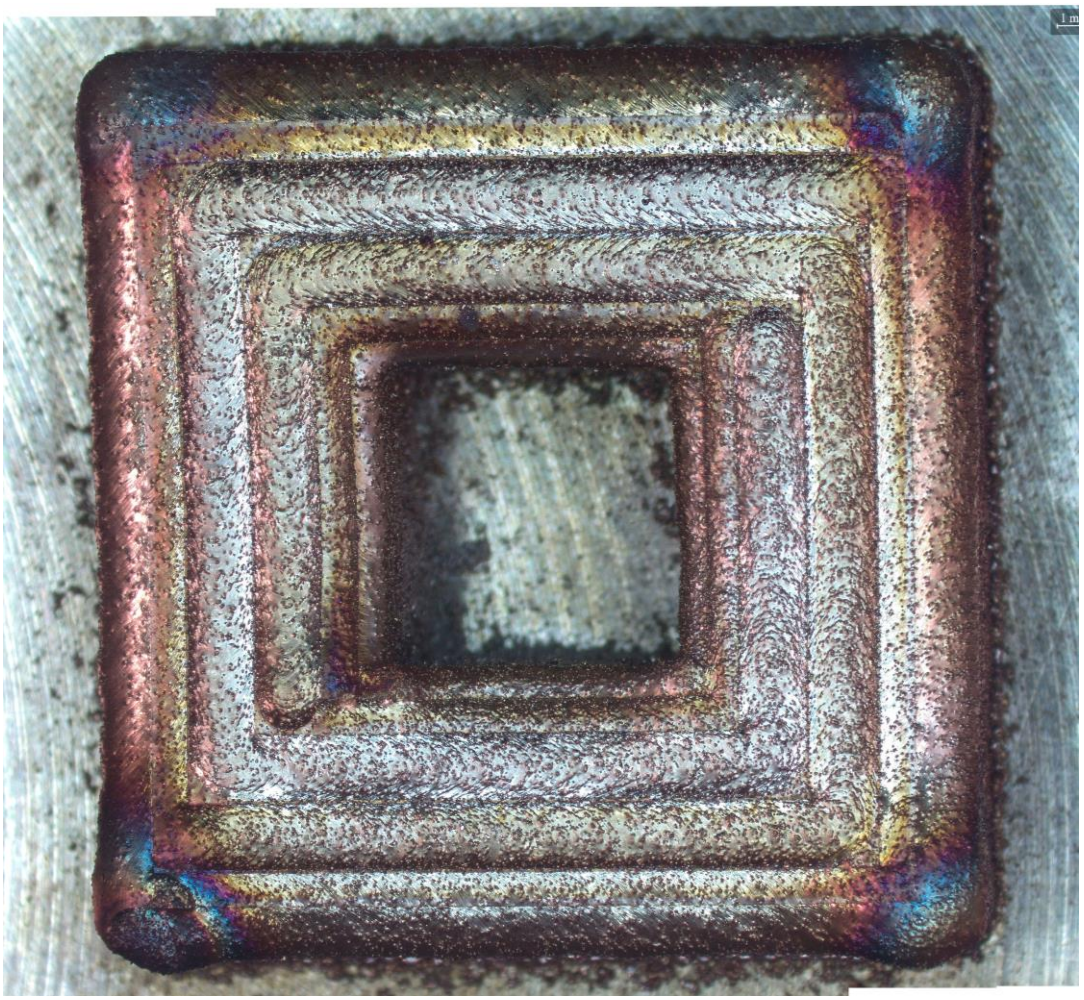


FIGURA 116 SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 0.50 MM

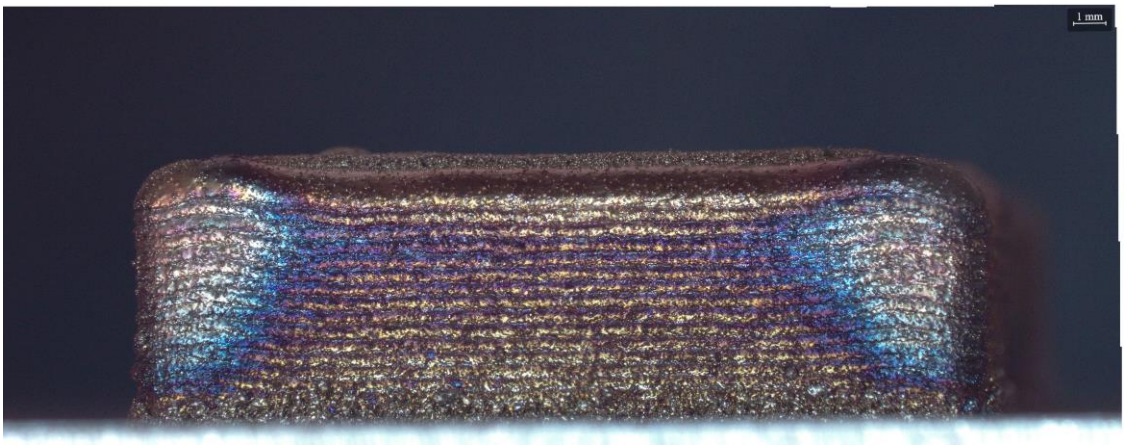


FIGURA 117 SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 0.50 MM

Come si evince dalle acquisizioni è evidente la colorazione accesa sia sulla faccia superiore che sulle facce laterali che è uguale su ogni lato del parallelepipedo. Il manifestarsi di questa zona termicamente alterata può portare problemi alla resistenza meccanica e alla corrosione influenzando le proprietà meccaniche del materiale.

Colorazione degli ossidi

Anche in questo caso è stata effettuata l'analisi degli ossidi dove si evince che nel caso dei campioni con un innalzamento della testa di 0,35 mm è presente, diversamente dal test 4 una prima zona, partendo dalla base, in cui il materiale è in equilibrio termico dovuta presumibilmente alla presenza del foro e dunque al meno calore accumulato grazie a esso (in quanto c'è meno materiale da depositare) man mano che si vanno a depositare strati la temperatura aumenta dagli angoli verso il centro del provino fino ad arrivare a circa 600°C.

Per quanto riguarda il provino con sollevamento della testa di deposizione di 0,50 mm si nota che i campioni sono stati stampati senza eccessi di temperatura (provino in equilibrio termico) tranne che per gli angoli, questo è inevitabile a causa dei rallentamenti della macchina dovuti ai cambi di direzione. Infatti, negli angoli si raggiunge una temperatura di 540/600°C e questa zona che risiede negli angoli tende ad espandersi strato per strato fino all'ultimo layer in cui ha la superficie maggiore.

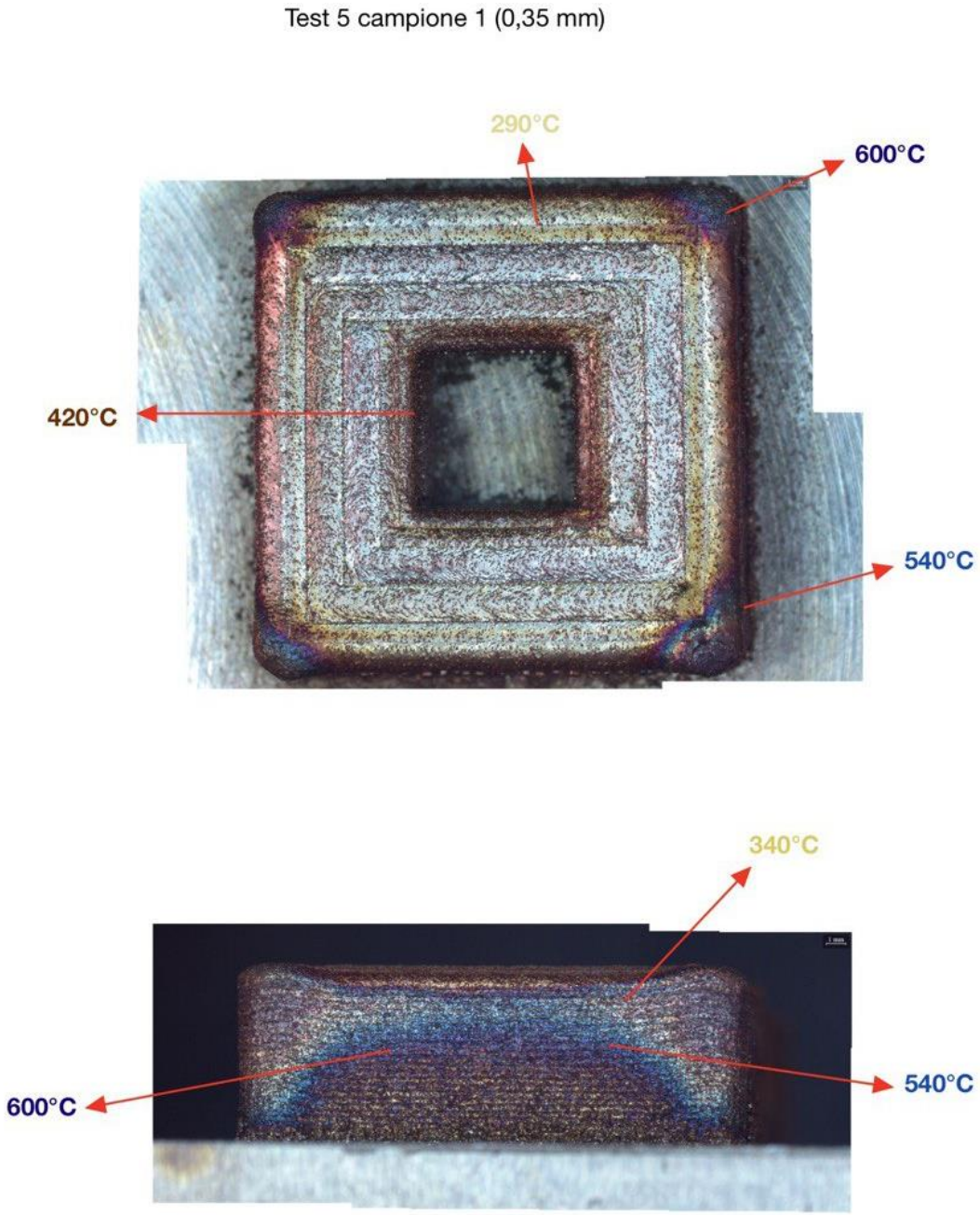


FIGURA 118 COLORAZIONE OSSIDI CAMPIONE 1 0.35 MM

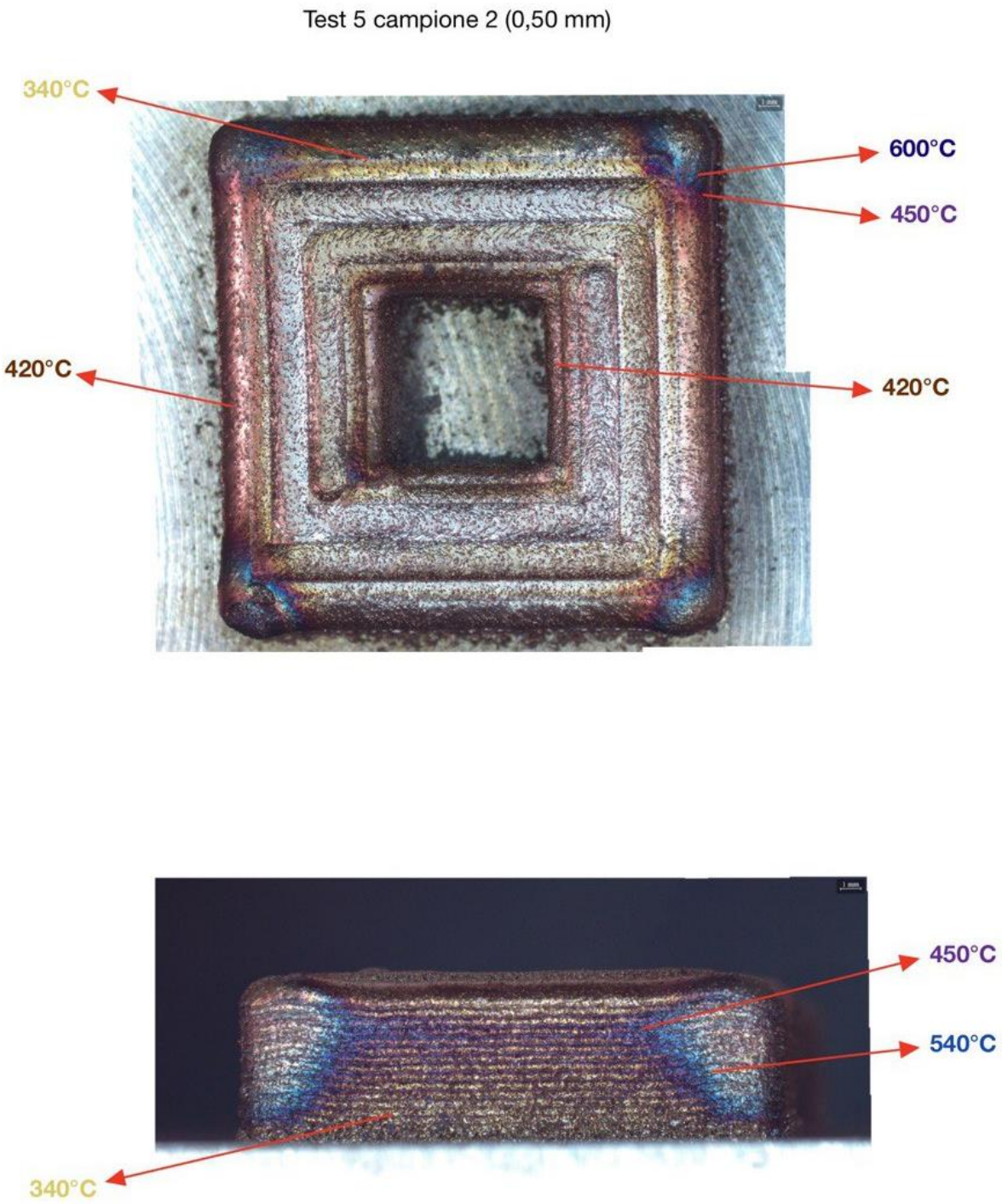


FIGURA 119 COLORAZIONE OSSIDI CAMPIONE 2 0.50 MM

Test 5 campione 3 (0,35 mm)

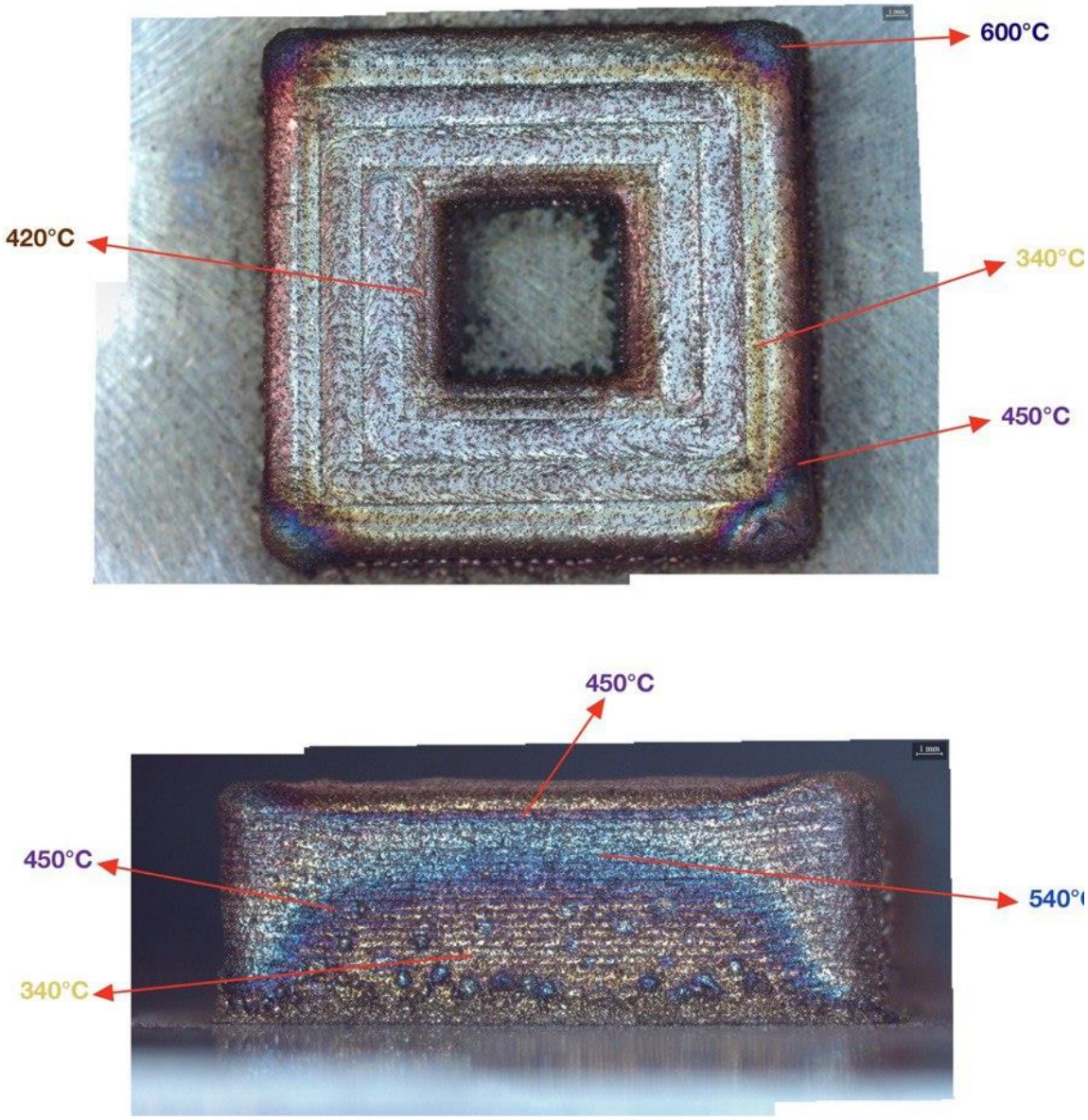


FIGURA 120 COLORAZIONE OSSIDI CAMPIONE 3 0.35 MM

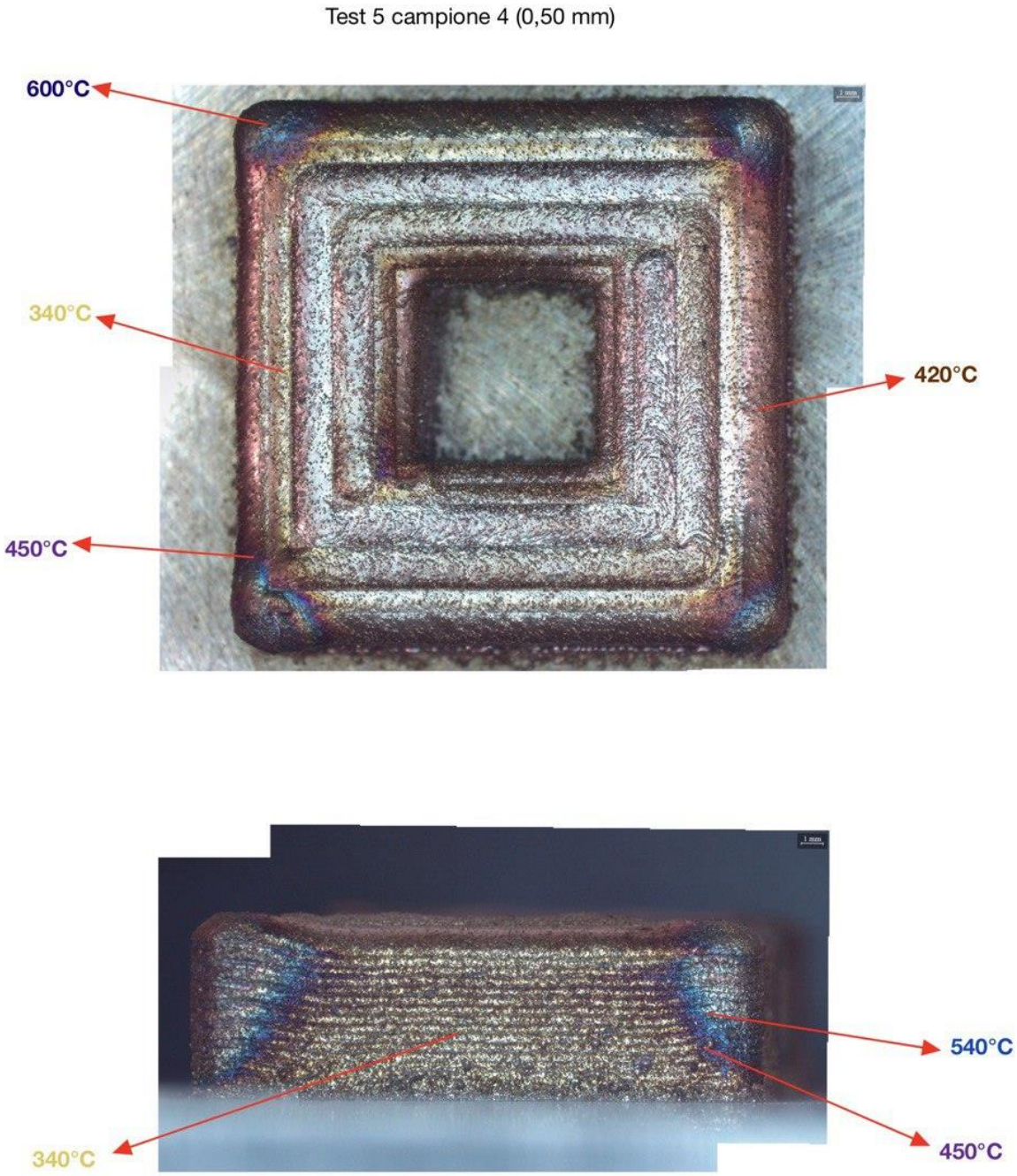


FIGURA 121 COLORAZIONE OSSIDI CAMPIONE 4 0.50 MM

In tutti e quattro i campioni si nota comunque che i punti più critici per la temperatura sono gli angoli; infatti, nei cambi di direzione la testa decelera e riscalda maggiormente la parte interessata come si evince dalla colorazione degli ossidi.

Si evidenzia inoltre che il contour interno per il foro, non essendo molto grande, raggiunge delle temperature maggiori rispetto il resto del pezzo intorno ai 420°C.

Acquisizione al rugosimetro

In seguito, sono state eseguite delle misurazioni sulla rugosità dei campioni.

FIGURA 122 MISURE RUGOSIMETRO FASE 5

Per tutti i campioni sono state eseguite 6 misure, come si vede in figura: 3 sulla superficie superiore dei campioni (misure 1,2,3) e 3 sulla superficie laterale (misure 4,5,6).

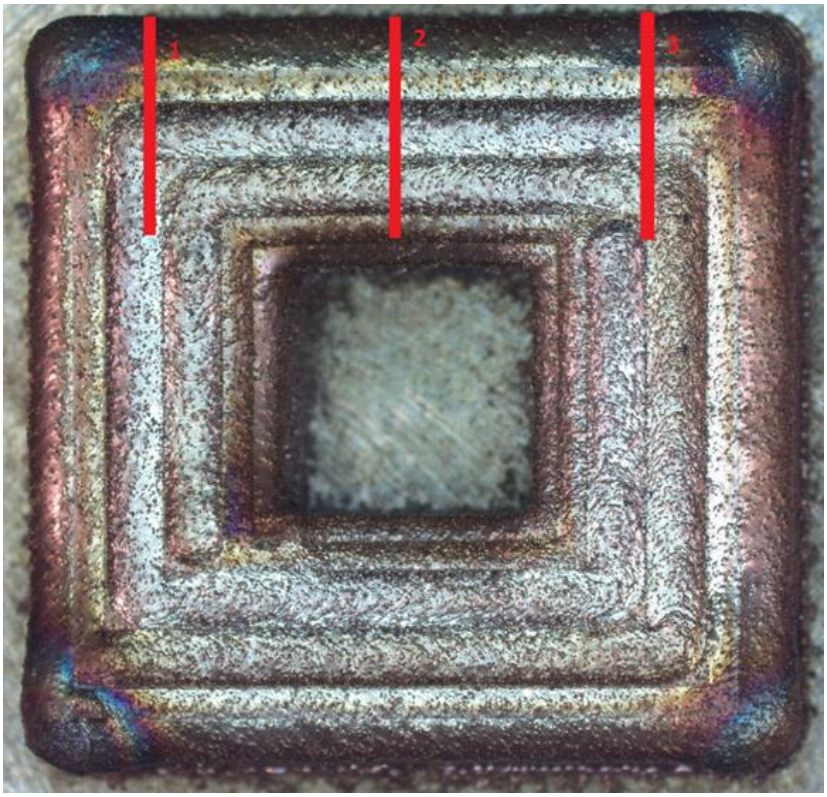


FIGURA 123 MISURAZIONE RUGOSIMETRO SUPERFICIE SUPERIORE

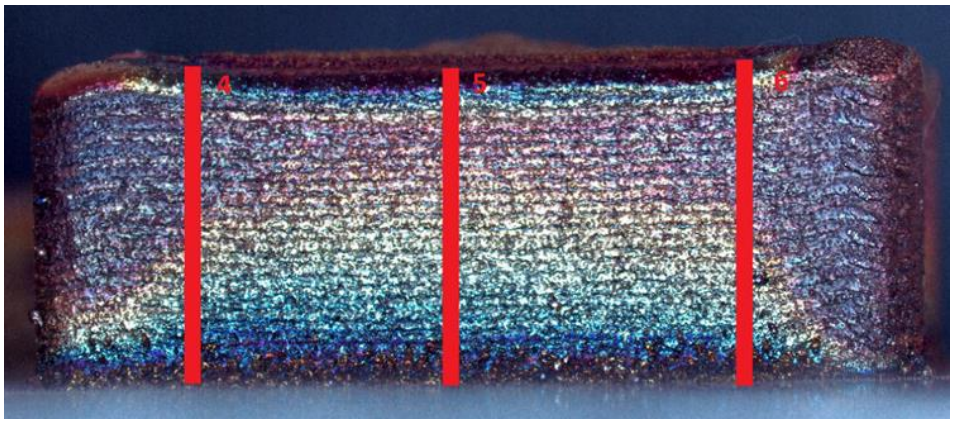


FIGURA 124 MISURAZIONE RUGOSIMETRO SUPERFICIE LATERALE

Anche in questo caso le rugosità (Ra, Rq, Rt, Rz) sono simili nei 4 provini, quello che varia con l'aumentare dell'altezza di sollevamento della testa sono anche in questo caso le misure di ondulazione (Wa,Wq,Wt) infatti con un sollevamento della testa di deposizione maggiore aumenta l'altezza del singolo strato e dunque anche la misura dell'ondulazione e questo vale sia per le misure superiori che per quelle laterali come si evince dalle tabelle nella pagina seguente.

Provino 1	0,35	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
1	11,736	14,824	75,98	57,379	31,678	38,302	131,593
2	10,299	12,824	82,195	52,073	25,98	30,184	107,902
3	11,746	15,121	84,579	61,835	25,841	31,436	114,77
medie	11,26	14,26	80,92	57,10	27,83	33,31	118,09

Provino 1	0,35	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
4	12,915	15,724	82,744	63,12	15,103	19,015	73,778
5	14,461	17,498	99,839	73,565	12,042	15,11	59,922
6	10,547	13,464	76,719	57,166	15,741	20,496	80,95
medie	12,64	15,56	86,43	64,62	14,30	18,21	71,55

TABELLA 34 MISURA RUGOSITÀ CAMPIONE 1

Provino 2	0,50	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
1	11,515	14,649	89,979	55,877	73,603	91,22	318,526
2	11,217	14,022	82,645	56,678	61,037	77,277	292,334
3	9,647	12,28	71,433	44,658	57,189	70,038	295,06
medie	10,79	13,65	81,35	52,40	63,94	79,51	301,97

Provino 2	0,5	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
4	16,351	21,353	117,741	93,66	14,061	17,717	69,383
5	16,712	20,002	94,068	77,369	25,247	31,25	104,842
6	15,356	19,335	114,214	84,945	17,688	22,159	95,40
medie	16,14	20,23	108,67	85,32	19,00	23,71	89,87

TABELLA 35 MISURA RUGOSITÀ CAMPIONE 2

Provino 3	0,35	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
1	12,597	15,438	85,055	62,668	53,301	64,471	224
2	9,849	12,23	69,104	46,194	39,285	47,097	180,563
3	11,636	14,133	72,95	51,554	39,971	49,4	212,16
medie	11,36	13,93	75,70	53,47	44,19	53,66	205,57

Provino 3	0,35	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
4	15,649	18,602	104,028	73,569	9,43	12,669	60,683
5	12,925	15,929	78,569	63,258	12,606	16,112	61,323
6	11,168	14,634	77,557	63,378	11,305	13,722	59,74
medie	13,25	16,39	86,72	66,74	11,11	14,17	60,58

TABELLA 36 MISURA RUGOSITÀ CAMPIONE 3

Provino 4	0,50	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
1	9,107	12,128	74,737	45,871	63,191	79,445	318,514
2	8,935	11,482	77,579	46,141	64,648	82,948	338,556
3	9,376	12,665	85,535	49,973	52,641	61,919	221,85
medie	9,14	12,09	79,28	47,33	60,16	74,77	292,97

Provino 4	0,5	Cut-off	0,8	x5			
MISURA	Ra	Rq	Rt	Rz	Wa	Wq	Wt=Wz
4	15,443	19,354	124,106	81,295	11,931	14,008	54,448
5	19,311	22,853	114,801	86,258	11,646	16,603	73,011
6	20,044	23,732	125,276	88,447	23,987	26,859	86,62
medie	18,27	21,98	121,39	85,33	15,85	19,16	71,36

TABELLA 37 MISURA RUGOSITÀ CAMPIONE 4

Anche in questo caso per le misure della rugosità 2 e 5 sono stati estratti anche i profili, primario, rugosità e ondulazione, (in figura i risultati dell'ondulazione più significativa). Come già notato dai risultati i valori di ondulazione aumentano con l'aumentare dell'altezza della testa di deposizione.

FIGURA 125 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 1

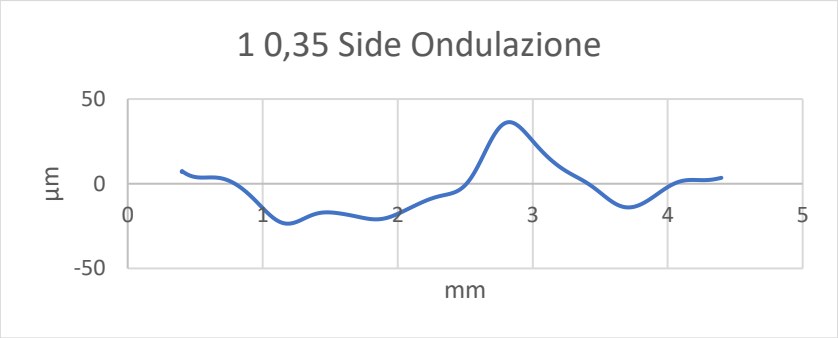


FIGURA 126 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 1

FIGURA 127 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 2

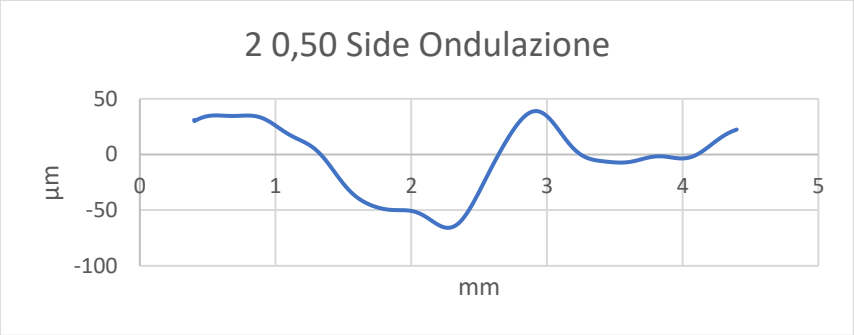


FIGURA 128 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 2

FIGURA 129 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 3

FIGURA 130 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 3

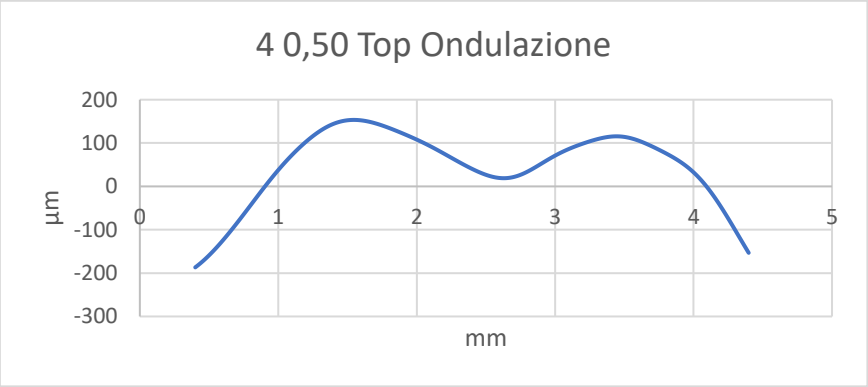


FIGURA 131 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE SUPERIORE CAMPIONE 4

FIGURA 132 PROFILO ONDULAZIONE SUPERFICIE LATERALE CAMPIONE 4

Misura e confronto della larghezza di traccia

È stato nuovamente fatto il confronto tra la larghezza di traccia del test 3 e quelle del test 5, per quanto riguarda la larghezza superiore dsup (in *figura 133* quota gialla), è possibile misurarla osservando due tracce affiancate, per quanto riguarda la larghezza di traccia totale per confrontare i valori con il test 3 non è possibile misurare direttamente gli strati inferiori perché non sono visibili, essendo teoricamente, la traccia inferiore uguale alla traccia superiore la larghezza totale dtot (in *figura 133* quota blu) può essere misurata come la distanza tra 3 tracce affiancate, ma non essendoci in questo caso abbastanza layer a disposizione per la misura è stata calcolata moltiplicando dsup*3/2.

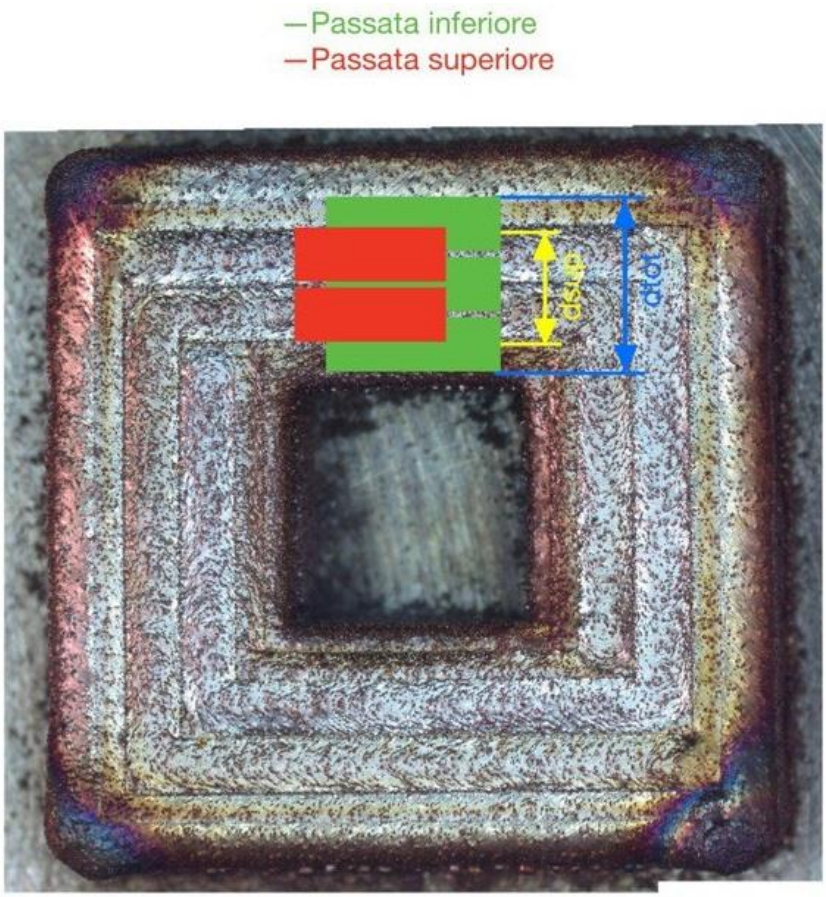


FIGURA 133 LARGHEZZA DI TRACCIA DSUP E DTOT

Con il software ImageJ sono state acquisite le misure sulle immagini del microscopio (come si vede in *figura 134*), le misurazioni sono state effettuate per tutti e quattro i parallelepipedi del test 5.

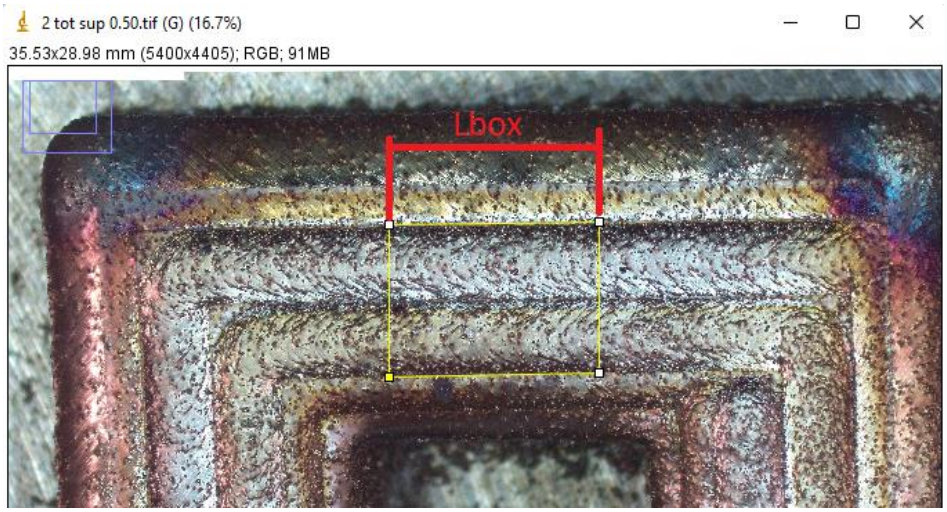


FIGURA 134 MISURAZIONE LARGHEZZA DI TRACCIA TECNICA DEL BOX DI MISURA

Confrontando i risultati con quelli ottenuti per la singola traccia, test 3, si nota che nei parallelepipedi hanno una larghezza di traccia, sia superiore che totale, leggermente maggiore

in media del 3% per i campioni 1 e 3 e 6% per i campioni 2 e 4, dovuta probabilmente all'aumento di temperatura nel parallelepipedo (essendo composto da diversi strati rispetto alla singola traccia) e quindi l'aumento dell'efficienza del laser (in *tabella 40* medie e deviazioni standard rispetto al test 3 calcolate per entrambe le tipologie di provini 0,35 mm e 0,50 mm).

Test 5	Lbox[mm]	d_{TOT} [mm]	$Area_{Sup}$ [mm^2]	d_{SUP} [mm]
1(0,35)	6	5,983	23,933	3,989
2(0,50)	6	6,494	25,974	4,329
3(0,35)	6	5,958	23,831	3,972
4(0,50)	6	6,014	24,054	4,009

TABELLA 38 DTOT E DSUP FASE 5

Test 3	Lbox[mm]	Area [mm^2]	d_{TOT} [mm]	$Area_{Sup}$ [mm^2]	d_{SUP} [mm]
traccia singola 1,25d	20	116,579	5,829	78,135	3,907

TABELLA 39 DTOT E DSUP FASE 3

Analisi	TOT[mm]	SUP [mm]
Med. d Test 5 (0,35)	5,971	3,980
Med. d Test 5 (0,50)	6,254	4,169
Dev. Test 5 (0,35)	0,083	0,043
Dev. Test 5 (0,50)	0,343	0,220

TABELLA 40 MEDIA E DEVIAZIONE DELLA FASE 5 RISPETTO ALLA FASE 3

Misura e confronto dell'altezza di traccia

Tramite le acquisizioni al microscopio della superficie laterale è stata valutata l'altezza media dei singoli strati depositati, la misura è stata effettuata con la tecnica del box e dividendo la lunghezza per il numero di strati depositati per ogni campione (28 layer per i campioni con 0,35 mm di sollevamento della testa di deposizione, 20 layer con 0,50 mm di sollevamento della testa di deposizione) si ottiene l'altezza media di ogni strato.

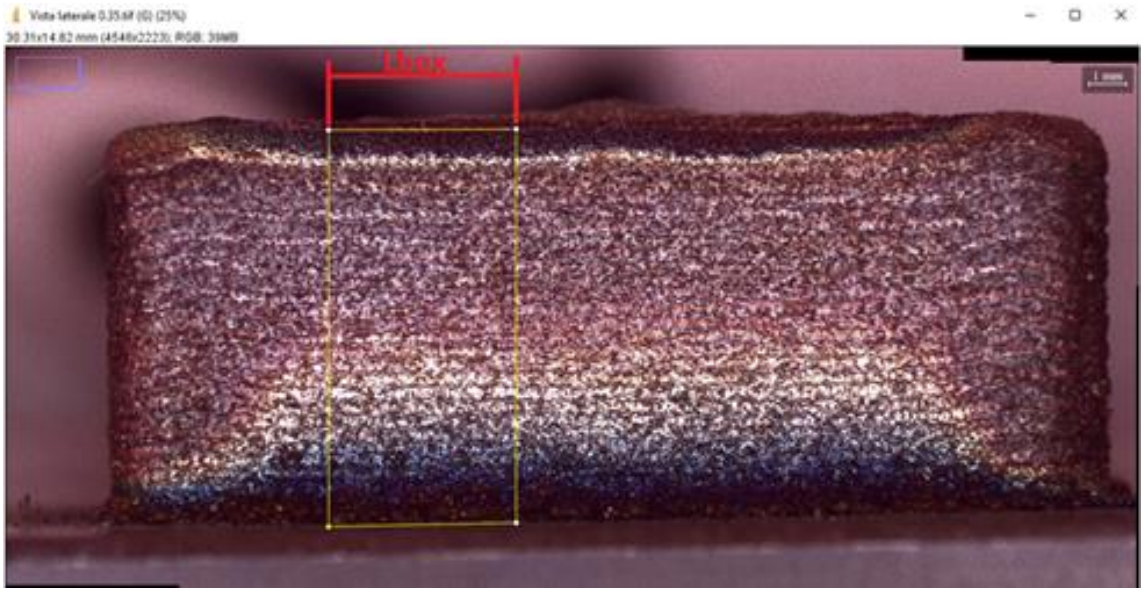


FIGURA 135 MISURAZIONE ALTEZZA DI TRACCIA TECNICA DEL BOX DI MISURA

Si evince dalla *tabella 41* che i campioni 1 e 3 (0,35 mm) hanno un'altezza minore rispetto ai campioni 2 e 4 (0,50 mm) questo perché per arrivare alla stessa altezza sono stati depositati un diverso numero di strati con sollevamento della testa differente e dunque aumentando l'altezza di deposizione aumenta in modo direttamente proporzionale anche l'altezza media degli strati come è evidenziato nel grafico.

Test 5	Lbox[mm]	Area [mm^2]	N° layer	h_{Media} [mm]
1(0,35)	5	46,256	28	0,330
2(0,50)	5	41,357	20	0,414
3(0,35)	5	47,727	28	0,341
4(0,50)	5	40,541	20	0,405

TABELLA 41 ALTEZZA DI TRACCIA

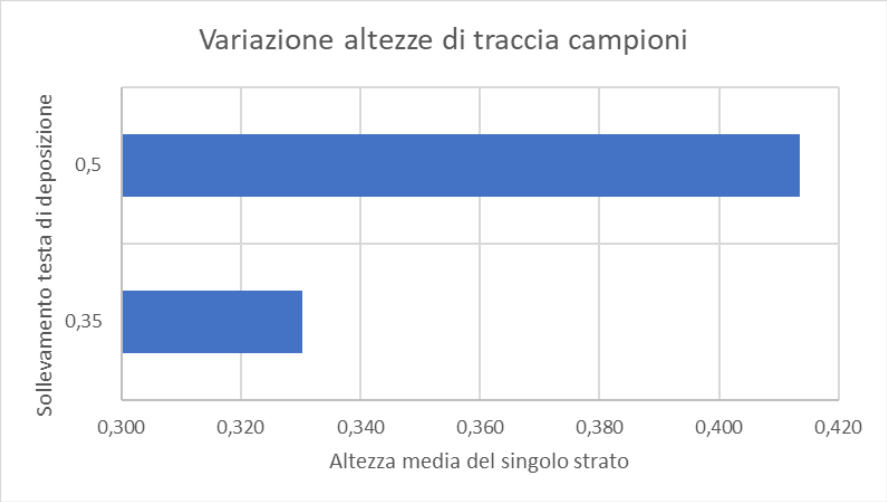


FIGURA 136 VARIAZIONE ALTEZZA DI TRACCIA

Si nota dalle acquisizioni al microscopio, che l'altezza delle tracce cresce man mano che aumentano gli strati depositati, questo è dovuto all'aumento dell'efficienza all'aumentare degli strati (la macchina va a stampare su un materiale che è sempre più caldo).

Volendo confrontare l'altezza di traccia della singola traccia con l'altezza media dello strato del parallelepipedo, si nota che nei campioni 1 e 3 si ha un aumento dell'altezza dello strato rispetto alla singola traccia rispettivamente del 40,8% e 42,6% mentre nei campioni 2 e 4 si ha un aumento dell'altezza dello strato rispetto alla singola traccia rispettivamente del 52,7% e 51,7% molto simili tra loro rispetto al test precedente avendo utilizzato lo stesso powder feeder per entrambi.

	h_{Media} [mm]	Incremento h %	Deviazione h
1,25d	0,1957	0,0	0,0000
1(0,35)	0,3304	40,8	0,0952
2(0,50)	0,4136	52,7	0,1541
3(0,35)	0,3409	42,6	0,1027
4(0,50)	0,4054	51,7	0,1483

Misura della densità alla Bilancia di Archimede

È stata dunque misurata la densità dei campioni con l'ausilio della Bilancia di Archimede.

FIGURA 137 MISURA PESO BILANCIA DI ARCHIMEDE

FIGURA 138 MISURA DENSITÀ BILANCIA DI ARCHIMEDE

Dalla misura della densità si vede che i campioni hanno una densità inferiore rispetto a quella teorica in media del 1,4%.

In questo caso avendo utilizzato lo stesso powder feeder per tutti e 4 i campioni la densità dei campioni risulta essere molto simile tra loro.

Campione	Densità reale [g/mm^3]
1(0,35)	0,0079485
2(0,5)	0,0079334
3(0,35)	0,0079027
4(0,5)	0,0078900

TABELLA 42 DENSITÀ CAMPIONI FASE 5

Campione	Err relativo Volume [mm^3]	Err percentuale Volume
1(0,35)	431,911	9,424
2(0,5)	525,819	13,092
3(0,35)	466,989	10,057
4(0,5)	508,884	12,650
Medie	483,401	11,306

Campione	Err relativo Densità [g/mm^3]	Err percentuale densità
1(0,35)	0,0000815	1,015
2(0,5)	0,0000966	1,203
3(0,35)	0,0001273	1,585
4(0,5)	0,0001400	1,743
Medie	0,0001113	1,387

Campione	Err relativo peso [g]	Err percentuale Peso
1(0,35)	3,807	10,344
2(0,5)	4,560	14,137
3(0,35)	4,282	11,483
4(0,5)	4,578	14,173
Medie	4,306	12,534

TABELLA 43 ERRORE RELATIVO E PERCENTUALE DEL VOLUME, DENSITÀ E PESO

Taglio dei cilindri

Infine, da ogni campione sono stati ricavati 2 cilindretti di diametro 6 mm con la WEDM Wire Electrical Discharge Machining (elettroerosione a filo). Per tagliare i cilindretti è stato necessario disegnare il percorso di taglio della macchina sul Cad come si vede in *figura 139* e inserirlo nel software della macchina per far partire il taglio.

FIGURA 139 PANNELLO DI CONTROLLO WEDM CON PERCORSO DI TAGLIO

Dopo aver tagliato tutti i cilindri sono stati numerati e catalogati come in *figura 140*.

FIGURA 140 CATALOGAZIONE CILINDRI FASE 5

Di seguito la disposizione dei cilindri nei quattro campioni utile all'identificazione di ogni cilindro.

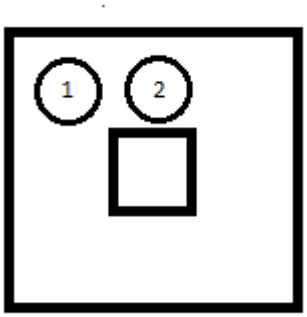


FIGURA 141 IDENTIFICAZIONE DEI CAMPIONI

Misura della densità dei cilindri

Nel primo campione la densità del cilindro 1(angolo) risulta essere abbastanza minore rispetto a quella del campione intero.

Nel secondo e quarto campione i cilindri hanno densità omogenea e molto vicina alla densità del campione intero

Nel terzo campione la densità dei cilindri è simile ma un po' distante da quella teorica.

Campione 1 (0,35)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0074749	1,6632	222,50
2 Cilindro Φ6	0,0078515	1,6475	209,83

Campione 2 (0,50)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0078359	1,4341	183,02
2 Cilindro Φ6	0,0077852	1,4029	180,20

Campione 3 (0,35)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0076974	1,6970	220,46
2 Cilindro Φ6	0,0076980	1,6627	215,99

Campione 4 (0,50)	Densità reale [g/mm^3]	Peso reale [g]	Volume reale [mm^3]
1 Cilindro Φ6	0,0078400	1,4425	183,99
2 Cilindro Φ6	0,0078272	1,4060	179,63

TABELLA 44 DENSITÀ, PESO E VOLUME DEI CILINDRI DA BILANCIA DI ARCHIMEDE

In questo caso, diversamente dal caso precedente, come si evince dagli errori percentuali i campioni stampati con un sollevamento della testa di 0,35 mm (1 e 3) hanno degli errori di densità in confronto con quella teorica maggiori rispetto ai campioni 2 e 4.

Campione	Densità teorica [g/mm^3]	Media densità cilindri [g/mm^3]	Err relativo Densità [g/mm^3]	Err percentuale densità
1(0,35)	0,00803	0,0076632	0,0003668	4,568
2(0,5)	0,00803	0,00781055	0,0002195	2,733
3(0,35)	0,00803	0,0076977	0,0003323	4,138
4(0,5)	0,00803	0,0078336	0,0001964	2,446

TABELLA 45 ERRORE RELATIVO E PERCENTUALE DI DENSITÀ

Acquisizione al Tomografo

Anche per i cilindri dei campioni forati è stata eseguita un'analisi al tomografo con il procedimento esaminato precedentemente per la Fase 4.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

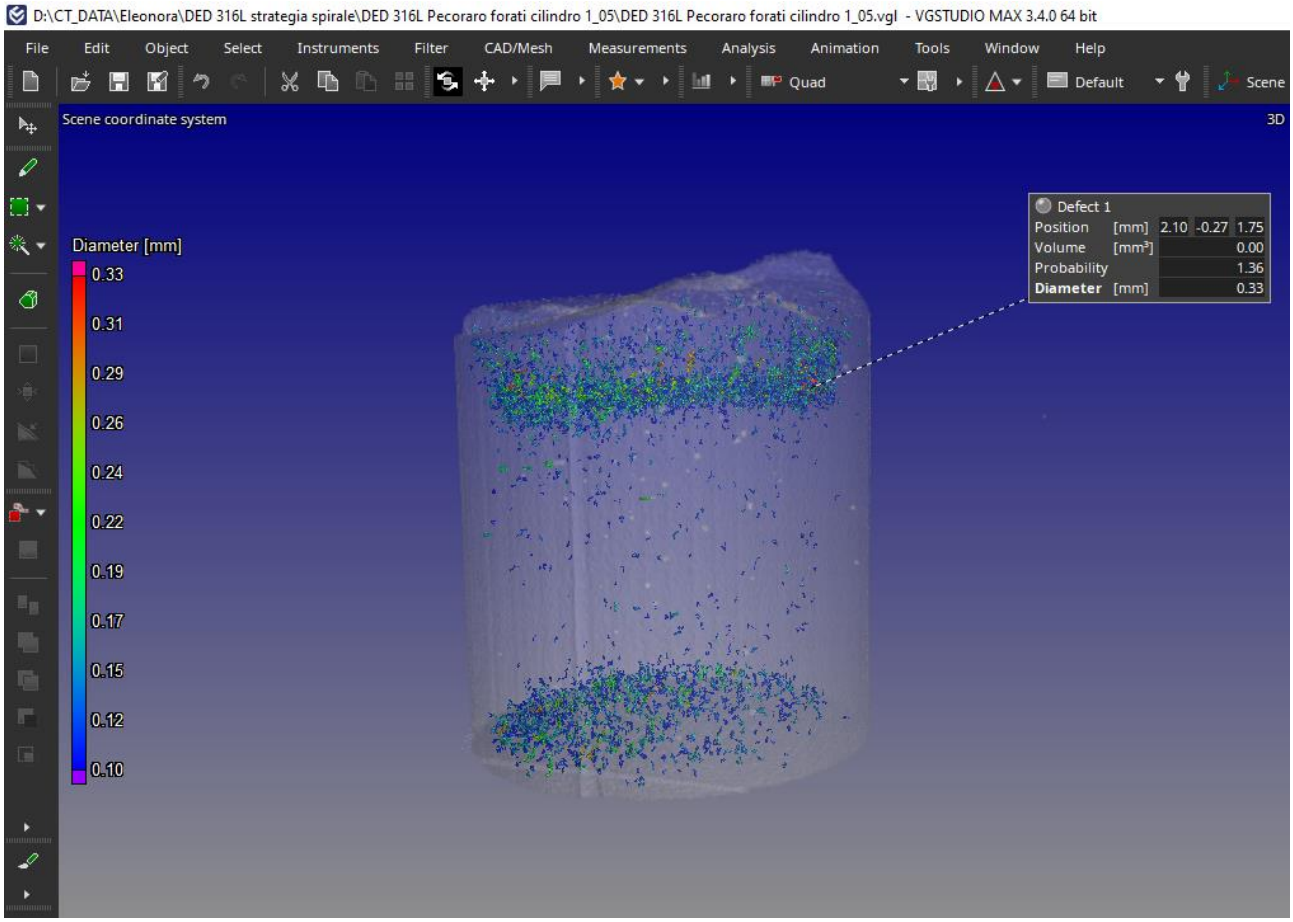


FIGURA 142 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 1 CAMPIONE FORATO 0.50 MM

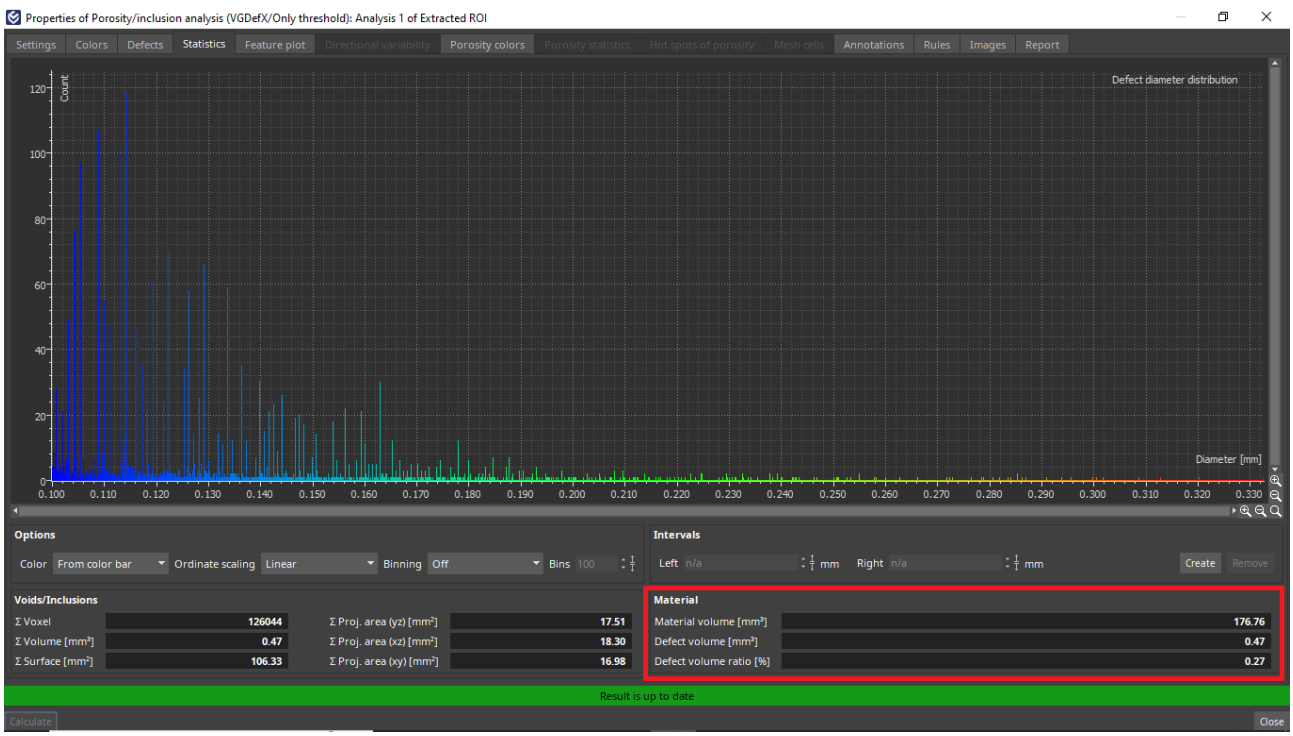


FIGURA 143 RISULTATI ANALISI CILINDRO 1 CAMPIONE FORATO 0.50 MM

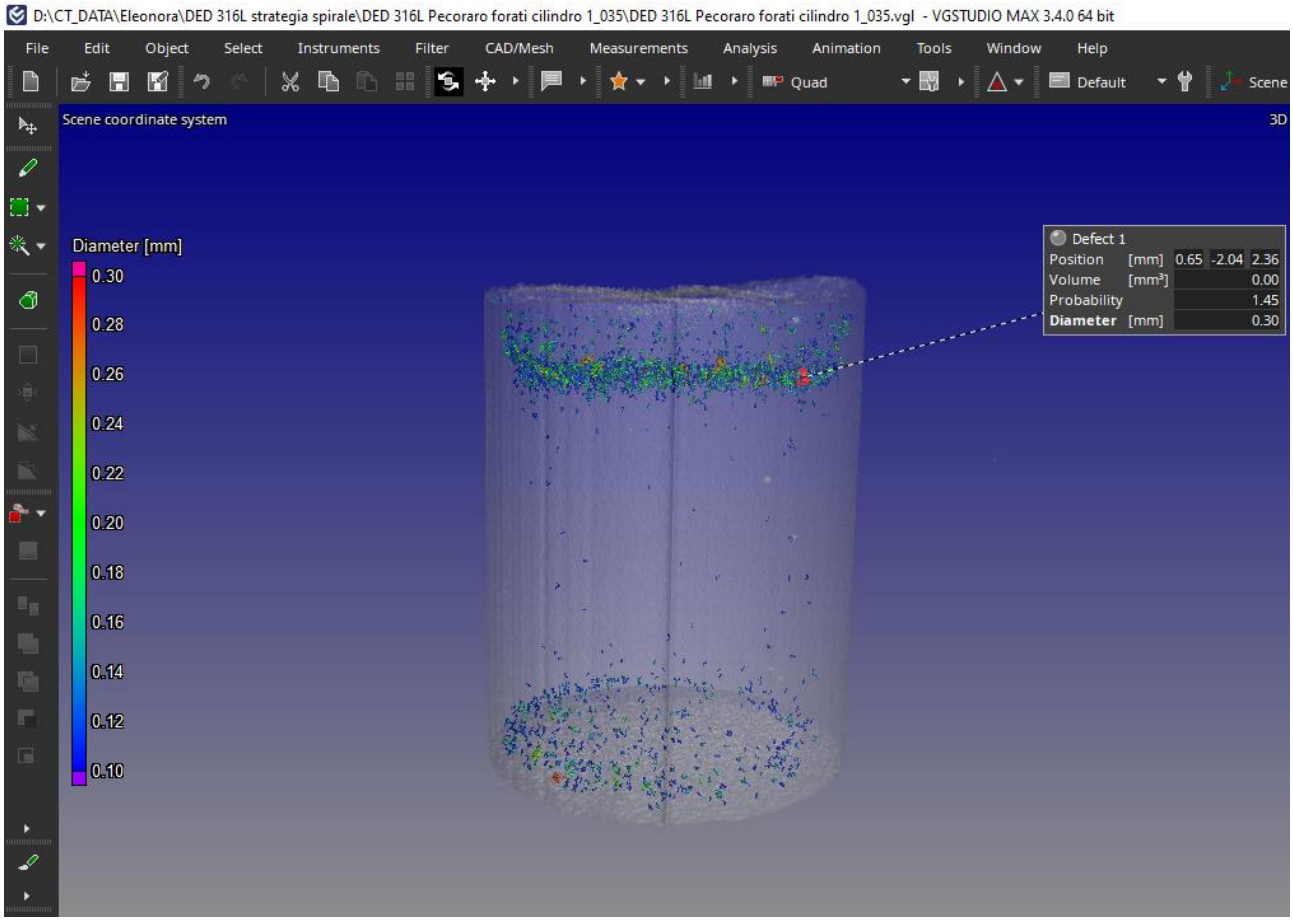


FIGURA 144 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 1 CAMPIONE FORATO 0.35 MM

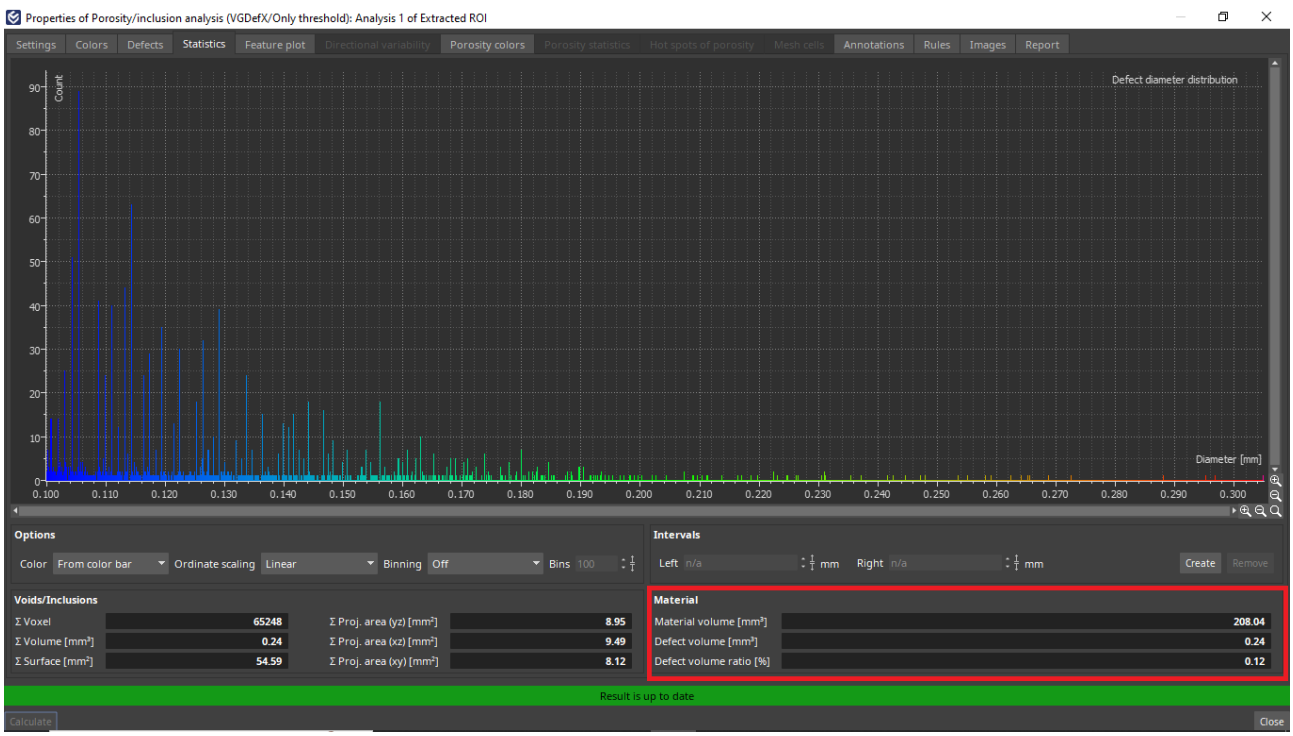


FIGURA 145 RISULTATI ANALISI CILINDRO 1 CAMPIONE FORATO 0.35 MM

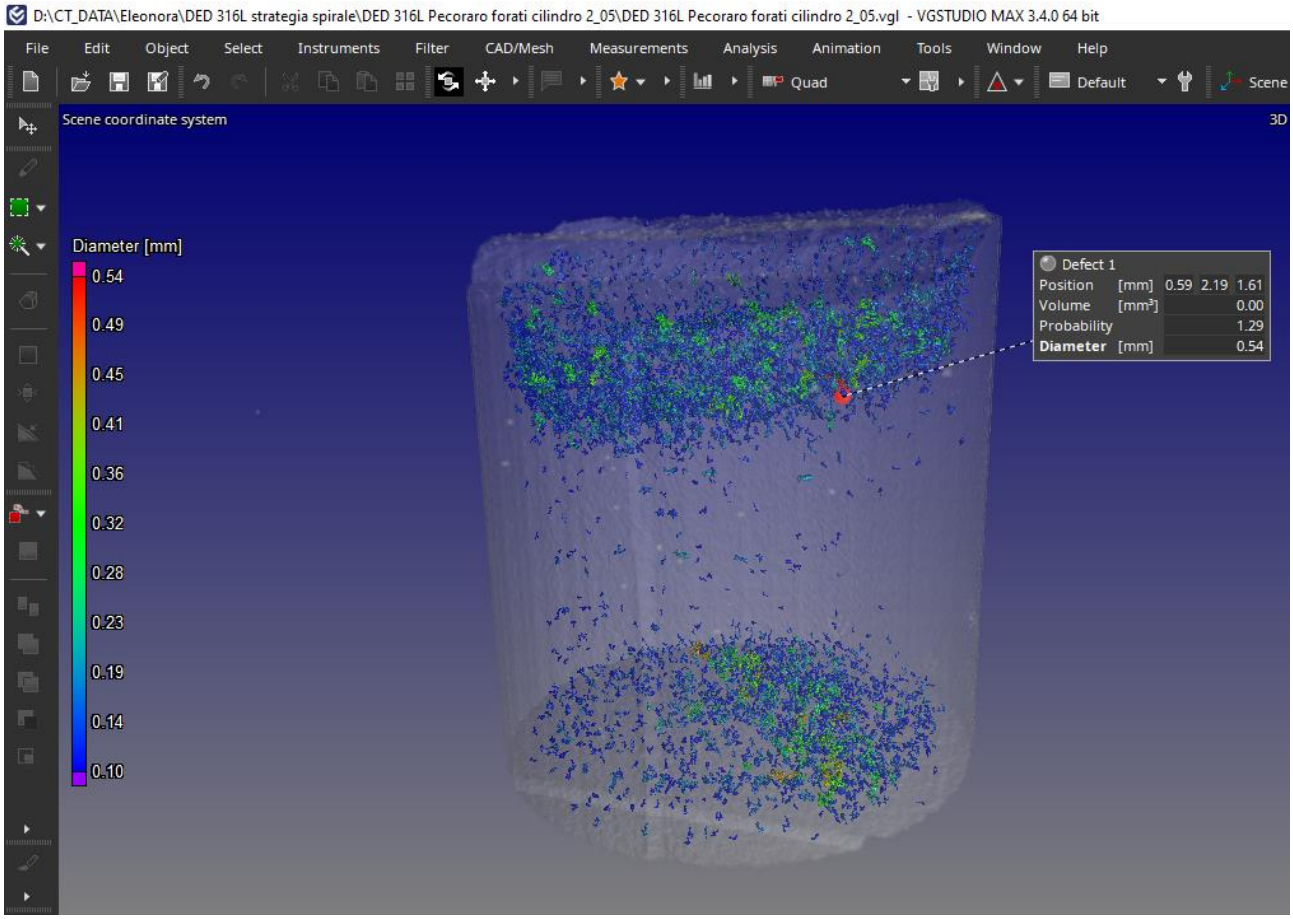


FIGURA 146 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 2 CAMPIONE FORATO 0.50 MM

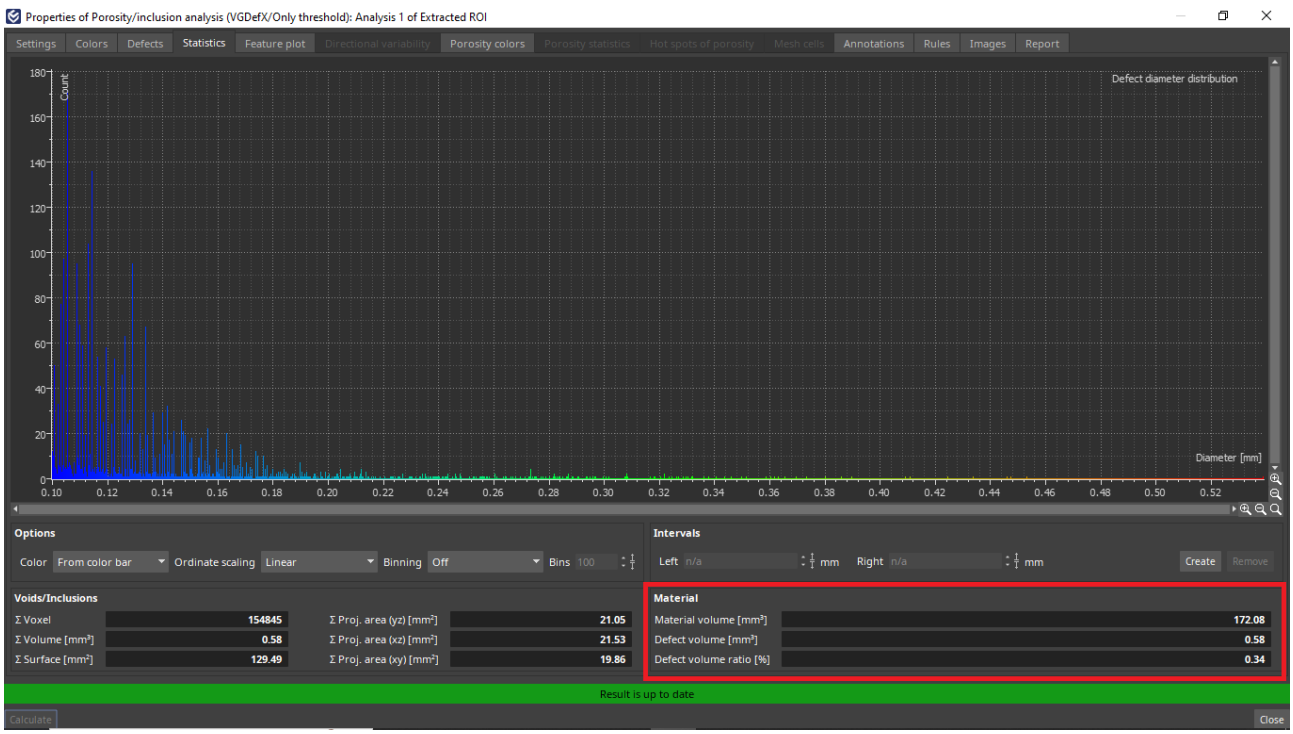


FIGURA 147 RISULTATI ANALISI CILINDRO 2 CAMPIONE FORATO 0.50 MM

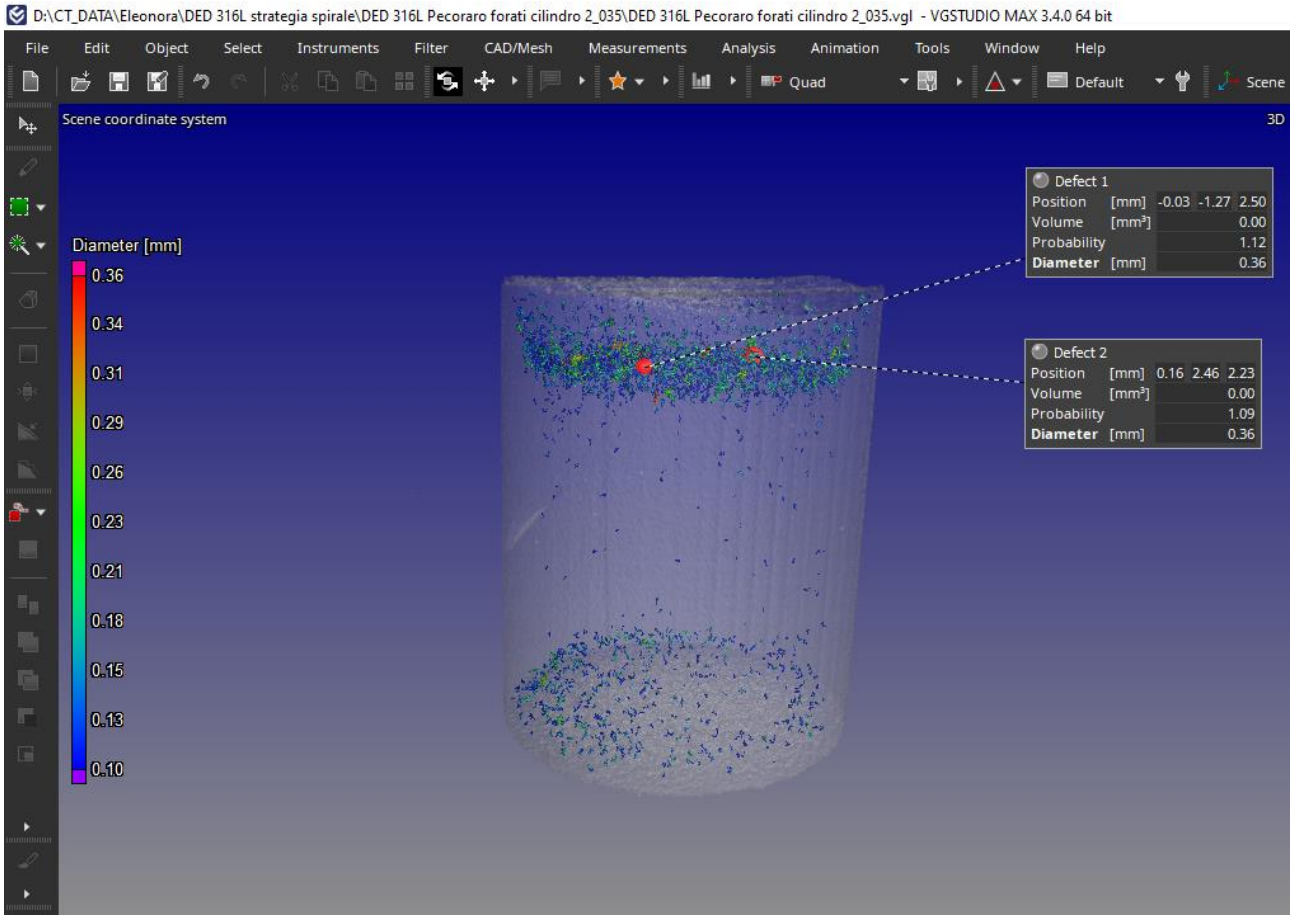


FIGURA 148 RENDERING POROSITÀ CILINDRO 2 CAMPIONE FORATO 0.35 MM

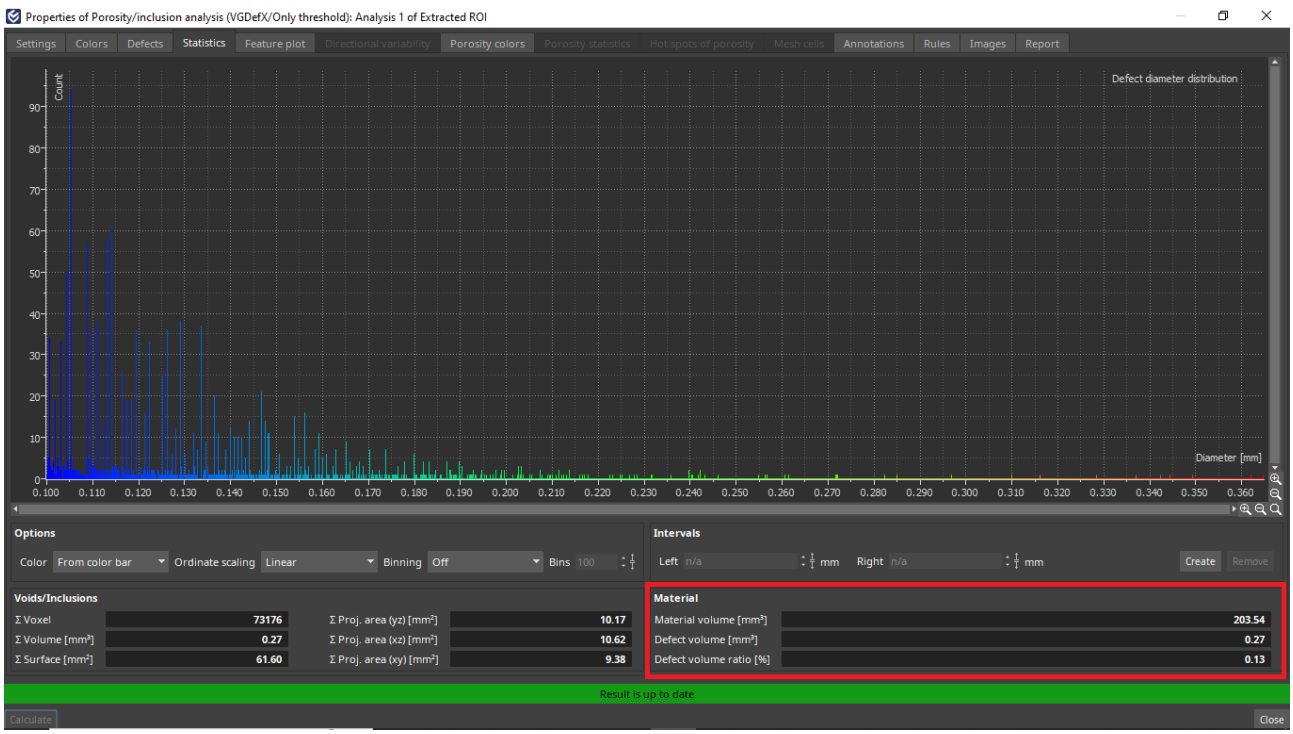


FIGURA 149 RISULTATI ANALISI CILINDRO 2 CAMPIONE FORATO 0.35 MM

Come si evince dal rendering dei campioni anche in questo caso il maggior numero di porosità sono localizzate in due zone quella inferiore e quella superiore, dovute anche qui dalla variazione repentina di temperatura.

In questo caso le difettosità maggiori dei cilindri vanno da 0.30 mm a 0.54 mm anche in questo caso i difetti più importanti sono localizzati vicino alla superficie superiore del campione.

Dal Defect Volume Rate fornito dal software, tramite formula inversa sono stati ricavati il volume e la densità derivanti dal software, che verrà in seguito confrontata con la densità ricavata sperimentalmente.

Campione forato (0,35)	DVR Sperimentale	DVR Vgstudio	Volume Vgstudio [mm^3]	Densità VGstudio [g/mm^3]
1 Cilindro Φ6	4,14	0,12	211,59	0,0080204
2 Cilindro Φ6	4,13	0,13	207,33	0,0080196

Campione forato (0,5)	DVR Sperimentale	DVR Vgstudio	Volume Vgstudio [mm^3]	Densità VGstudio [g/mm^3]
1 Cilindro Φ6	2,37	0,27	180,13	0,0080083
2 Cilindro Φ6	2,53	0,34	175,69	0,0080027

TABELLA 46 DVR, VOLUME E DENSITÀ VGSTUDIO

Confronto finale

Dopo aver ottenuto tutti i dati relativi alla Fase 4 e Fase 5 è stato possibile fare dei confronti.

Dal grafico sottostante si nota che i campioni forati hanno in generale, una densità minore dei corrispettivi campioni pieni con la stessa altezza di layer. Questo può essere spiegato dalla presenza del foro, in quanto con esso vengono create nuove facce interne il che porta ad una maggiore superficie a contatto con l'aria, che induce un raffreddamento più repentino all'interno del campione e dunque un aumento della presenza di difetti.

Per quanto riguarda i cilindri 3 (cilindri centrali) dei campioni con innalzamento della testa di deposizione di 0.35 mm e 0.50 mm, si nota una netta differenza tra i due: il campione con altezza layer di 0.35 mm riesce a mantenere una buona densità anche nel centro, mentre, per il campione con altezza layer di 0.50 mm si assiste ad un crollo di densità dovuto probabilmente al surriscaldamento della zona centrale. Infatti, il centro è soggetto ad una esposizione prolungata al laser per via del percorso di deposizione più corto, questo si traduce in un materiale con diversi cicli di fusione/solidificazione e quindi gradienti di temperatura che variano anche in base all'altezza del layer. Molto probabilmente questi gradienti di temperatura per il campione con altezza layer di 0,35 mm non risultano molto elevati in quanto, con un'altezza layer minore, si riesce a trattenere più calore, mentre per il campione con altezza layer di 0.50 mm portano alla creazione di porosità.

Si è notato dunque, che la densità nominale, ottenuta dalla letteratura presente sull'acciaio 316L, è un fattore molto sensibile per quanto riguarda la valutazione della qualità dei prodotti di deposizione; dunque, è stato assunto che essa può variare da un valore di 0.008000 g/mm^3 a 0.008030 g/mm^3.

Quindi, sono state create sul grafico delle bande di errore intorno ai valori di densità massima e minima, ottenuta dal software vgstudio e dalla densità nominale massima e minima. Come si evince dal grafico le bande di errore si sovrappongono per la totalità dei provini con i valori di densità ottenuti dalla bilancia di Archimede, questo indica che entrambe le misurazioni, bilancia e software, sono coerenti con la realtà.

Si nota inoltre che per quanto riguarda i cilindri pieni, le bande di errore risultano minori rispetto a quelle dei cilindri forati; dunque, il valore di densità in questo caso risulta meno sensibile alla variazione di densità nominale in quanto i defect volume rate (DVR) del software risultano simili ai DVR sperimentali, mentre per i cilindri forati le bande di errore risultano maggiori, infatti presentano una maggiore sensibilità alla densità nominale dovuta alla maggiore differenza dei DVR del software rispetto a quelli sperimentali.

Inoltre, si nota che per i cilindri 1 e 2 sia pieni che forati le bande di errore tendono a diminuire con l'aumentare dell'altezza del layer; dunque, i cilindri con altezza layer 0.50 mm hanno una minore variabilità dei risultati. Questo trend, si ferma per il cilindro 3 in quanto è soggetto a dei valori di porosità, molto differenti tra cilindro pieno e forato.

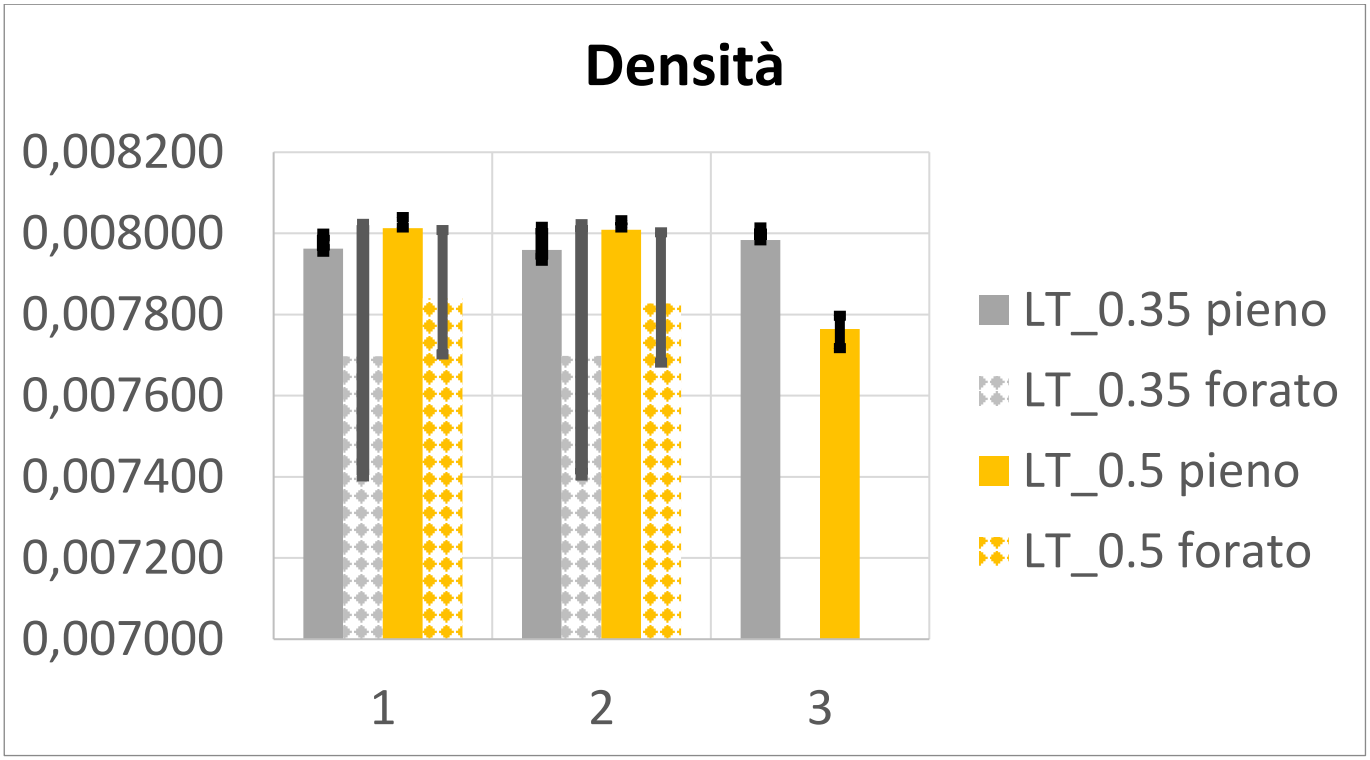


FIGURA 150 GRAFICO DI CONFRONTO TRA CILINDRI PIENI E FORATI CALCOLATI CON LA BILANCIA DI ARCHIMEDE E BANDE DI ERRORE DEI RISULTATI DEL SOFTWARE VGSTUDIO

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era di creare una strategia di deposizione per applicazioni di riparazione che unisse tutti i benefici delle varie strategie di deposizione presenti in letteratura. La strategia sperimentata è stata una doppia spirale alternata, con rotazione di 90° per layer. Per compiere lo studio è stato necessario eseguire diversi passaggi: lo studio della singola traccia, per la definizione della larghezza di traccia, lo studio del singolo layer, per la misura della distanza di deposizione ottimale della deposizione alternata, la deposizione del campione pieno con la suddetta strategia e la deposizione del campione forato. Ognuna di queste fasi è stata accompagnata da analisi e confronti per osservare e capire la dipendenza del risultato finale (in termini di densità, rugosità, ondulazione e geometria) dai vari parametri osservati durante lo studio.

Per quanto riguarda la rugosità dei campioni, essa non ha variazioni significative per ogni tipologia di campione, mentre per quanto riguarda l'ondulazione e la geometria dei campioni, aumentando l'altezza del layer di deposizione, aumenta anche l'ondulazione e quindi si ottengono provini geometricamente meno precisi e meno alti in quanto il materiale tende ad espandersi maggiormente sullo strato, diminuendo allo stesso tempo l'altezza totale del campione.

Per quanto riguarda la densità dei campioni è stato osservato che mediamente i campioni hanno densità simile, localmente invece, come evidenziato dalla bilancia di Archimede, i cilindri dei campioni pieni sono più densi di quelli forati, cosa confermata anche al software VGstudio; in ogni caso la variazione media di densità è intorno al 2% valore molto basso rispetto ad altre tecniche come la saldatura.

Va inoltre notata la dipendenza dell'innalzamento della testa di deposizione prendendo in considerazione le porosità nel centro del provino, che aumentano con l'aumentare dell'altezza layer. Questo tipo di porosità è dovuta principalmente alla partenza delle tracce di deposizione dal centro del provino per ogni strato. Per quanto riguarda invece la loro distribuzione lungo la diagonale il materiale risulta omogeneo. Le porosità risultano comunque accettabili in quanto la dimensione massima dei vuoti è di 0.47 mm per i campioni con altezza layer di 0.35 mm e 0.79 mm per i campioni con altezza layer di 0.50 mm, in tutti i campioni le porosità maggiori si trovano a circa 2 mm dalla superficie superiore questo può essere spiegato dal fatto che il fuoco del laser non segue con precisione l'altezza del substrato.

In ogni caso, il valore di altezza layer migliore dal punto di vista geometrico e della densità, per questa strategia con i parametri di processo fissati, si è rivelato essere di 0.35 mm per layer, mentre in termini di produttività con un'altezza layer di 0.50 mm si hanno deposizioni più brevi del 28.6% con i tempi di realizzazione che vanno da 21,5 min per la deposizione con altezza layer di 0.35 mm a 15.3 min per la deposizione con altezza layer di 0.50 mm. Il risultato ottimale potrebbe essere un valore di altezza layer intermedio tra 0.35 mm e 0.50 mm.

Inoltre, le differenze viste nella densità tra campioni pieni e forati sono riconducibili ai diversi gradienti termici a cui sono esposti queste due tipologie di campioni.

La strategia di deposizione studiata rimane dunque molto promettente in quanto, riduce l'alterazione termica del substrato come evidenziato dalla colorazione degli ossidi, rimane produttiva, ha una buona qualità superficiale e una buona planarità, gli errori dimensionali rimangono nell'ordine dell'errore di processo e inoltre non sono presenti distorsioni del substrato apprezzabili visivamente.

Dunque, questo studio ha portato alla creazione di una solida strategia di deposizione che potrebbe essere sviluppata per molte tipologie di riparazioni.

Gli studi futuri si potrebbero compiere sull'ottimizzazione dell'altezza del layer, sulla valutazione dimensionale su geometrie del substrato più complesse o anche per la creazione da zero di nuovi componenti.

Appendice codici CNC per deposizioni

Comandi utilizzati

G00- Rapid speed move

G01- Normal speed move mm/s

G04- Make a pause

G5- Read movement one by one

G7- Continuos movement

G17- Plane selection

G71- Metric system

G76- On BeamDirector system

G90- Absolute coordinate system

G92- Change coordinate system

G99- Cancel offset

M02- End of the program

M50- Define laser power W

M60- Laser ON

M61- Laser OFF

M100- Open laser shutter

M101- Close the laser shutter

M302- Lens gas ON for steam and PR.2 put pressure 0.2 bar

CODICE CNC FASE 1

```
G00 G17 G71 G90
G99
G76 ;2.0MM SPOT SIZE

G92 X0 Y0 Z0

Z25.

G00 Y150 ;mi muovo per
stabilizzare il flusso

$POWDER_FEED(ON, 8.,
OFF, 0)
M302 PR.2
G04 X30.; tempo
stabilizzazione
M50 P750.; potenza del laser
M100
X-.01 Y0.

Z0.
G76 G01 X0. F850.
M60 ;LASER ON
G7
X25.
X25.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-.01 Y-10
G01 X0.
M60 ;LASER ON
G7
X25.
X25.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-.01 Y-20
G01 X0.
M60 ;LASER ON
G7
X25.
X25.01
```

G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z25.

M50 P0
M101
$POWDER_FEED(OFF, 0, OFF, 0)

M0

CODICE CNC FASE 2 d=1.0*dav

G00 G17 G71 G90

G99

G76 ;2.0MM SPOT SIZE

G92 X0 Y0 Z0

Z25.

G00 Y150;mi muovo per stabilizzare il flusso

$POWDER_FEED(ON, 8., OFF, 0)

M302 PR.2

G04 X30.; tempo stabilizzazione

M50 P750.; potenza del laser

M100

X-.01 Y0.

Z0.

G76 G01 X0. F850.

M60 ;LASER ON

G7

X25.

X25.01

G5

M61 ;LASER OFF

G00 X-.01 Y-1.65

G01 X0.

M60 ;LASER ON

G7

X25.

X25.01

G5

M61 ;LASER OFF

G00 X-.01 Y-3.3

G01 X0.

M60 ;LASER ON

G7

X25.

X25.01

G5

M61 ;LASER OFF

G00 Y-2.48

G01 X25.

M60 ;LASER ON

G7

X0.

X-.01

G5

M61 ;LASER OFF

G00 X25.01 Y-0.825

G01 X25.

M60 ;LASER ON

G7

X0.

X-.01

G5

M61 ;LASER OFF

G00 Z25.

M50 P0

M101

$POWDER_FEED(OFF, 0, OFF, 0)

M02

CODICE CNC FASE 3 d=1.25*dav

```
G00 G17 G71 G90
G99
G76 ;2.0MM SPOT SIZE
G17 G90
G92 X0 Y0 Z0

Z25.
G00 Y150;mi muovo per stabilizzare il flusso

$POWDER_FEED(ON, 8., OFF, 0)
M302 PR.2
G04 X30.; tempo stabilizzazione
M50 P750.; potenza del laser
M100
X-.01 Y0.

Z0.
G76 G01 X0. F850.
M60 ;LASER ON
G7
X25.
X25.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-.01 Y-2.06
G01 X0.
M60 ;LASER ON
G7
X25.
X25.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-.01 Y-4.125
G01 X0.
M60 ;LASER ON
G7
X25.
X25.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 Y-3.09
G01 X25.
M60 ;LASER ON
G7
X0.
X-.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X25.01 Y-1.03
G01 X25.
M60 ;LASER ON
G7
X0.
X-.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 Z25.
M50 P0
M101
$POWDER_FEED(OFF, 0, OFF, 0)

M02
```

CODICE CNC FASE 4

Altezza della testa di deposizione 0.5mm per strato

```
G00 G17 G71 G90
G99
G92 X0 Y0 Z0
G76
;2.0MM SPOT SIZE
G17 G90
$POWDER_FEED(ON, 8, OFF, 0)
M302 PR.2
G04 X20.
M50 P750.
M100
X-1.01 Y-1.
Z25.
Z0.
G76 G01 X-1. F850.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
```

```
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
```

```
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z1
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z1.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
```

```
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z2
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z2.5
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z2.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
X3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
```

```
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z3
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z3.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
```

```
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z4
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
```

```
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z4.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z5
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
```

```
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z5.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z6
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
```

```
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z6.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
```

```
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z7
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z7.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
```

```
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z8
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z8.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
```

```
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z9
X-1.01 Y-1.
G01 X-1.
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y3.
X-5.
Y-5.
X7.
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y-3.
X5.
Y5.
X-7.
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y2.
X-4.
Y-4.
X6.
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y-2.
X4.
Y4.
X-6.
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X11.21 Y11.7
G01 X11.2
M60 ;LASER ON
G7
X-11.7
Y-11.7
X11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z9.5
X-1.01 Y1.
G01 X-1.
```

```
M60 ;LASER ON
G7
X3.
Y-3.
X-5.
Y5.
X7.
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X1.01 Y-1.
G01 X1.
M60 ;LASER ON
G7
X-3.
Y3.
X5.
Y-5.
X-7.
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X.24 Y0.
G01 X.25
M60 ;LASER ON
G7
X2.
Y-2.
X-4.
Y4.
X6.
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-.24 Y0.
G01 X-.25
M60 ;LASER ON
G7
X-2.
Y2.
X4.
Y-4.
X-6.
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00
X-11.21 Y11.7
G01 X-11.2
M60 ;LASER ON
G7
X11.7
Y-11.7
X-11.7
Y11.2
Y11.21
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z25.
M50 P0
M101
$POWDER_FEED(OFF, 0,
OFF, 0)
G204 Z
G204 XY
B0. A0.
M02
```

CODICE CNC FASE 5

Altezza della testa di deposizione 0.5mm per strato

```
G00 G17 G71 G90
G99
G76
;2.0MM SPOT SIZE
G17 G90
G00 A0. B0.
$POWDER_FEED(ON, 8, OFF,
0)
M302 PR2.
G04 X0.
M50 P750.
M100
X5. Y-4.51
Z25.
Z0.
G76 G01 Y-4.5 F850.
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X8.
Y8.
```

```
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z1
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X8.
```

```
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z1.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z2
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
```

```
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z2.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z3
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
```

```
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z3.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z4
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
```

```
G7
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z4.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF

G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z5
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
```

```
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z5.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z6
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
```

```
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF
```

```
G00 Z6.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
```

```
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF
```

```
G00 Z7
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
```

```
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z7.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5

M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z8
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
G5
```

```
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF
```

```
G00 Z8.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
```

```
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF

G00 Z9
X5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X-5.
Y-5.
X4.5
X4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X-8.
Y-8.
X10.
Y10.
X-11.
X-11.01
```

```
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X8.
Y8.
X-10.
Y-10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X-9.
Y-9.
X11.
Y11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X9.
Y9.
X-11.
Y-11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X-12.
Y-12.
X11.5
X11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z9.5
X-5. Y-4.51
G01 Y-4.5
M60 ;LASER ON
G7
Y5.
X5.
Y-5.
X-4.5
X-4.51
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-6. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y6.
X8.
Y-8.
X-10.
Y10.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X6. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-6.
X-8.
Y8.
X10.
Y-10.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-7. Y-5.01
G01 Y-5.
M60 ;LASER ON
G7
Y7.
X9.
Y-9.
X-11.
Y11.
X11.
X11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X7. Y5.01
G01 Y5.
M60 ;LASER ON
G7
Y-7.
X-9.
Y9.
X11.
Y-11.
X-11.
X-11.01
G5
M61 ;LASER OFF
G00 X-12. Y-11.51
G01 Y-11.5
M60 ;LASER ON
G7
Y12.
X12.
Y-12.
X-11.5
X-11.51
G5
M61 ;LASER OFF


G00 Z25.
M50 P0
M101
$POWDER_FEED(OFF, 0,
OFF, 0)
G204 Z
G204 XY
B0. A0.
M02
```

Bibliografia

2016 - GUO - Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel byhigh-power direct laser deposition

2018 - HALEY - Observations of particle-melt pool impact events in directed energy

2018 - HALEY - Working distance passive stability in laser DED AM

2018 - SCIAMMARELLA - Processing Parameter DOE for 316L Using Directed

2019 - WENG - A novel strategy to fabricate thin 316L stainless steel rods by continuous directed energy deposition in Z direction

2019 - YANG - Additive subtractive hybrid manufacturing od 316L ss powder densification microhardness and residual stress

2020 - AZINPOUR - Fracture analysis in directed energy deposition (DED) manufactured 316L stainless steel using a phase-field approach

2020 - FETNI - Thermal model for DED of composite coatings of 316L SS enriched with tungsten carbides

2020 - KIRAN - Distortion Modelling of steel 316L symmetric base plate for AM process and experimental calibration

2020 - KIRAN - Numerical Simulation Development and Computational optimization for DED AM process

2020 - KIRAN - Numerical Simulation Development and Computational optimization for DED AM process

2020 - KIRAN - Numerical Simulation Development and Computational optimization for DED AM process

2017 - JADIVANI - AM of AlSi10Mg by DED

2019 - OHA - Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition

2019 - ZHAO - The effect of different scanning strategies on microstructural evolution to 24CrNiMo alloy steel during direct laser deposition

2020 - BARR - Role of deposition strategy and fill depth on the tensile and fatigue performance of 300 M repaired through laser directed energy deposition

2020 - S. B. RIBEIRO – A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes

2020 - DOS SANTOS PAES - Modeling layer geometry in directed energy deposition with laser for additive manufacturing

2021 - O. GUSHCHINA - Effect of Scanning Strategy on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Manufactured by Laser Direct Energy Deposition

2021 - WANG - Effects of scanning strategies on residual stress and deformation by high-power direct energy deposition: Island size and laser jump strategy between islands

2022 - ALI - Fabrication of Thin Walls with and without Close Loop Control as a Function of Scan Strategy Via Direct Energy Deposition

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

https://www.ilprogettistaindustriale.it/da-eos-nuove-polveri-metalliche-per-la-produzione-additiva-in-serie/

https://www.lasit.it/marcatura-laser-come-funziona/#:~:text=In%20parole%20semplici%2C%20le%20particelle,si%20forma%20il%20raggio%20laser.

Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, desidero menzionare tutte le persone, senza le quali questo lavoro di tesi non esisterebbe nemmeno.

Innanzitutto, vorrei ringraziare i miei relatori, il Professor Alessandro Salmi e la Professoressa Eleonora Atzeni per avermi dato la possibilità di intraprendere questo studio. Vorrei inoltre ringraziare l'Ingegnere Giuseppe Vecchi per avermi seguito con costanza durante la Tesi ed essere sempre stato disponibile durante i problemi e gli scogli da superare in questi mesi.

Non potrò mai ringraziare abbastanza i miei genitori. Grazie per avermi permesso di portare a termine gli studi investendo sul mio futuro, facendo per me molti sacrifici e grazie per il supporto che mi avete sempre dato soprattutto nei periodi difficili e nei momenti di sconforto causati dal Politecnico e non solo.

Grazie a mia sorella Elisa che è sempre una fonte d'ispirazione per me, per la sua testardaggine nel raggiungere gli obiettivi prefissati e per la sua schiettezza e sincerità nel parlarmi anche quando sono insopportabile.

Ringrazio la mia ragazza Giorgia per avermi accompagnato in quest'ultimo periodo di degenza al Politecnico, per il conforto ricevuto e per aver resistito ai miei scleri per l'ultimo esame, la tesi, la ricerca di una casa, la ricerca dei locali e molto altro. Mi sento molto legato a te abbiamo vissuto in un breve periodo tante avventure e momenti speciali, spero tanto di continuare a viverne altrettanti insieme perché mi fai stare davvero bene.

Ringrazio Luciano alias Miccia, per la sua perenne presenza, per la leggerezza che mi ha trasmesso in tutti questi anni, per le parole di conforto nei tanti momenti difficili e per la carica ricevuta nei momenti importanti, per le puttanate fatte insieme e per i tanti momenti di svago. Sei un vero amico.

Ringrazio Andrea, la tua presenza ha reso il periodo universitario uno spasso, sei stato un vero amico, un compagno di università e un coinquilino fantastico, grazie per i tuoi amatissimi monologhi mattutini, per i vari progetti strampalati che abbiamo costruito (chi ha frequentato la casa di via Germanasca lo sa), per le tante avventure strane passate insieme, spero di viverne altrettante.

Ringrazio Livia e Roberta, siete delle vere amiche, mi avete fatto passare un ultimo anno incredibile, mi avete alleggerito la mente e grazie a voi sono uscito da un periodo non molto bello, vi ringrazio inoltre per avermi dato un tetto nell'ultimo periodo e aver sopportato i miei lamenti sul Poli.

Ringrazio Giovanni alias Camillo, Gianmarco (dai tanti Soprannomi), Raffaele alias Popin, Erika Grasso, Fina e tutti gli amici di Cellino per avermi sempre fatto sorridere, ognuno a modo proprio, per esserci sempre quando scendo giù in puglia e per rendermi spensierato nei momenti più pesanti.

Ringrazio Alessandro, Luca e Gianmarco Preso, con cui ho passato gli anni migliori del Politecnico, insieme abbiamo fatto feste in casa, serate, uscite, cene, e parecchio schifo. Siete

stati dei compagni di avventure fantastici e degli amici con cui discutere di ogni cosa, in special modo Alessandro che mi ha sopportato da quando abbiamo iniziato il Politecnico.

Ringrazio Donato e Valentino, anche se vi metto insieme voi non vi conoscete, siete degli amici e compagni di università molto importanti su cui sento di poter fare sempre affidamento, vi ringrazio per il tempo trascorso insieme, le varie feste e per il cazzeggio tra una pausa studio e l'altra.

Vorrei inoltre ringraziare tutti i miei amici che non ho nominato precedentemente, tutte le persone che mi sono state accanto ma che non fanno più parte della mia vita, tutti i miei familiari e chi non c'è più, un pezzo di questo traguardo è anche vostro.