POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Ottimizzazione dei processi di Fabbricazione Additiva metallica nell'industria automobilistica

Relatore
Prof. Luca Iuliano
firma del relatore
.....

Candidato
Francesco Ferrio
firma del candidato
.....

Tutor aziendale
Dott.ssa Eva Butano
firma del tutor
.....

A.A. 2019/20

INDICE

1. Premessa – Il Centro Ricerche FIAT 7

1.1 Esperienza al CRF 9

2. La Fabbricazione Additiva metallica 11

2.1 Processo della FA 12

2.2 Produzione delle polveri 16

2.3 Principali tecnologie 18

2.4 Materiali e applicazioni 24

3. I progetti di ricerca sulla FA – Horizon 2020 27

3.1 *EnCompass* 32

3.2 *OpenHybrid* 34

4. Riprogettazione per L-PBF di un collettore di aspirazione 37

4.1 Modellazione della nuova geometria 39

4.2 Analisi fluidodinamica 45

4.3 Simulazione del pre-processing per la Fabbricazione Additiva 53

4.4 Produzione del collettore 63

5. Analisi della deposizione tramite L-DED su una matrice di trancia per stampaggio lamiera ... 66

6. Conclusioni 90

7. Bibliografia e sitografia 91

Indice delle figure

Figura 1 - Ottimizzazione topologica (fonte: skorpionengineering.com) 13
Figura 2 - Conversione da file CAD a STL (fonte: i.materialise.com) 14
Figura 3 - Slicing costante e adattativo (fonte: introduzione all'AM, Iuliano L.) 15
Figura 4 - Classificazione FA metallica 19
Figura 5 - Sistema L-BPF (fonte: empa.ch) 20
Figura 6 - Sistema EB-PBF (fonte: Arkam.com) 21
Figura 7 - Sistema L-DED (fonte: BeAM machines.com) 22
Figura 8 - Sistema BJ-PB (fonte: bintoa.com) 23
Figura 9 - Sistema EB-DED (fonte: sciaky.com) 24
Figura 10 - Roadmap FA (fonte: AM Strategic Research Agenda, Allison A., Scudamore R.) 31
Figura 11 - IDDS 32
Figura 12 - OpenHybrid, deposizione 34
Figura 13 - OpenHybrid, fresatura 35
Figura 14 - Collettore 37
Figura 15 - Collettore, sezione 38
Figura 16 - Riprogettazione 39
Figura 17 - Orientazione collettore originale 40
Figura 18 - Supporti interni collettore originale 41
Figura 19 - Riprogettazione 1, sezione 42
Figura 20 - Riprogettazione 2 43
Figura 21 - Riprogettazione 2, sezione 43
Figura 22 - Riprogettazione 3 44
Figura 23 - Riprogettazione 3, sezione 45
Figura 24 - Volume fluido 46
Figura 25 - Definizione superfici per analisi CFD 47
Figura 26 - Generazione mesh 48
Figura 27 - Pressione nel collettore originale 49

Figura 28 - Pressione nella riprogettazione 1 50
Figura 29 - Pressione nella riprogettazione 2 51
Figura 30 - Pressione nella riprogettazione 3 52
Figura 31 - Orientazione e generazione supporti riprogettazione 1 54
Figura 32 - Orientazione e generazione supporti riprogettazione 2 55
Figura 33 - Orientazione e generazione supporti riprogettazione 3 56
Figura 34 - Analisi tensioni riprogettazione 1 57
Figura 35 - Analisi deformazioni riprogettazione 1 58
Figura 36 - Analisi tensioni riprogettazione 2 59
Figura 37 - Analisi deformazioni riprogettazione 2 60
Figura 38 - Analisi tensioni riprogettazione 3 61
Figura 39 - Analisi deformazioni riprogettazione 3 61
Figura 40 - Simulazione polveri intrappolate 62
Figura 41 - Produzione collettore, vista superiore 64
Figura 42 - Produzione collettore, vista laterale 64
Figura 43 - Produzione collettore, vista posteriore 65
Figura 44 - Produzione collettore, vista frontale 65
Figura 45 - Stampo transfer della matrice caso studio 67
Figura 46 - Matrice usurata 68
Figura 47 - Processo di riparazione 68
Figura 48 - Sistema di alloggiamento 69
Figura 49 - Testa laser 70
Figura 50 - Montaggio testa laser su robot 71
Figura 51 - Testa di scansione 72
Figura 52 - Fresatura a sezione quadrata 73
Figura 53 - Fresatura asimmetrica 73
Figura 54 - Provino 74
Figura 55 - Programmazione percorso utensile 75
Figura 56 - Spallamenti su provino 76

Figura 57 - Deposizione, vista superiore 78
Figura 58 - Sovrapposizione strati deposizione 78
Figura 59 - Processo di deposizione 79
Figura 60 - Fresature a differenti profondità 80
Figura 61 - Difetto su provino 81
Figura 62 - Punti prove di durezza 82
Figura 63 - Provino sezionato 83
Figura 64 - Analisi metallografica 84
Figura 65 - Fresatura su superficie superiore (a) e laterale (b) 85

1. Premessa – Il Centro Ricerche FIAT

Il CRF (Centro Ricerche FIAT), localizzato a Orbassano (Torino) e in alcune sedi periferiche in Italia, è stato fondato nel 1978. Come punto di riferimento per le attività di ricerca di FCA (*Fiat Chrysler Automobiles*), la missione del CRF ha tre obiettivi principali:

- sviluppare motopropulsori, sistemi veicolo, materiali, metodologie e processi innovativi per migliorare la competitività dei prodotti di FCA;
- rappresentare FCA negli ambiti della ricerca collaborativa a livello europeo e nazionale, partecipando a progetti di ricerca precompetitiva e promuovendo lo sviluppo di una rete di contatti e partenariati a livello internazionale;
- supportare FCA nella valorizzazione del proprio capitale intangibile.

In collaborazione con tutti i portatori d'interesse pubblici e privati nel campo della mobilità e della manifattura sostenibili e attraverso una rete di relazioni con partner accademici e industriali, il CRF partecipa a iniziative di ricerca a livello nazionale e internazionale con la finalità di favorire l'applicazione industriale dei risultati della ricerca.

Il CRF indirizza le proprie attività di ricerca e sviluppo su tre aree: la *sostenibilità ambientale*, attraverso progetti finalizzati all'aumento dell'efficienza energetica e alla riduzione dell'impatto ambientale su tutto il ciclo di vita del veicolo; la *sostenibilità sociale*, sviluppando sistemi di sicurezza attiva, passiva, preventiva e cooperativa dei sistemi di trasporto e studiando misure per garantire l'accesso alla mobilità a tutte le persone indipendentemente dalle loro specificità; la *competitività economicamente sostenibile*, con programmi di miglioramento di prestazioni e funzionalità del veicolo, orientati anche alla riduzione dei tempi di introduzione sul mercato dei risultati della ricerca.

La struttura operativa è divisa in quattro aree tecniche: *Powertrain Research & Technology*, *Vehicle Research & Innovation*, *Group Materials Labs e World Class Manufacturing Research & Innovation*.

Le principali competenze del CRF sono concentrate nei seguenti temi:

- Motopropulsori e trasmissioni a elevata efficienza e tecnologie avanzate per la riduzione delle emissioni, comprese le motorizzazioni a combustibili alternativi, ibride ed elettriche;
- Soluzioni strutturali per la sicurezza, l'alleggerimento e l'efficienza energetica del veicolo; tecnologie per veicoli autonomi e per la connettività;
- Materiali e tecnologie di processo per l'alleggerimento, il miglioramento delle prestazioni e della qualità, la riduzione dell'impatto ambientale durante il ciclo di vita del veicolo;
- Sviluppo e convalida iniziale di tecnologie, dispositivi e metodi di produzione per aumentare la competitività e la sostenibilità del prodotto negli stabilimenti, in sinergia con la metodologia di *World Class Manufacturing*.

In aggiunta al know-how tipico del settore automobilistico, il CRF ha sviluppato competenze strategiche anche nel manufacturing, nello studio dei materiali funzionali, nell'ICT e nell'elettronica. Il CRF dispone di diversi laboratori tecnologicamente all'avanguardia, come le sale sperimentazione motore e veicolo, la camera di compatibilità elettromagnetica, il simulatore dinamico di guida, i laboratori di robotica collaborativa e di additive manufacturing e la sala di realtà virtuale immersiva.

Il CRF partecipa alle Public Private Partnership *European Green Vehicle Initiative* e *Factories of the Future*, istituite dalla Commissione Europea per focalizzare la ricerca industriale pubblica e privata su temi di significativa rilevanza per la competitività industriale e l'occupazione. Inoltre, supporta i programmi avviati dalle istituzioni comunitarie attraverso le *Piattaforme Tecnologiche Europee*, *ERTRAC* (trasporti su strada), *EPOSS* (sistemi intelligenti), *ESTEP* (tecnologia dell'acciaio), *EUMAT* (materiali), *MANUFUTURE* (manufacturing), *NANOfutures* (nanotecnologie) e le *Joint Technology Initiative***,** come *ECSEL* (*Electronic Components and Systems for European Leadership*).

A livello nazionale il CRF partecipa al *Cluster Trasporti Italia 2020*, associazione di imprese, università, enti di ricerca e altri soggetti che persegue l'aumento della competitività dell'Italia nel settore dei mezzi e sistemi per la mobilità di superficie terrestre e marina.

La proprietà intellettuale oggetto di privativa sviluppata da CRF ammonta a 592 invenzioni, protette da 2.573 brevetti e domande di brevetto[1]. Nel corso degli ultimi anni, la funzione svolta dal CRF ha portato all'industrializzazione di prodotti distintivi per i marchi di FCA, tra cui si segnalano per i motopropulsori: il sistema *Diesel Common Rail* (*UNIJET* e *MultiJet*); il sistema *MULTIAIR*® e il nuovo motore *TwinAir*, la tecnologia *DDCT* (*Dual Dry Clutch Transmission*) e i sistemi di alimentazione per veicoli a metano. Per i componenti veicolo: i sistemi di condizionamento energy saving, la connettività veicolo basata su *Blue&Me*™, i sistemi di ausilio alla guida (*Driving Advisor* e *Magic Parking*) e di eco-navigation (*ECODrive*™).

1.1 Esperienza al CRF

Durante il periodo trascorso presso il CRF, nel gruppo *Process Technologies* dell'ente *WCM Research & Innovation*, è stato possibile prendere parte ad alcuni progetti inclusi nel Programma Quadro Europeo *Horizon 2020* sullo sviluppo delle tecnologie additive.

In questo contesto, il CRF svolge il ruolo di utente finale in due progetti sul tema Additive Manufacturing. Il primo progetto, denominato *EnCompass*, riguarda lo sviluppo di un applicativo software in grado di ottimizzare l'intero processo di produzione mediante tecnologia a letto di polvere (L-PBF). Il secondo, denominato *OpenHybrid*, mira alla realizzazione di un'innovativa piattaforma ibrida, basata sull'utilizzo combinato di tecnologie tradizionali sottrattive e di Laser - Directed Energy Deposition (L-DED) come tecnologia additiva.

Il periodo iniziale trascorso al CRF ha riguardato lo studio del linguaggio tecnico utilizzato tra i partners partecipanti ai progetti, nonché l'apprendimento di requisiti di partenza e obiettivi finali degli stessi. È stato perciò possibile prendere parte a diverse attività necessarie all'avanzamento dei progetti. Successivamente è stata redatta la documentazione contenente i risultati ottenuti con il fine della loro divulgazione nei confronti dei partners, evidenziando eventuali problematiche riscontrate e poi discusse durante le riunioni previste.

[1] Dati Dicembre 2018

Durante il percorso formativo presso il CRF è stato possibile partecipare a diversi eventi e corsi, quali:

- Fiera *Bi-Mu 31*. Tenutasi in Milano-Rho Fiera, 10/10/2018;
- Meeting semestrale tra i partners partecipanti al progetto *OpenHybrid.* Tenutosi presso il Centro Ricerche FIAT, 24-25/10/2018;
- Corso *HyperWorks pre-post processing for Finite Element Analysis – Module 2*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 04-06/06/2018;
- Corso *HyperWorks & AcuSolve pre-post processing for CFD analysis*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 16-18/10/2018;
- Corso *Optistruct for Optimization*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 20-22/06/2018;
- Corso *Inspire Structures*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 04/09/2018;
- Corso *HyperStudy*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 16-17/07/2018;
- Seminario *Materials and microstructures for Additive Manufacturing*. Tenutosi presso Università degli Studi di Torino, 14/02/18;
- Seminario *Automotive e innovazione in asportazione di truciolo*. Tenutosi presso Sandvik Coromant Center-Milano, 22/05/18;
- Corso *Electric Architectures for Pure Electric and Hybrid Vehicles*. Tenutosi presso il Centro Ricerche FIAT.

2. La Fabbricazione Additiva metallica

La Fabbricazione Additiva, secondo il relativo standard ASTM, è definita come il processo di fusione dei materiali per creare oggetti a partire da modelli 3D, di solito con approccio strato su strato, in opposizione ai metodi produttivi di tipo sottrattivo tradizionali.

Originariamente le tecnologie additive rientravano nella categoria denominata *Prototipazione Rapida*, sviluppata a partire dagli anni ‘80 per ridurre il *time to market* e rendere più flessibile l’intero processo produttivo. Infatti, la precedente produzione di prototipi era lenta e costosa, veniva tipicamente realizzata manualmente attraverso l’impiego di attrezzature specifiche e di materiali facilmente lavorabili come il legno o la cera.

In questo contesto, la Stereolitografia (SLA) fu brevettata da Charles W. Hull nel 1986, il quale fondò l’azienda 3D Systems per commercializzarla. La stereolitografia si basa sull’utilizzo di una sorgente UV che solidifica un polimero, tipicamente una resina, sensibile a tale radiazione generando oggetti tridimensionali. La Selective Laser Sintering (SLS) fu sviluppata da Carl Deckard e Joseph Beaman presso l’Università del Texas ad Austin a metà degli anni ‘80 con commercializzazione da parte di DTM, successivamente acquisita da 3D Systems. La tecnologia usa un fascio laser per fondere della polvere distribuita su una piattaforma tramite una lama e creare il pezzo. La Fused Deposition Modelling (FDM) fu sviluppata a fine anni ’80 da S. Scott Crump e commercializzata negli anni ‘90 da Stratasys. L’FDM estrude un polimero termoplastico attraverso un ugello riscaldato e lo deposita strato per strato formando il componente.

Negli anni ‘90 la tecnologia additiva è stata utilizzata nei sistemi industriali per applicazioni per stampi e attrezzature di fusione e produzioni pre-serie. Dagli anni 2000 iniziano a essere prodotti pezzi definitivi.

La Fabbricazione Additiva nel settore dei materiali polimerici ha posto le basi per lo sviluppo della Fabbricazione Additiva metallica.

2.1 Processo della FA

La prima fase del processo di Fabbricazione Additiva consiste nella creazione di un modello 3D dell'oggetto da stampare, solitamente mediante programmi CAD (*Computer-Aided Design*). La progettazione del pezzo deve essere ottimizzata per il processo di FA, sfruttandone così le potenzialità. Ad esempio è possibile ottenere particolari alleggeriti con una geometria complessa impossibili da produrre con tecnologie tradizionali. Tali geometrie vengono generate con l'ausilio di programmi per l'ottimizzazione topologica. L'ottimizzazione topologica è una tecnica numerica con cui è possibile ottimizzare la distribuzione di materiale all'interno di un determinato spazio di progettazione, con l'obiettivo di massimizzare o minimizzare determinate proprietà fisiche come il peso, la rigidezza e la conducibilità.

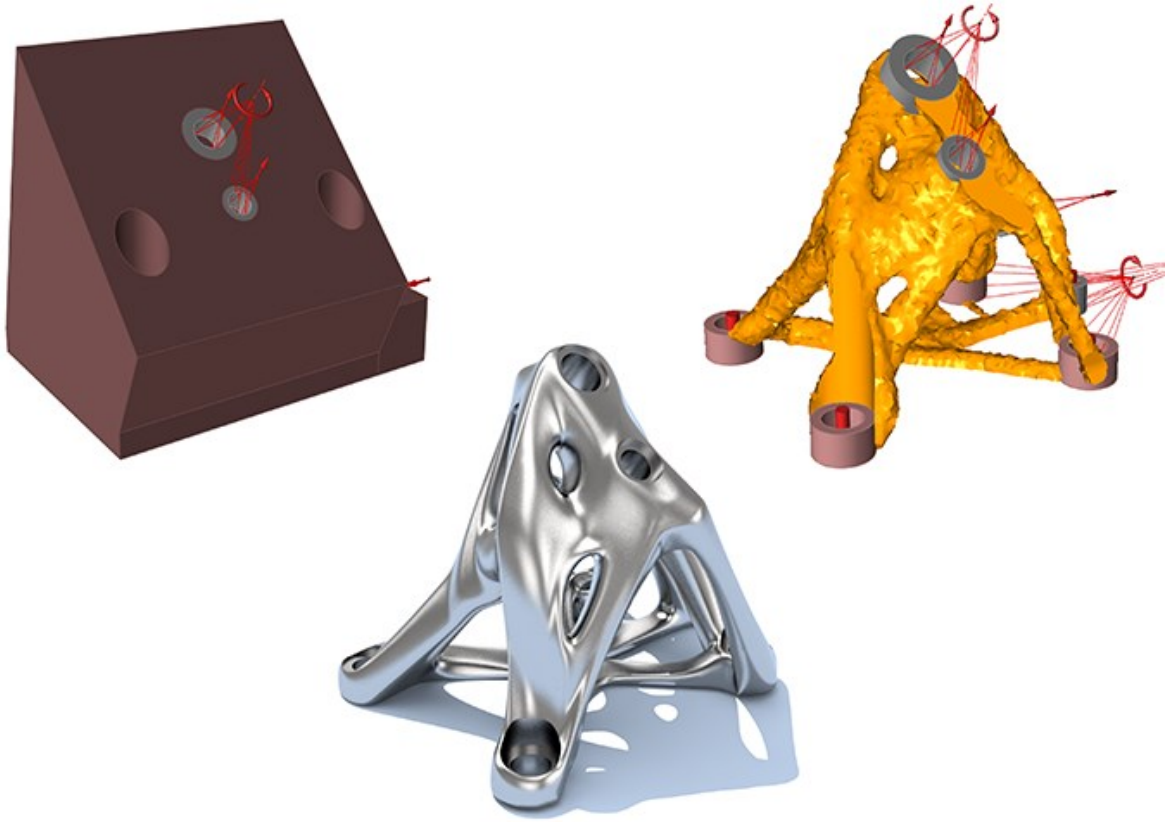


FIGURA 1 - OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA (FONTE: SKORPIONENGINEERING.COM)

Conclusa la progettazione, il file CAD viene convertito in formato STL (*Standard Triangulation Language*) che utilizza triangoli per rappresentare le superfici di un solido. Un file STL consiste quindi nell'insieme di vettori contenenti le coordinate dei tre vertici di ciascun triangolo e l'orientazione della normale alla superficie. All'aumentare della risoluzione del file STL aumenta il numero di triangoli utilizzati, approssimando meglio le superfici del modello 3D. La risoluzione è definita dall'errore cordale e dalla tolleranza angolare. Il primo è la distanza massima tra la superficie del modello CAD e quella del file STL, la seconda è l'angolo tra le normali di triangoli adiacenti.

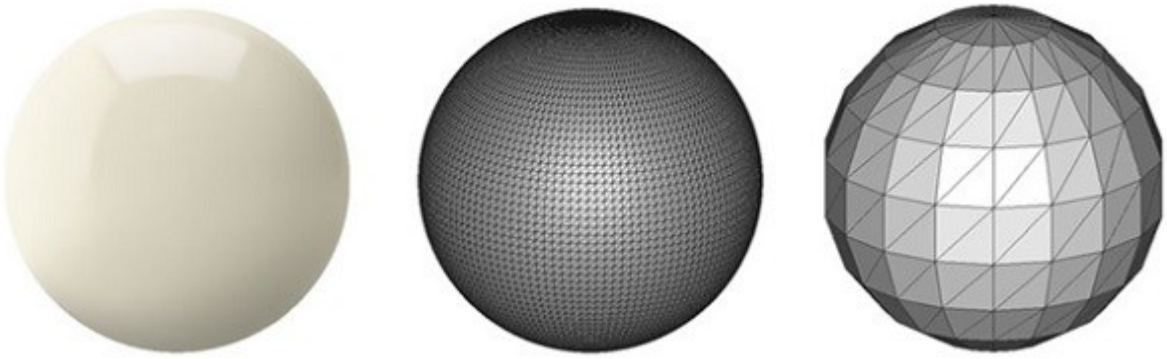


FIGURA 2 - CONVERSIONE DA FILE CAD A STL (FONTE: I.MATERIALISE.COM)

Si passa poi all'orientazione in macchina. Il modello viene virtualmente posto sulla piattaforma di costruzione della macchina e ne viene studiata la miglior orientazione in funzione di diversi obiettivi, quali la riduzione del tempo di produzione, degli scarti di materiale, di tensioni e distorsioni durante la costruzione, il miglioramento della finitura superficiale e delle proprietà meccaniche. In seguito a questa fase vengono generate le strutture di supporto che assolvono diverse funzioni: ancorare il modello alla piattaforma di costruzione permettendone la successiva rimozione, supportare le parti a sbalzo e le strutture orizzontali, assicurare un'omogenea dispersione del calore accumulato. La generazione dei supporti è strettamente dipendente dall'orientazione in macchina. I supporti possono essere realizzati con lo stesso materiale impiegato per costruire il pezzo o con un materiale differente che ne favorisce la rimozione; nel caso di applicazioni metalliche i supporti sono del primo tipo.

Successivamente il file STL è convertito in linguaggio macchina (codice G) realizzando lo *slicing*, che consiste nella suddivisione del modello in strati paralleli aventi la normale orientata lungo l'asse Z di costruzione. Lo *slicing* può essere di tipo costante oppure adattivo quando lo spessore degli strati è variabile e dipende dalla curvatura della superficie. Lo spessore degli strati influenza la qualità del componente finale; al diminuire dello spessore si ha una riduzione della rugosità

superficiale. Generalmente i sistemi additivi metallici prevedono la realizzazione di uno *slicing* costante.

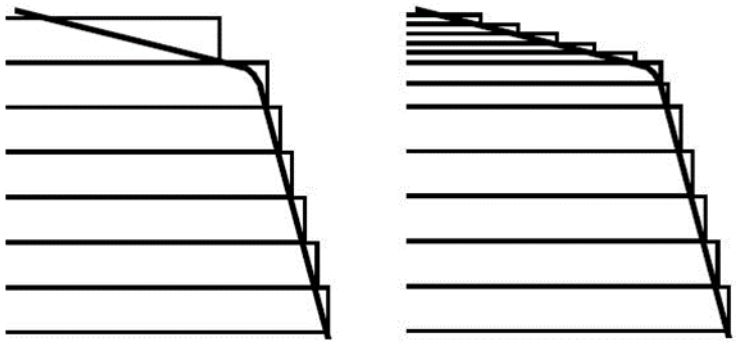


FIGURA 3 - SLICING COSTANTE E ADATTATIVO (FONTE: INTRODUZIONE ALL'AM, IULIANO L.)

Prima di procedere con l'avvio del processo additivo è necessario preparare la macchina per la produzione della parte. Questa operazione, per i sistemi metallici più diffusi, consiste nel controllo della quantità di polvere presente nei contenitori e di gas inerte nei serbatoi. È anche richiesta l'impostazione dei parametri di processo quali la potenza laser, la velocità di scansione, lo spessore dello strato, la distanza tra le tracce, la portata di gas inerte. Una volta avviato il processo di costruzione, il sistema valuta autonomamente l'avanzamento del lavoro grazie a telecamere e sensori. Nel caso di rilevamento di errori o difetti, la lavorazione viene interrotta.

Dopo che la macchina ha completato il processo di costruzione, l'operatore può accedere alla camera ed estrarre manualmente la piattaforma con il componente ancorato. Prima dell'estrazione è necessaria la rimozione della polvere non fusa tramite dei sistemi di aspirazione; molti sistemi a letto di polvere possiedono sistemi automatizzati in grado di rimuovere la polvere in eccesso in modo semi-automatico al fine di ridurre il rischio di contaminazioni. Successivamente si procedere con la rimozione delle strutture di supporto. Nel caso in cui la parte si trovi a contatto diretto con la piattaforma può essere necessaria la separazione tramite

elettroerosione a filo o, se le condizioni lo permettono, mediante l'utilizzo di una sega. È anche possibile effettuare trattamenti termici per ottenere particolari microstrutture o per ridurre tensioni residue.

2.2 Produzione delle polveri

La produzione delle polveri metalliche per la Fabbricazione Additiva avviene generalmente in tre fasi: estrazione del minerale, ottenimento delle polveri e validazione del prodotto. Le tecniche di produzione delle polveri possono essere distinte in:

- Metodi meccanici:
    - Disintegrazione senza cambiamento di fase, definita comminuzione;
    - Disintegrazione con cambiamento di fase, definita atomizzazione.
- Metodi chimici:
    - Riduzione chimica;
    - Riduzione elettrolitica.

Il processo di atomizzazione è la tecnologia più diffusa grazie alle buone proprietà delle particelle che si riescono a ottenere. Le principali tecnologie di atomizzazione sono:

- Atomizzazione ad acqua;
- Atomizzazione a gas;
- Atomizzazione al plasma;
- Atomizzazione centrifuga.

L'atomizzazione ad acqua è la più semplice ed economica modalità di produzione delle polveri. Di contro le polveri hanno una ridotta purezza a causa dei fenomeni di ossidazione, e forma irregolare per l'elevato gradiente di raffreddamento durante il processo. La materia prima grezza viene inizialmente fusa all'interno di una fornace per poi essere trasferita in un crogiolo in grado di regolare la colata di metallo all'interno dell'atomizzatore. Il metallo fuso è investito da getti d'acqua ad alta pressione che ne determinano la dispersione sotto forma di particelle. La polvere

così ottenuta viene raccolta sul fondo dell'atomizzatore e poi sottoposta a successivi processi quali essiccazione e trattamento termico in atmosfera riducente che hanno lo scopo di asciugare le particelle, minimizzare le tensioni residue e ridurre lo strato di ossido formatosi.

L'atomizzazione a gas è la tecnologia più utilizzata per la produzione delle polveri. Per controllare il contenuto di elementi interstiziali, soprattutto in applicazioni speciali come il settore aerospaziale, sono installate sopra la camera di atomizzazione fornaci a induzione sottovuoto (VIM – *Vacuum Induction Melting*). Il flusso di metallo liquido viene quindi disperso sotto forma di particelle tramite l'utilizzo di getti di gas ad alta pressione. Si utilizza un gas inerte come azoto o argon per ridurre il rischio di ossidazione e contaminazione del metallo. Grazie alla minore capacità termica del gas rispetto all'acqua, le particelle metalliche hanno un tempo di solidificazione maggiore che porta a un migliore controllo della forma. Sebbene gli elementi interstiziali possano essere ben controllati nel processo di gas atomizzazione, sussistono ancora potenziali rischi di contaminazione. Uno di questi è dato dai materiali refrattari di cui sono costituiti i crogioli e gli ugelli. Una soluzione per limitare la contaminazione consiste nell'utilizzo dei sistemi di atomizzazione a induzione tramite elettrodo (EIGA – *Electrode Induction Melting Gas Atomization*). La materia prima, che si presenta sotto forma di barra, ruota e raggiunge il punto di fusione grazie ad una bobina conica a induzione. Successivamente il metallo fuso fluisce direttamente nella camera di atomizzazione.

L'atomizzazione al plasma si basa sull'impiego di un gas ionizzato per l'atomizzazione di polveri. Il materiale di apporto è pre-alligato in forma di fili e alimenta la camera di atomizzazione nella quale torce al plasma coassiali e getti di gas permettono la fusione e l'atomizzazione in maniera simultanea. Le polveri ottenute da tale processo sono di elevata qualità ma la produttività è particolarmente bassa a causa dell'utilizzo di un filo metallico come materiale di apporto.

L'atomizzazione centrifuga sfrutta la forza centrifuga per disperdere il metallo sotto forma di particelle. Esistono differenti declinazioni di questa tecnologia, le più diffuse e impiegate sono:

- Processo con elettrodo rotante (REP – *Rotating Electrode Process*);
- Processo con elettrodo rotante al plasma (PREP – *Plasma Rotating Electrode Process*).

Nel sistema REP un elettrodo metallico viene posto in rotazione ad alta velocità e l'estremità libera viene fusa mediante un arco elettrico formato dall'elettrodo in metallo e un elettrodo in tungsteno. Nel sistema PREP un arco al plasma viene utilizzato per fondere l'estremità di una barra rotante di materiale metallico all'interno di una camera di atomizzazione. Le forze centrifughe allontanano dalla barra il metallo fuso che solidifica sotto forma di particelle sferiche. Le particelle prodotte sono di alta qualità ma il processo ha una bassa produttività e un elevato consumo di energia.

2.3 Principali tecnologie

Una prima catalogazione delle tecnologie di Fabbricazione Additiva viene effettuata in base alla tipologia di materia prima, che può essere polvere o filamento. Per le tecnologie con polvere è possibile un'ulteriore suddivisione in funzione delle modalità di unione delle polveri e delle dimensioni del volume di costruzione della camera (terminologia in accordo con la normativa ASTM):

- Laser - Powder Bed Fusion (L-PBF), anche nota come SLM o DMLS;
- Electron Beam - Powder Bed Fusion (EB-PBF), anche nota come EBM;
- Laser - Directed Energy Deposition (L-DED), anche nota come LMD, DLD o DMD;
- Binder Jetting - Powder Bed (BJ-PB), anche nota come Three - Dimensional Printing (3DP).

Nella categoria di tecnologie basate sull'impiego di un filo metallico rientra la seguente tecnica:

- Electron Beam - Directed Energy Deposition (EB-DED), anche nota come EBAM.

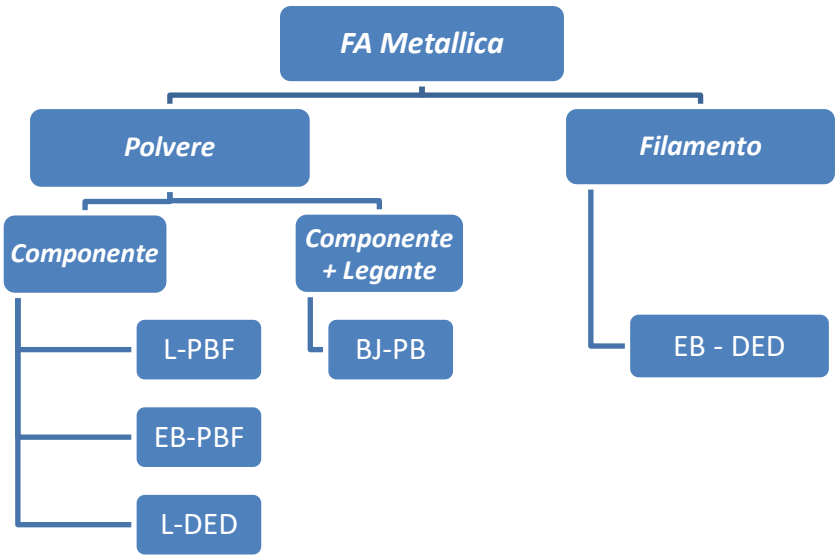


FIGURA 4 - CLASSIFICAZIONE FA METALLICA

La tecnologia Laser - Powder Bed Fusion si basa sulla fusione selettiva di un letto di polveri tramite fascio laser. Uno strato di polvere avente uno spessore tra i 20 e i 100 µm viene depositato su una piattaforma di costruzione tramite l'utilizzo di una lama. La fusione delle polveri è effettuata con un fascio laser ad alta potenza guidato tramite opportuni specchi galvanometrici. Dopo il completamento di ogni layer la piattaforma di costruzione si abbassa per consentire la deposizione del successivo strato di polvere. La camera di lavoro e la piattaforma sono riscaldate per ridurre gli stress e le distorsioni che si generano durante la costruzione. La temperatura di riscaldamento dipende dal materiale impiegato e può raggiungere i 200°C. Un gas inerte, tipicamente azoto o argon, viene insufflato per raffreddare la parte, rimuovere le particelle metalliche non fuse e ridurre la generazione di difetti.

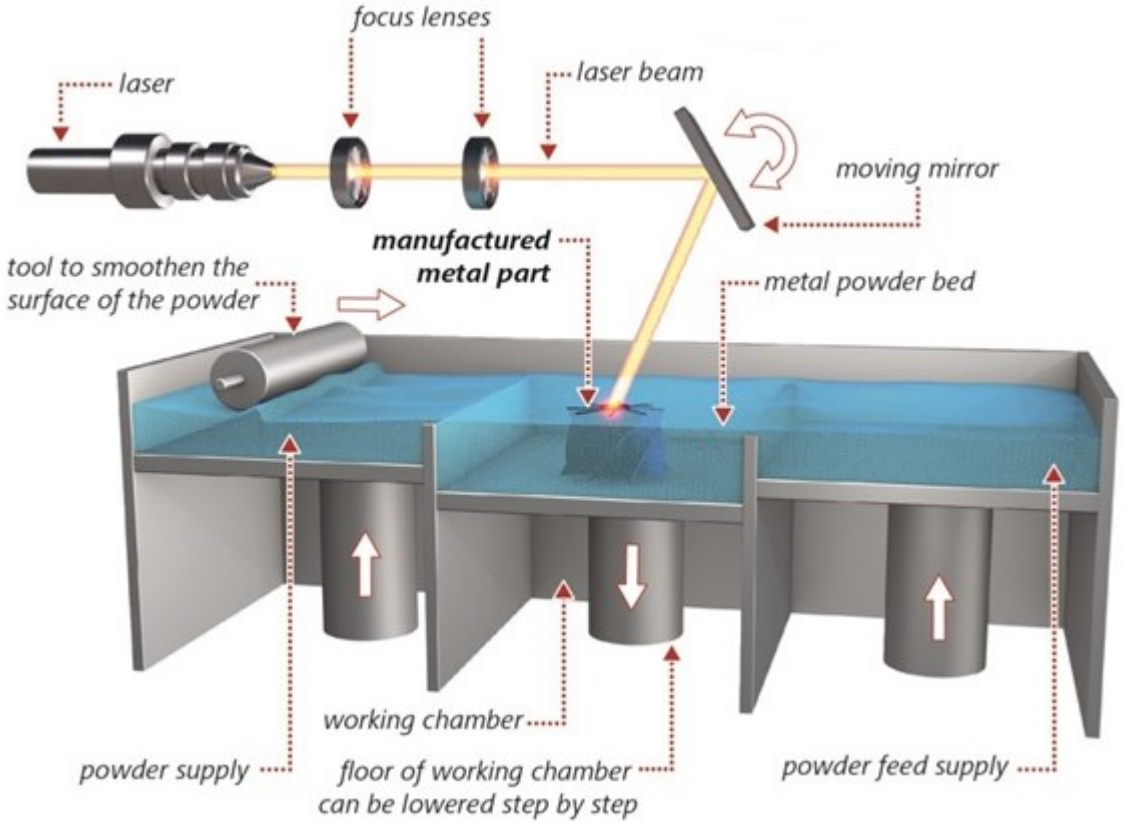


FIGURA 5 - SISTEMA L-BPF (FONTE: EMPA.CH)

Il processo di produzione della tecnologia Electron Beam - Powder Bed Fusion è molto simile a quello della L-PBF. La sostanziale differenza consiste nell'utilizzo di un cannone elettromagnetico anziché una sorgente laser come sorgente di calore. Un filamento in tungsteno viene riscaldato oltre i 2500 °C e permette l'emissione di elettroni tramite l'applicazione di una differenza di potenziale pari a 60 kV. Un sistema di lenti elettromagnetiche orienta il fascio elettronico sulla piattaforma di costruzione; quando gli elettroni colpiscono la polvere, l'energia cinetica viene trasformata in calore. La più alta energia del fascio elettronico scalda la polvere ad una temperatura superiore rispetto al sistema laser, pertanto il letto di polvere è preriscaldato a circa 800°C defocalizzando il fascio elettronico. All'interno della camera viene realizzato il vuoto per evitare che le molecole d'aria deflettano il fascio. Inoltre è utilizzato l'elio per evitare fenomeni ossidativi, ridurre la carica elettrostatica delle polveri e velocizzare il raffreddamento.

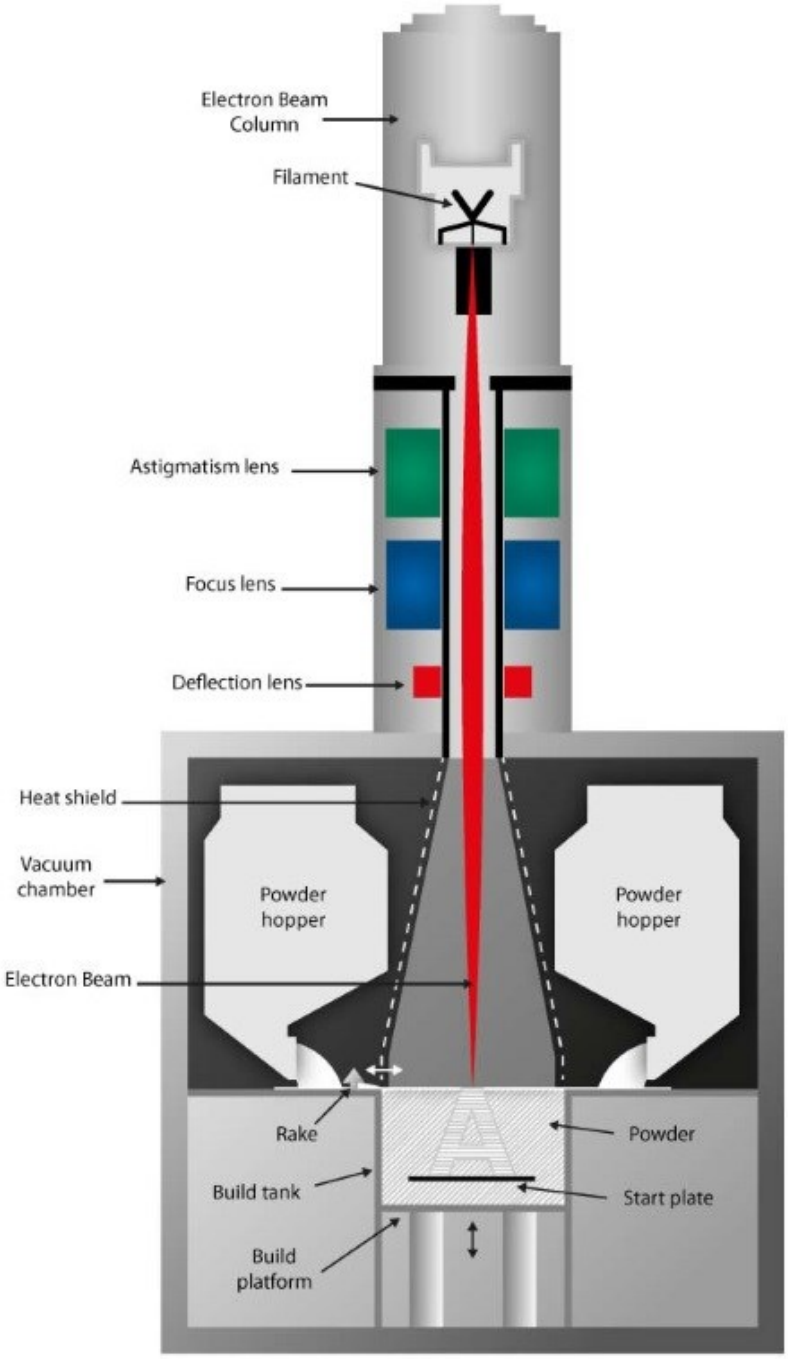


FIGURA 6 - SISTEMA EB-PBF (FONTE: ARKAM.COM)

Al contrario delle tecnologie precedenti, nel processo denominato Laser - Directed Energy Deposition la polvere viene depositata attraverso ugelli integrati con la testa laser. Pertanto tale tecnologia necessita di un sofisticato controllo di processo per garantire la qualità metallurgica dello strato depositato. La polvere metallica impiegata ha dimensioni superiori rispetto a quella usata nei sistemi a letto di polvere e viene trasportata sulla piattaforma di deposizione mediante un flusso di gas inerte, solitamente azoto o argon. Sono possibili diverse configurazioni come sistema a 5 assi con testa movimentabile lungo l'asse Z e tavola rotante oppure sistema a 5 assi con sola testa di deposizione e piattaforma orientabili. Sono anche disponibili soluzioni ibride con testa di deposizione e di sottrazione. Poiché la deposizione e la fusione sono localizzate, non ci sono limiti sulla dimensione del volume di lavoro. Ciò porta a non creare strutture di supporto, limitando le geometrie realizzabili.

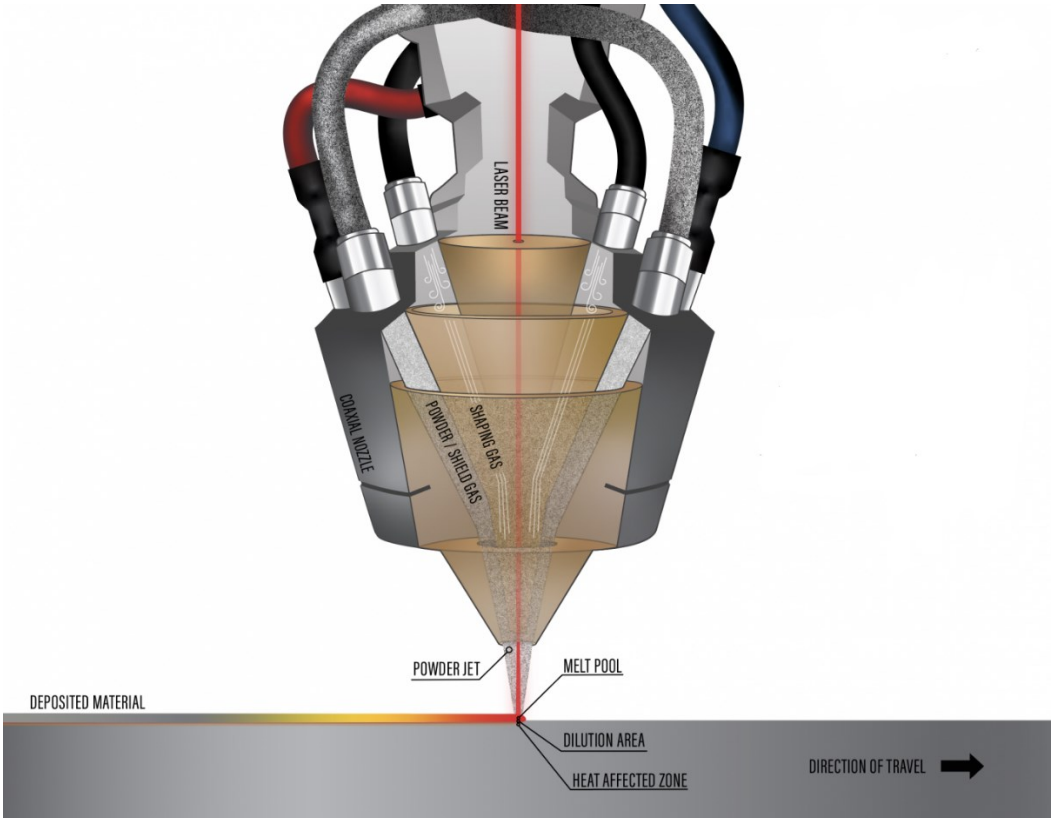


FIGURA 7 - SISTEMA L-DED (FONTE: BEAM MACHINES.COM)

Il processo di Binder Jetting – Powder Bed prevede lo spargimento di un legante su un letto di polvere mediante una testa di deposizione. Generalmente il legante si trova in forma liquida e viene distribuito in fini goccioline. I leganti utilizzati nelle applicazioni per metallo sono polimerici. Una volta che il legante è entrato in contatto con la polvere nei punti definiti dal software, la piattaforma di lavoro si abbassa e un nuovo strato di polvere viene depositato. Questo processo si ripete fino al completamento del pezzo. Il raffreddamento non è effettuato poiché non avviene la fusione del materiale. Il particolare viene comunque lasciato all'interno del letto di polvere in modo da fare agire completamente il legante e conferire maggior resistenza. Successivamente si procede alla sinterizzazione della parte, in cui evapora il legante. In alcuni casi è possibile realizzare un processo di infiltrazione, dove un metallo fuso penetra per capillarità all'interno delle porosità lasciate dal legante evaporato (solitamente bronzo o ottone).

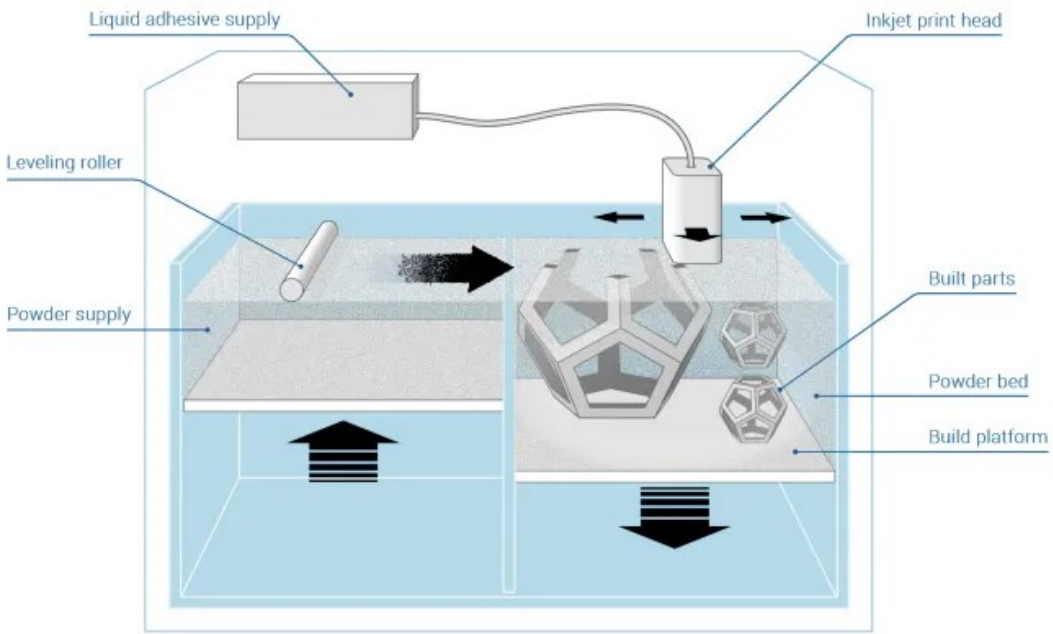


FIGURA 8 - SISTEMA BJ-PB (FONTE: BINTOA.COM)

La tecnologia Electron Beam - Directed Energy Deposition è alimentata mediante filo metallico che viene fuso con un fascio elettronico. La movimentazione è effettuata con controllo numerico all'interno di un ambiente di lavoro di grandi dimensioni posto sottovuoto. I ratei di deposizione sono elevati a scapito della precisione della lavorazione. Il lento gradiente di raffreddamento e le grandi dimensioni dei pezzi realizzabili possono generare tensioni e stress residui; pertanto vengono solitamente effettuati trattamenti termici dopo la deposizione.

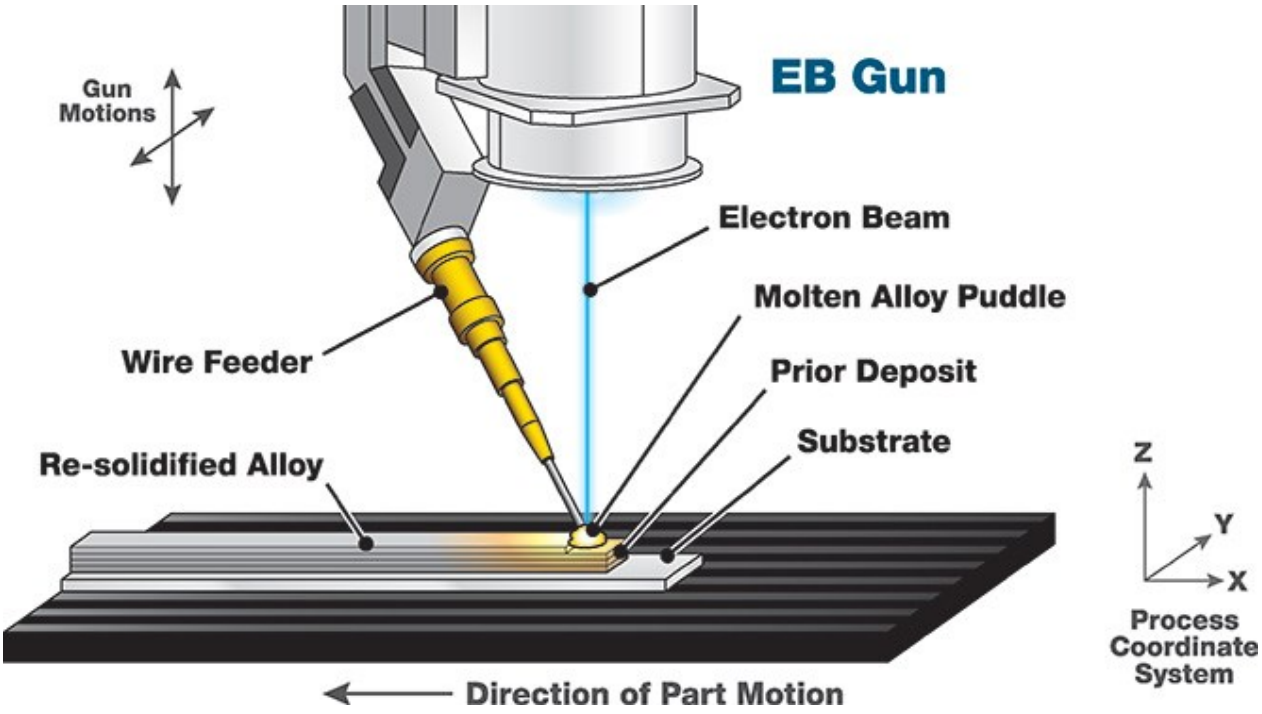


FIGURA 9 - SISTEMA EB-DED (FONTE: SCIAKY.COM)

2.4 Materiali e applicazioni

A causa del recente sviluppo delle tecnologie additive metalliche, la disponibilità dei materiali è limitata. Quelli più utilizzati sono:

- Leghe di alluminio;
- Leghe di ferro;

- Leghe di nickel;
- Leghe di titanio;
- Leghe di cromo-cobalto;
- Leghe di titanio-alluminio;
- Metalli preziosi.

Le leghe di alluminio sono quelle maggiormente utilizzate per la FA, principalmente nei settori aerospaziale ed automobilistico per la realizzazione di componenti alleggeriti e con geometria complessa. Quelle più impiegate sono le leghe AlSi10Mg, AlSi12, Al 6061, A357, Al 7075 e Scalmalloy®.

Le leghe ferrose sono di recente applicazione e alcune di queste sono state testate solo in ambito sperimentale. Dato l'elevato costo del processo di FA, i materiali maggiormente impiegati sono quelli per applicazioni a elevato valore aggiunto. Inoltre devono possedere alcune proprietà fondamentali per essere adatti alla tecnologia additiva: saldabilità per poter formare il bagno fuso, conducibilità per facilitare i processi a fascio elettronico e lavorabilità per diminuire la formazione di cricche da shock termico. Gli acciai che possiedono queste caratteristiche sono gli acciai inossidabili, i maraging e quelli per utensili. Tra gli acciai inossidabili, l'acciaio 17-4 PH è utilizzato nei settori aeronautico e automobilistico; l'acciaio 15-5 PH1 trova largo impiego nella realizzazione di prototipi, piccole serie, parti di ricambio e prodotti personalizzati; l'acciaio AISI 316 L viene utilizzato nell'automotive con le tecnologie L-PBF e L-DED. Gli acciai maraging trovano impiego nella costruzione di stampi con canali di raffreddamento conformali per lo stampaggio di materie plastiche. Tra gli acciai per utensili è molto utilizzato l'AISI 4340 per applicazioni di riparazione mediante L-DED.

Le leghe di nickel sono principalmente utilizzate per impieghi ad alta temperatura (oltre 800°C). Ad esempio l'Inconel 718, grazie all'elevata resistenza termica, all'usura, alla corrosione e alla rottura, è ideale per parti di turbine a gas e impianti industriali.

Le leghe di titanio possiedono elevate proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione, oltre ad essere biocompatibili. Grazie a queste caratteristiche vengono utilizzate in applicazioni industriali e biomedicali. La lega di titanio maggiormente utilizzata è la Ti-6Al-4V.

Le leghe cobalto-cromo si distinguono per la loro elevata durezza e per la resistenza alla corrosione, consentendone l'utilizzo nella fabbricazione di turbine eoliche, componenti per motori e altri particolari industriali che richiedono un'elevata resistenza all'usura. Inoltre, grazie alla loro biocompatibilità, trovano applicazione anche in ambito medico e dentistico.

Le leghe basate su un composto intermetallico noto come alluminuro di titanio (TiAl) sono molto leggere e resistenti all'ossidazione e al calore, ma poco duttili. Il loro sviluppo iniziò circa 40 anni fa ma reali applicazioni sono iniziate solo negli anni 2000. Trovano impiego nei campi automobilistico e aeronautico (palettature degli ultimi stadi delle turbine).

L'utilizzo di materiali preziosi è principalmente legato al settore della gioielleria.

3. I progetti di ricerca sulla FA – Horizon 2020

Horizon 2020 (*H2020*) è il Programma Quadro dell'Unione Europea (UE) per la ricerca e l'innovazione relativo al periodo 2014-2020 e prevede un finanziamento di circa 80 miliardi di euro.

Horizon 2020 unifica in un unico strumento finanziario tre programmi precedenti (2007-2013) finalizzati a supportare la ricerca, l'innovazione e lo sviluppo tecnologico: il *Settimo Programma Quadro* (*7PQ*), il *Programma Quadro per la Competitività e l'Innovazione* (*CIP*) e l'*Istituto Europeo di Innovazione e Tecnologia* (*EIT*). La sua elaborazione è stata avviata nel 2011, quando i capi di Stato e di governo della UE hanno invitato la Commissione europea, per il periodo 2014-2020, a integrare in un quadro strategico comune i diversi strumenti dedicati a sostenere la ricerca e l'innovazione. La Commissione ha avviato così un'ampia consultazione che ha coinvolto tutti gli attori principali in tema di ricerca e ha portato all'istituzione del Programma.

Lo scopo di *Horizon 2020* è sostenere la ricerca e l'innovazione. Si propone di contribuire, in particolare, alla realizzazione di una società basata sulla conoscenza e sull'innovazione, orientata verso le grandi priorità indicate dall'Agenda europea per il 2020: crescita intelligente, sostenibile e inclusiva.

Concepito come un motore in grado di guidare lo sviluppo economico e di creare nuovi posti di lavoro, *Horizon 2020* rappresenta il principale strumento finanziario volto a rafforzare lo *Spazio Europeo della Ricerca*, ossia la creazione di un'area comune in cui ricercatori, conoscenze scientifiche e tecnologiche possano circolare liberamente, e ad attuare *l'Unione dell'Innovazione*: iniziativa finalizzata a promuovere la competitività globale europea, favorendo la costituzione di partenariati per l'innovazione, il potenziamento delle iniziative di ricerca e la semplificazione amministrativa per l'accesso ai fondi di finanziamento.

Horizon 2020 si focalizza su tre priorità, o "pilastri", articolati a loro volta in specifici obiettivi:

- *Eccellenza scientifica*, volta a consolidare e a estendere l'eccellenza della base scientifica

dell'Unione Europea. Questa priorità viene perseguita attraverso quattro obiettivi specifici:

- *Consiglio Europeo della Ricerca* (*ERC*), per rafforzare la ricerca di frontiera, finanziando i singoli ricercatori di talento e i loro gruppi;
- *Tecnologie future ed emergenti* (*FET*), per supportare la ricerca collaborativa su tecnologie avanzate radicalmente nuove e su idee innovative ad alto rischio, in grado di rivoluzionare il sistema produttivo;
- *Marie Skłodowska-Curie*, per rafforzare le competenze, la formazione e le prospettive di carriera dei ricercatori promuovendone la mobilità geografica e intersettoriale;
- *Infrastruttura di ricerca*, per consolidare le infrastrutture di ricerca europee, comprese quelle elettroniche, valorizzandone il potenziale innovativo e il capitale umano.

- *Leadership industriale*, la cui priorità è finalizzata ad accelerare lo sviluppo tecnologico e a consentire alle piccole e medie imprese (PMI) innovative di crescere in un contesto internazionale. Si articola in tre obiettivi:
  - *Leadership nel settore delle tecnologie abilitanti e industriali*, volto a rafforzare la leadership industriale dell'Europa mediante la ricerca, lo sviluppo tecnologico, la dimostrazione e l'innovazione nell'ambito delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT); delle nanotecnologie, materiali avanzati, biotecnologie, fabbricazione e trasformazione avanzate; dello spazio.
  - *Accesso al capitale di rischio*, per aiutare le imprese a ottenere, attraverso specifici strumenti finanziari, tra cui i prestiti e le garanzie, un più facile accesso al capitale di rischio da investire in ricerca e innovazione;
  - *Innovazione nelle PMI*, volto a promuovere diversi tipi di innovazione nelle piccole e medie imprese, in particolare in quelle ad alto potenziale di crescita e internazionalizzazione, favorendo la creazione di un ecosistema favorevole alla crescita delle PMI.

- *Sfide per la società*, per affrontare le grandi questioni sociali che si presenteranno nel prossimo futuro. Si concentra su sette "sfide":
    - *Salute, evoluzione demografica e benessere*, per migliorare la salute e il benessere dei cittadini lungo l'intero arco della loro vita;
    - *Sicurezza alimentare, agricoltura e silvicoltura sostenibili, ricerca marina, marittima e sulle acque interne e bioeconomia*, per garantire prodotti alimentari sicuri, sani e di elevata qualità, sviluppando sistemi di produzione sostenibili ed efficienti;
    - *Energia sicura, pulita ed efficiente*, per promuovere una transizione verso un sistema energetico affidabile, economicamente accessibile, sostenibile e competitivo;
    - *Trasporti intelligenti, ecologici e integrati*, per realizzare una rete di trasporto europea efficiente sul piano delle risorse, rispettosa dell'ambiente e del clima e sicura;
    - *Azioni per il clima, efficienza delle risorse e materie prime*, per promuovere una società e una economia efficienti e sostenibili nell'uso delle risorse e dell'acqua, capaci di rispondere ai cambiamenti climatici;
    - *L'Europa in un mondo che cambia – società inclusive, innovative e riflessive*, per comprendere le trasformazioni sociali in corso e suggerire soluzioni per una crescita sostenibile sul piano sociale ed economico;
    - *Società sicure – proteggere la libertà e la sicurezza dell'Europa e dei suoi cittadini*, per promuovere società europee sicure e rispondere a minacce di portata mondiale, rafforzando una cultura della libertà e della giustizia.

Il programma di lavoro di *H2020* può essere attuato attraverso otto partenariati pubblico-privato (PPP) nel caso di attività di ricerca ed innovazione di importanza strategica per la competitività industriale ed il ruolo guida dell'Unione o per affrontare specifiche sfide sociali. Essi sono:

- *Fabbriche del futuro* (*FoF*), finalizzati a supportare l'industria manifatturiera attraverso lo sviluppo di tecnologie e di sistemi di produzione sostenibili;

- *Edifici efficienti sul piano energetico* (*EeB*), volti ad aumentare la competitività e l'efficienza energetica dell'industria delle costruzioni;
- *Veicoli verdi* (*EGVI*), per lo sviluppo di un sistema di trasporti moderno ed efficiente, a bassa emissione di carbonio;
- *Processi industriali sostenibili* (*SPIRE*), orientati all'efficienza energetica e alla sostenibilità nell'uso delle risorse dei processi industriali;
- *Fotonica*, una tecnologia abilitante che ha applicazioni in molti settori, quali l'energia, la salute o la produzione di oggetti di uso quotidiano come i lettori DVD e i cellulari;
- *Robotica*, un volano della crescita industriale, strategico per affrontare alcune "sfide sociali" dei prossimi anni quali il cambiamento demografico, la salute e il benessere, la produzione alimentare, i trasporti e la sicurezza;
- *Calcolo ad alte prestazioni (HPC)*, che svolge un ruolo centrale nel contribuire alla crescita economica e al progresso scientifico in Europa;
- *Internet del futuro (5G)*, per stimolare lo sviluppo di infrastrutture di reti capaci di garantire servizi informatici per tutti i settori e gli utenti.

I PPP sono forme di cooperazione tra soggetti pubblici e mondo delle imprese; fondamentalmente, il coinvolgimento dell'industria assicura che la ricerca e l'innovazione incontrino le esigenze del settore.

I temi (topics) per ogni PPP sono pubblicati in bandi (calls) insieme agli altri topics delle calls di *Horizon 2020*. Secondo l'approccio contrattuale dei PPP, il contenuto di ogni topic viene preparato dalla Commissione Europea previa consultazione con l'industria e gli atri stakeholders. Per quanto riguarda il PPP denominato *Fabbriche del Futuro*, la parte privata del partenariato è costituita dall'*EFFRA* (*European Factories of the Future Research Association*) i cui soci sono le principali imprese industriali europee, come Siemens, Airbus, Daimler, Philips, Bosch, nonché le italiane

FCA, Comau, Fidia, Prima Industrie. Anche centri di ricerca pubblici, università e associazioni imprenditoriali ne sono membri.

Il compito principale dell'*EFFRA* è quello di definire le linee guida (Roadmaps) in cui vengono specificati gli obiettivi da raggiungere in un determinato orizzonte temporale.

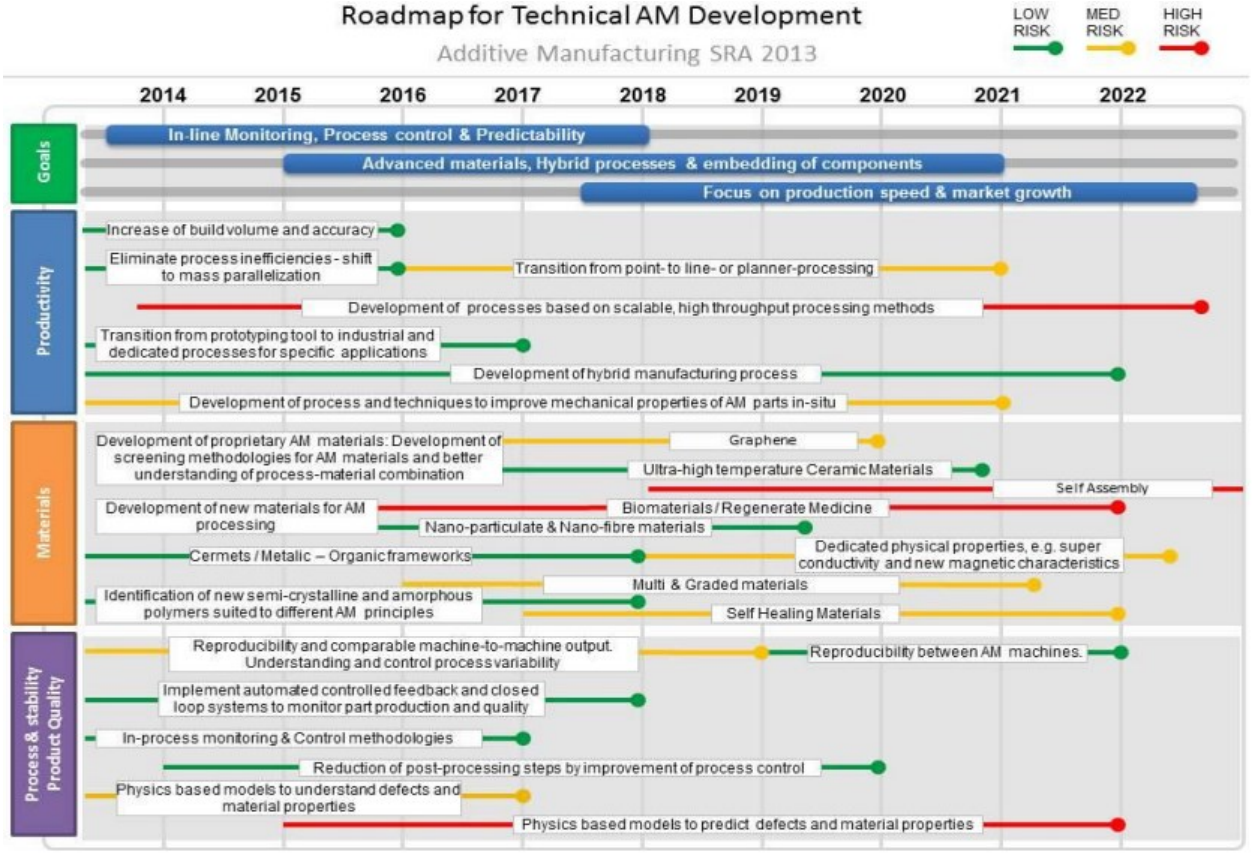


FIGURA 10 - ROADMAP FA (FONTE: AM STRATEGIC RESEARCH AGENDA, ALLISON A., SCUDAMORE R.)

All'interno del "pilastro" *Leadership industriale*, dal topic *FOF-13-2016 - Photonics Laser-based production* è stato definito il progetto *EnCompass* e dal topic *FOF-01-2016 - Novel hybrid approaches for additive and subtractive manufacturing machines* il progetto *OpenHybrid*.

3.1 *EnCompass*

Il progetto denominato *EnCompass (Engineering Compass)* mira a sviluppare un applicativo software che incrementi l'intera produttività dei sistemi basati su fusione a letto di polvere metallica.

Questo programma, definito IDDS (*Integrated Design Decision Support*), aiuta a gestire l'intera catena della FA a letto di polvere: dalla progettazione, alla costruzione della parte, fino al post-processing.

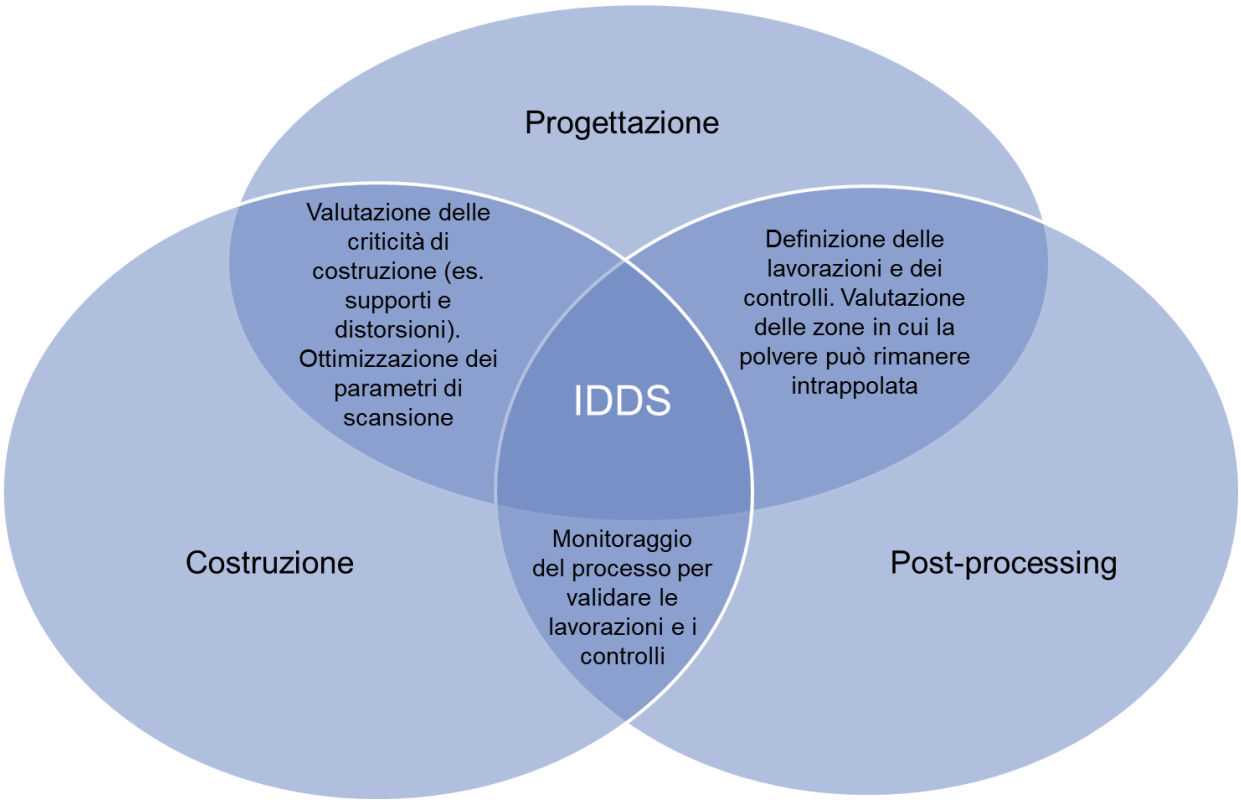


FIGURA 11 - IDDS

Integrando le fasi di progettazione, costruzione e post-processing è possibile minimizzare tempi e costi e ottenere un processo più affidabile: l'intento è di produrre un pezzo ottimizzato per la FA fin dai primi stadi della progettazione.

Per raggiungere questo fine, l'implementazione dell'IDDS prevede di:

- Valutare diverse criticità, quali la generazione dei supporti e la loro rimozione, la presenza di zone troppo sottili o "massive" e di zone che non possono essere lavorate o in cui la polvere può rimanere intrappolata, le distorsioni e le tensioni causate dalla costruzione.
- Ottimizzare i parametri di scansione, come lo spessore del layer, la strategia di scansione e lo slicing.
- Valutare le zone di difficile lavorazione e in cui la polvere può rimanere intrappolata.
- Monitorare la costruzione per validare le lavorazioni e i controlli definiti durante la progettazione.

Il consorzio di questo progetto europeo è composto da:

- Fraunhofer;
- ITP;
- CRF;
- University of Liverpool;
- ESI;
- Renishaw;
- Rolls Royce;
- MTC;
- Altair;
- EWF;
- DePuy Synthes.

Il CRF svolge il ruolo di utente finale: il suo compito è quello di definire un caso studio per mettere a punto e testare l'IDDS. Come caso studio è stato scelto un collettore di aspirazione prototipale.

3.2 *OpenHybrid*

Il progetto *OpenHybrid* ha come scopo la realizzazione di un sistema ibrido additivo-sottrattivo versatile, rendendo la testa di deposizione un utensile intercambiabile alla pari di quelli presenti in un classico sistema CNC. La testa sarà connessa ad una piattaforma compatibile sia con macchine CNC aventi diverse strutture sia con robot e sfrutterà la tecnologia Laser - Directed Energy Deposition.

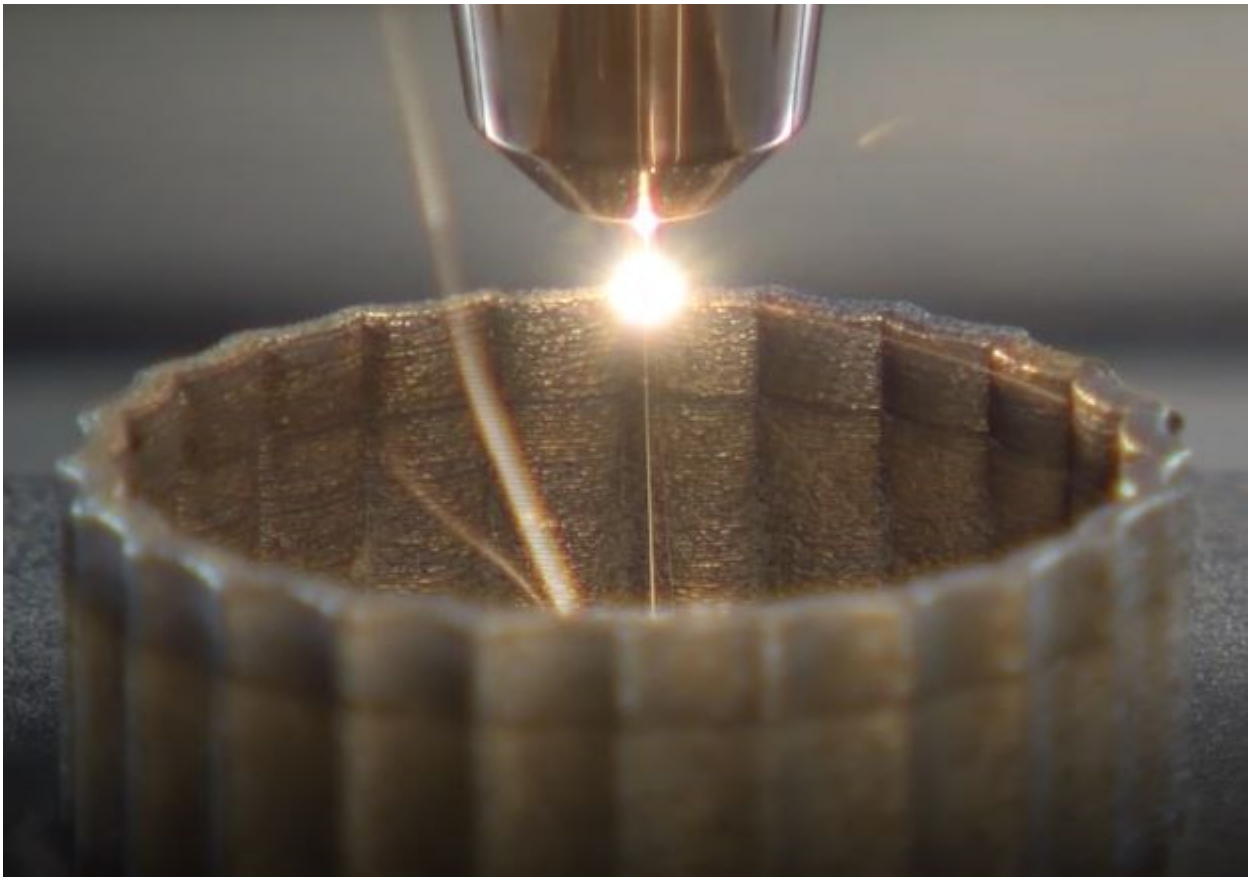


FIGURA 12 - OPENHYBRID, DEPOSIZIONE

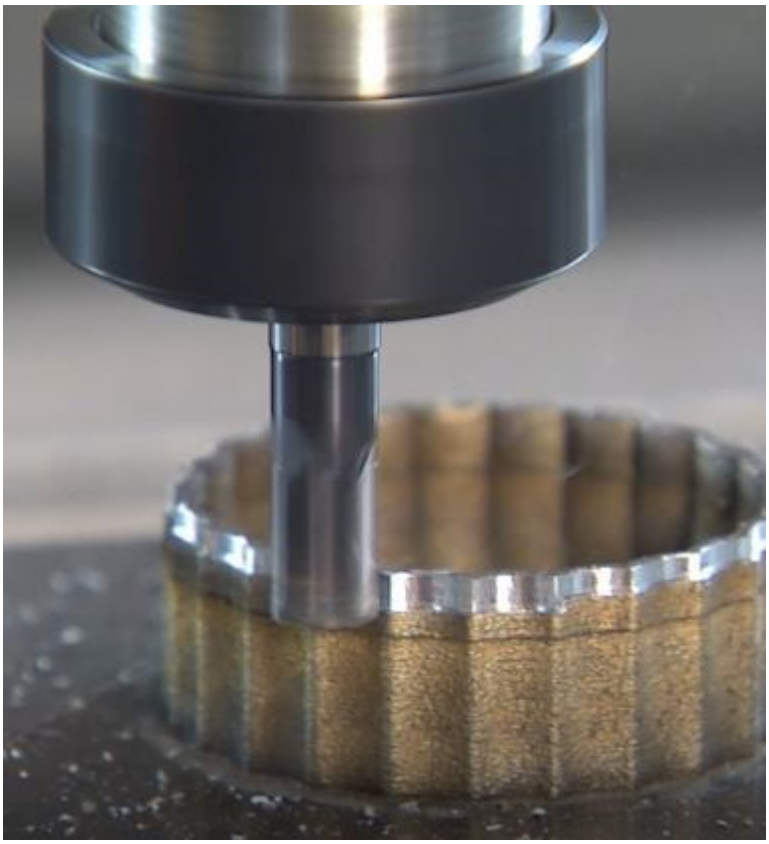


FIGURA 13 - OPENHYBRID, FRESATURA

Il consorzio di questo progetto è composto da:

- MTC;
- Siemens;
- Weir;
- Fraunhofer;
- GF Machining Solutions;
- Hybrid Manufacturing Technologies;
- Gudel;
- TWI;
- ESI;

- BCT;
- EWF;
- CRF;
- PicaSoft.

Anche per questo progetto europeo il CRF svolge il ruolo di utente finale: come caso studio è stata scelta la riparazione di una matrice di trancia usurata per lo stampaggio lamiera.

4. Riprogettazione per L-PBF di un collettore di aspirazione

Come precedentemente detto, il CRF ha proposto un collettore di aspirazione come caso studio per il progetto europeo *EnCompass*. Tale scelta è stata effettuata per diverse ragioni: la geometria piuttosto complessa permette di testare l'efficacia dell'IDDS; sfruttando le potenzialità della Fabbricazione Additiva è possibile studiare nuove soluzioni per ottimizzare il flusso interno e ridurre il peso del pezzo; il materiale di cui è costituito il collettore, AlSi10Mg, è adatto alla produzione per Fabbricazione Additiva metallica.

Il collettore, in fase prototipale, è progettato per un autoveicolo con motore a tre cilindri. Le sue dimensioni sono di 249x143x96 mm e la produzione tradizionale è costituita da pressocolata seguita da fresatura e maschiatura su macchina a controllo numerico.

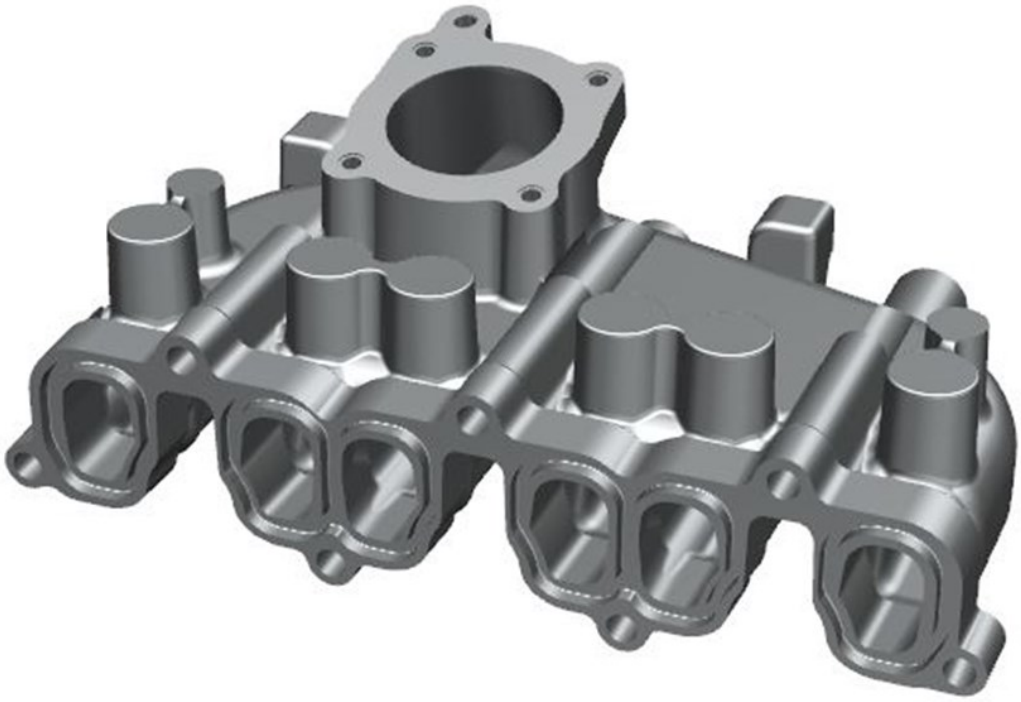


FIGURA 14 - COLLETTORE

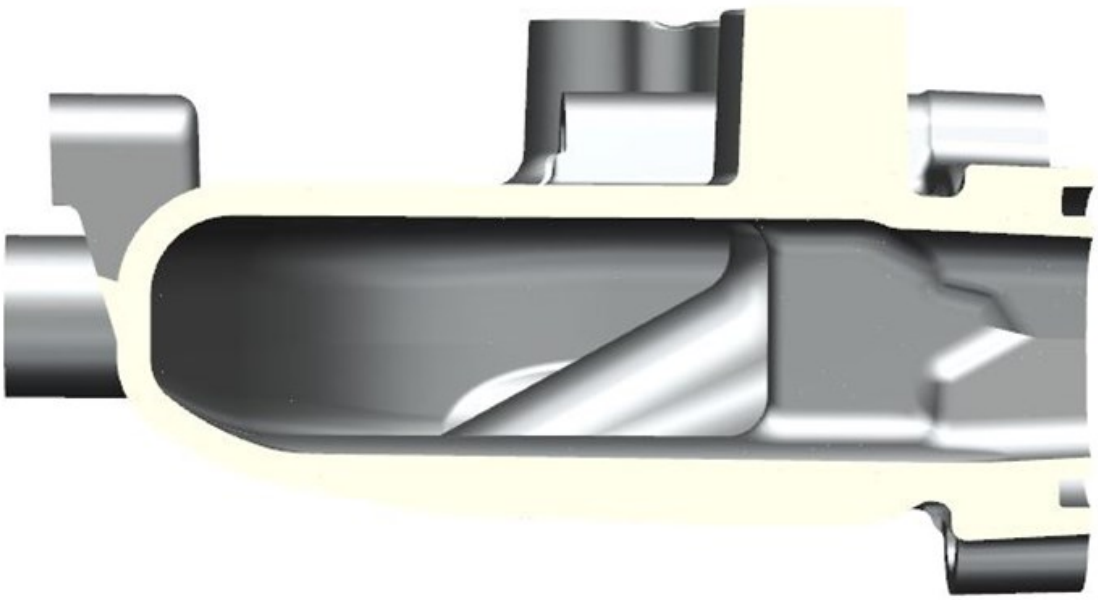


FIGURA 15 - COLLETTORE, SEZIONE

La riprogettazione ha l'obiettivo di consentire l'implementazione dell'IDDS e di essere un confronto rispetto a una progettazione con il suo utilizzo.

La riprogettazione prevede una reciproca relazione tra la modellazione della geometria, l'analisi fluidodinamica e la simulazione del pre-processing: il flusso interno dipende dalla geometria del collettore che a sua volta determina l'orientazione in macchina e la posizione dei supporti.

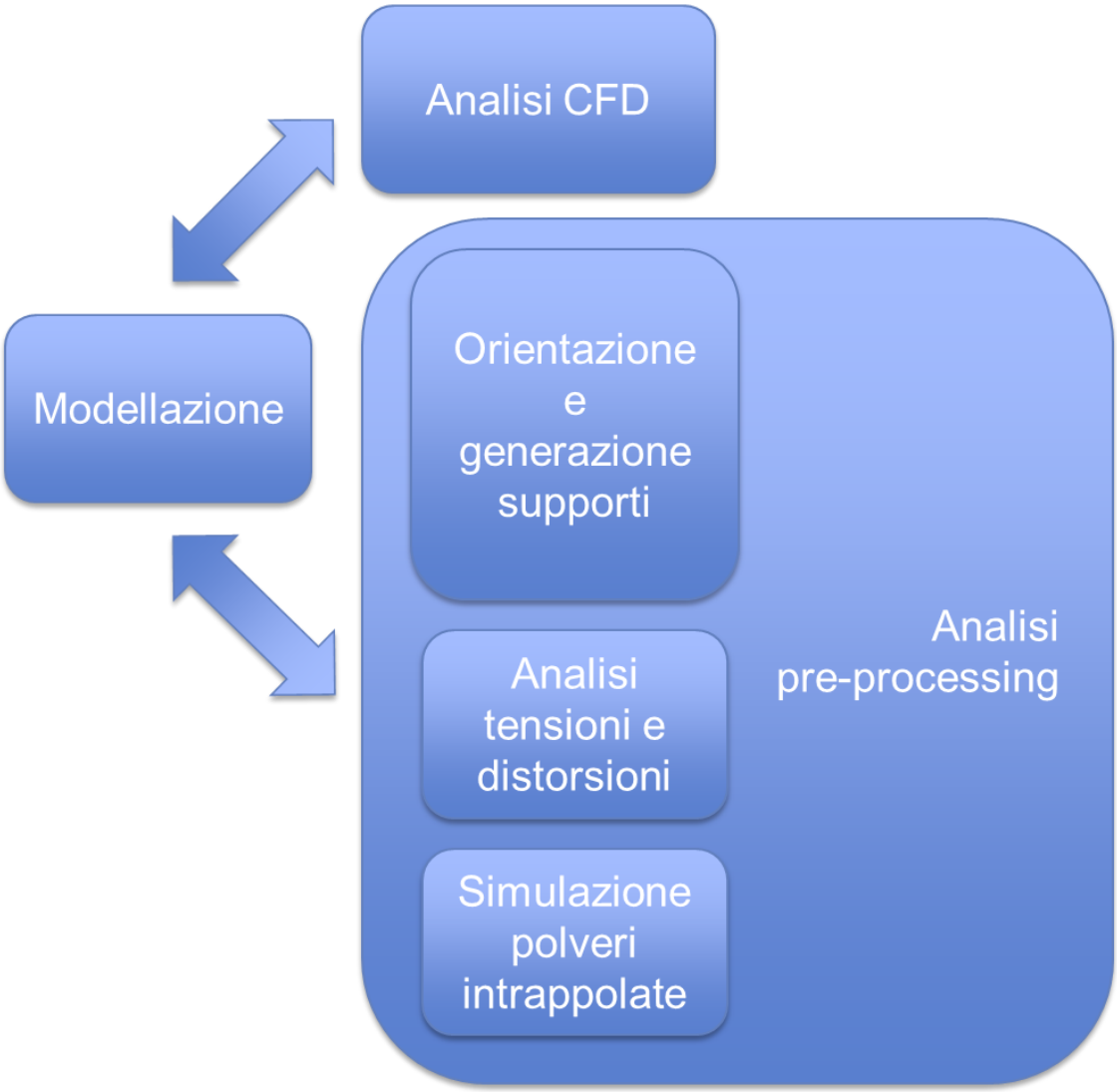


FIGURA 16 - RIPROGETTAZIONE

4.1 Modellazione della nuova geometria

La nuova geometria del collettore deve permettere un buon flusso interno e la corretta costruzione del pezzo. La criticità principale è la struttura cava che costituisce il collettore: in fase

di produzione sono necessari dei supporti interni che non possono essere rimossi con successive lavorazioni.

Per prima cosa è stata valutata l'orientazione del collettore che prevedesse il minor volume di supporti interni. Come si evidenzia nella figura sottostante, la migliore orientazione è quella con il collettore posto in verticale.

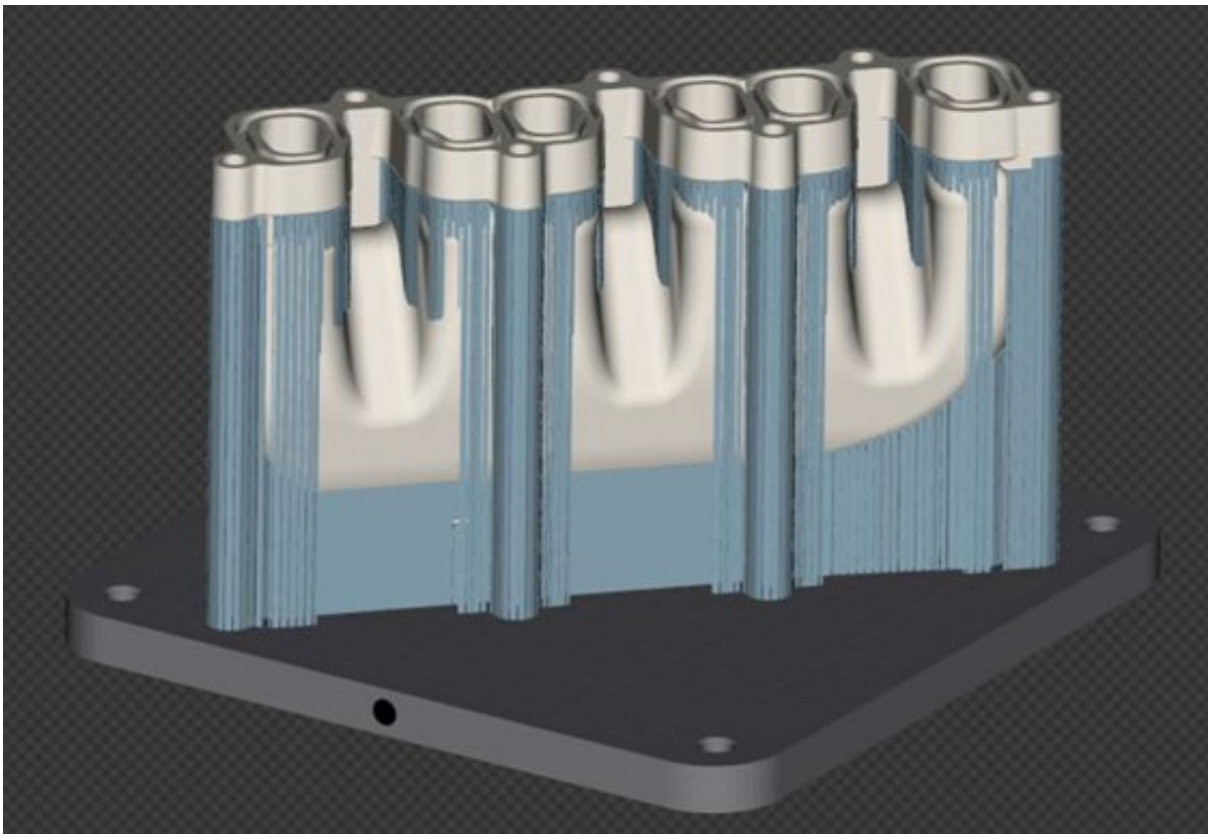


FIGURA 17 - ORIENTAZIONE COLLETTORE ORIGINALE

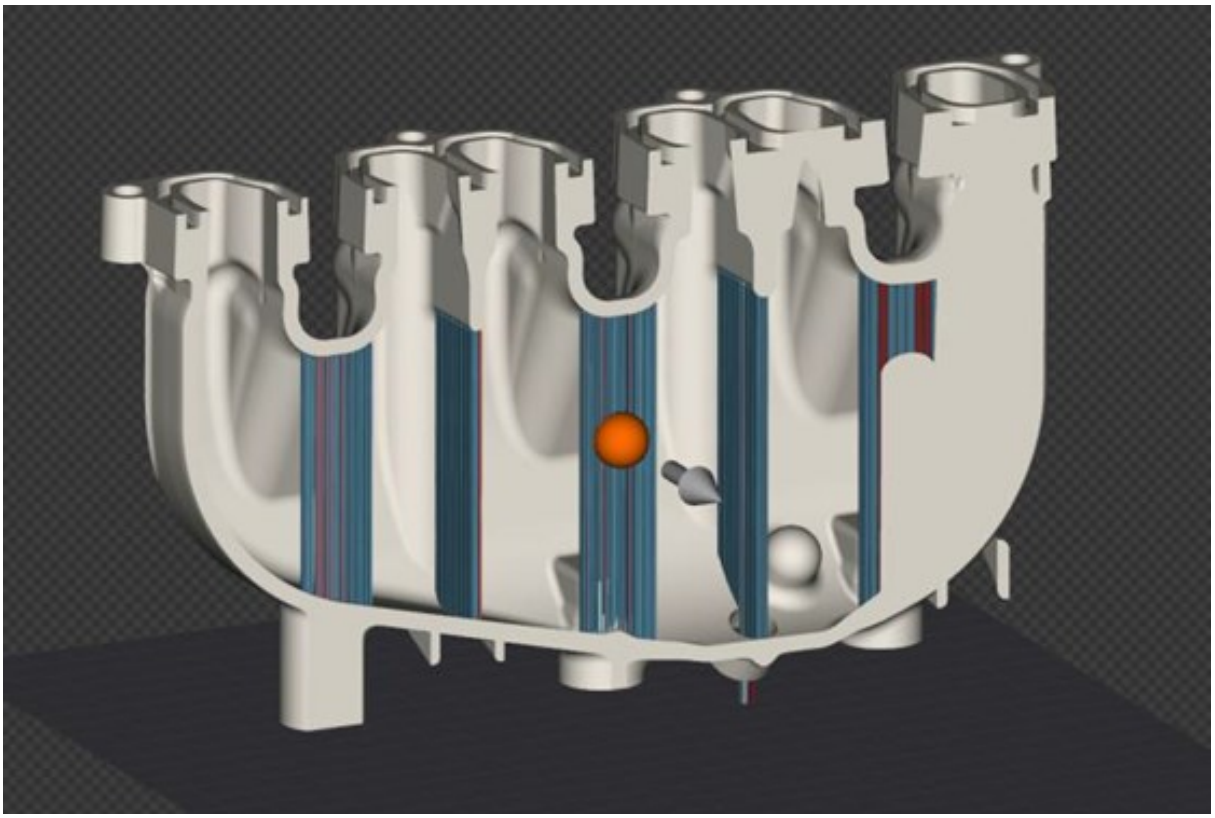


FIGURA 18 - SUPPORTI INTERNI COLLETTORE ORIGINALE

Diverse pareti interne hanno bisogno di supporti, pertanto la geometria è stata modificata in modo da renderla autoportante; per la lega di alluminio, un angolo di inclinazione di 35° permette di non avere supporti. La modellazione è stata effettuata con il software *Siemens NX*.

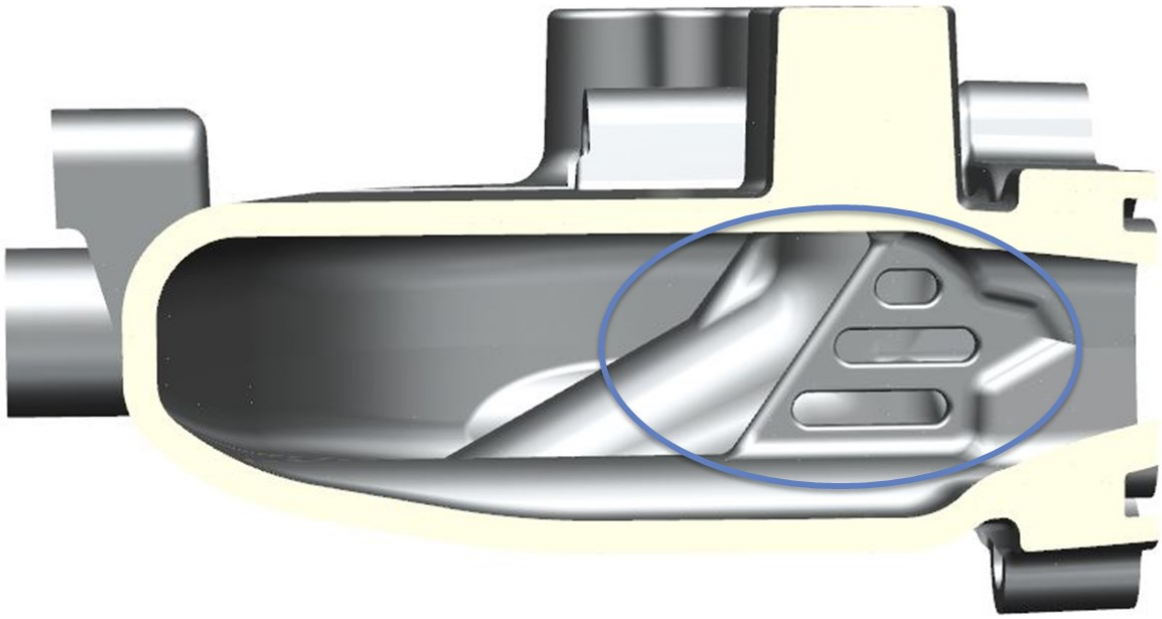


FIGURA 19 - RIPROGETTAZIONE 1, SEZIONE

A seguito di questa riprogettazione, conservativa rispetto alla geometria tradizionale, ne è stata creata una nuova che permettesse un minor tempo di costruzione e un minor numero di supporti.

FIGURA 20 - RIPROGETTAZIONE 2

FIGURA 21 - RIPROGETTAZIONE 2, SEZIONE

La presenza di setti interni rende i condotti autoportanti nelle zone in cui i supporti non potevano essere rimossi. Di contro, l'analisi fluidodinamica mostra eccessive perdite di carico dovute alla presenza degli stessi.

Si è quindi valutata una terza geometria, in grado di mantenere i vantaggi di costruzione per Fabbricazione Additiva senza peggiorare il flusso interno.

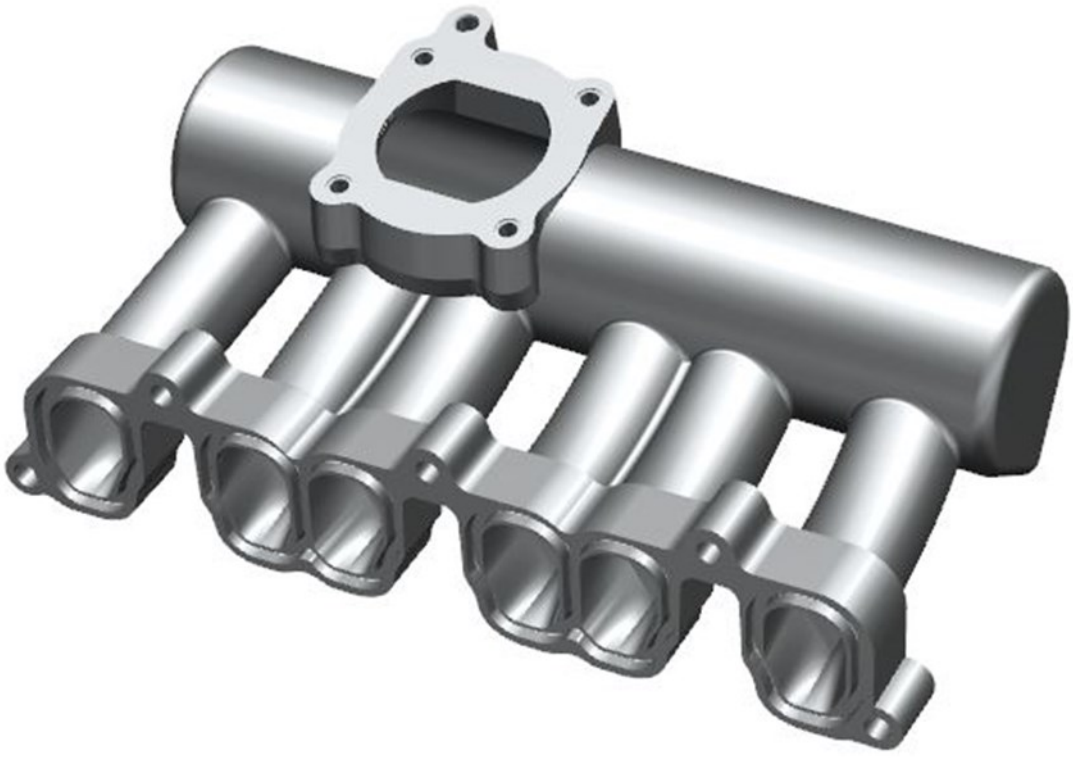


FIGURA 22 - RIPROGETTAZIONE 3

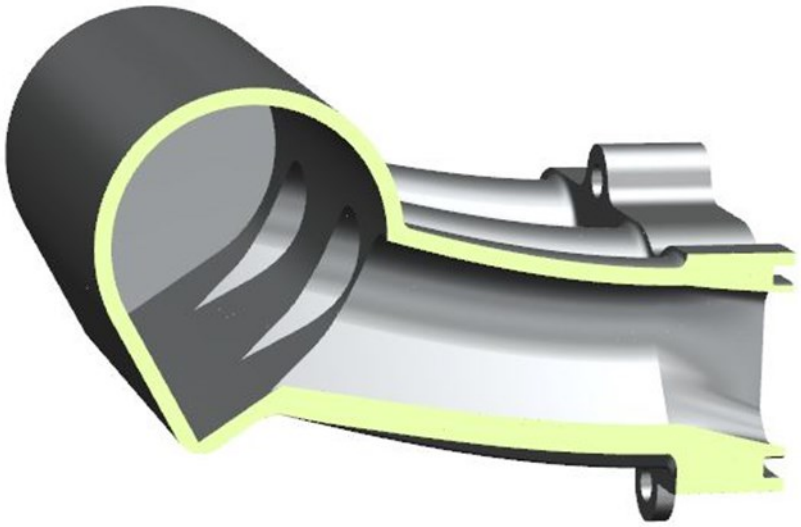


FIGURA 23 - RIPROGETTAZIONE 3, SEZIONE

La forma “a goccia” dei condotti permette di avere sezioni autoportanti senza compromettere il flusso interno del collettore.

4.2 Analisi fluidodinamica

L’analisi CFD è stata effettuata, mediante l’impiego del pacchetto *AcuConsole* di *HyperWorks*, prima sul collettore originale e successivamente sulle varie riprogettazioni per confrontare i risultati ottenuti.

La prima operazione da effettuare è la creazione del volume occupato dal fluido.

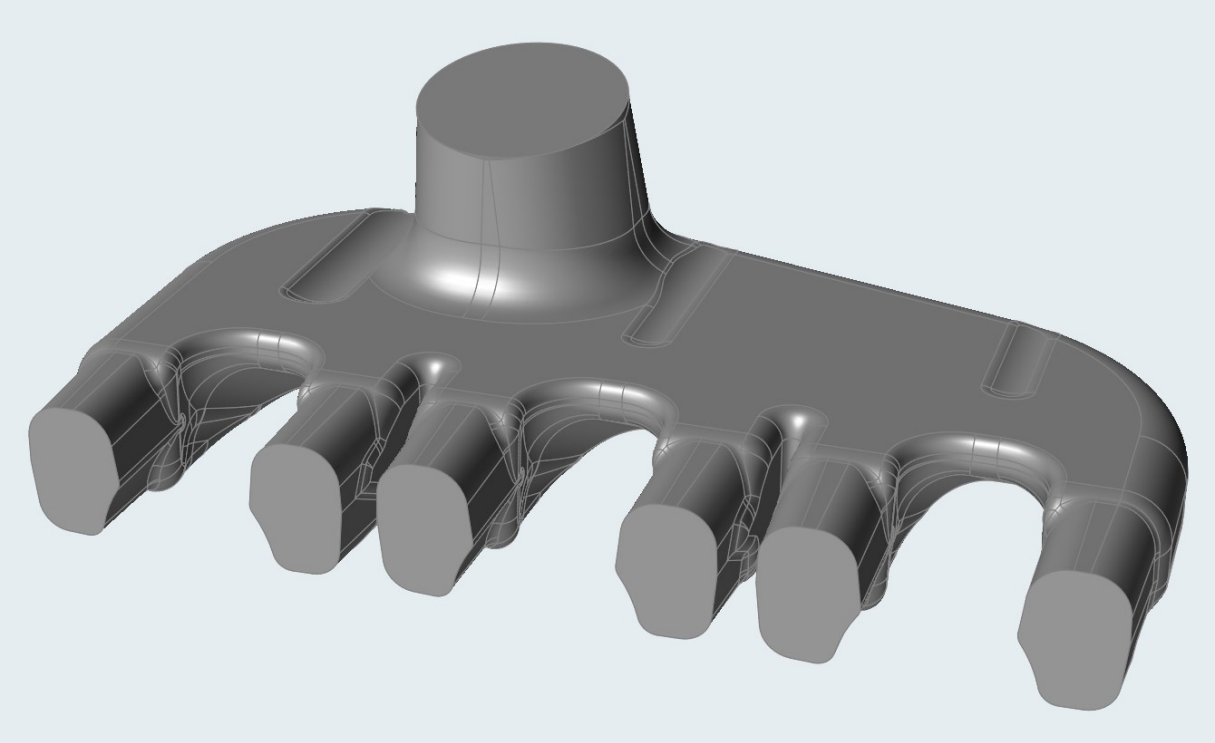


FIGURA 24 - VOLUME FLUIDO

Seguono la definizione delle superfici e le relative condizioni al contorno: alla superficie di ingresso del fluido è stata imposta una portata in massa, a quelle di uscita una pressione. Le restanti superfici hanno una condizione di parete.

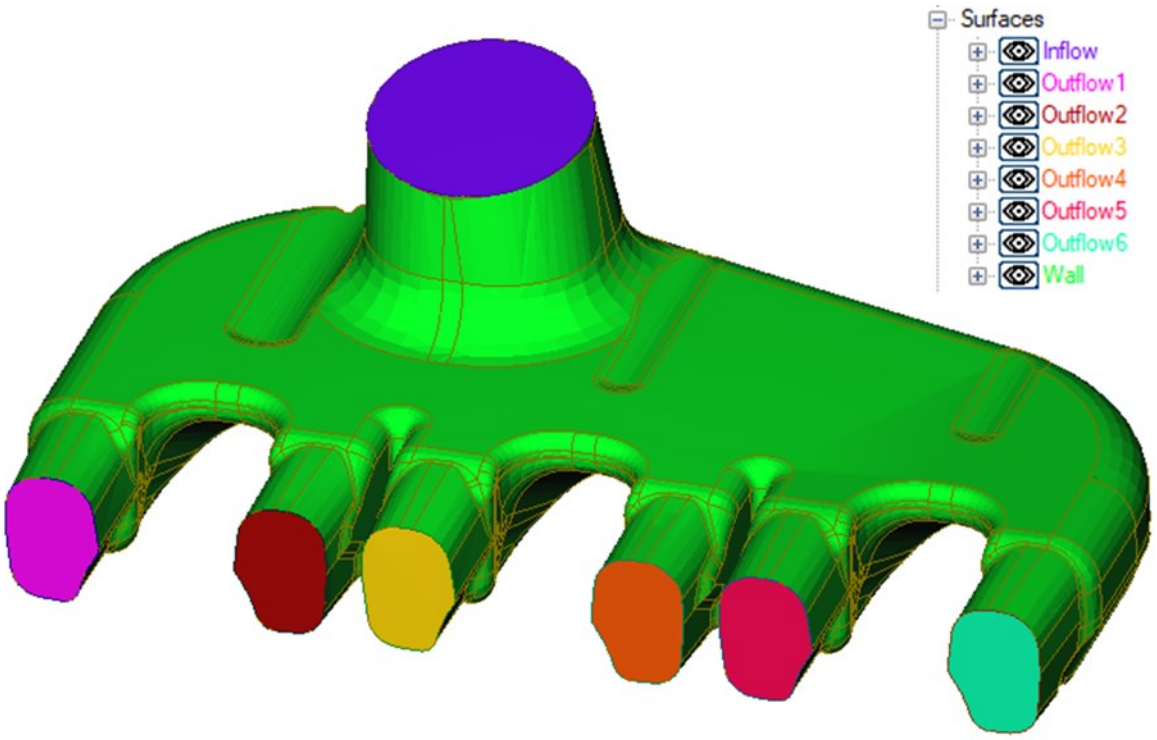


FIGURA 25 - DEFINIZIONE SUPERFICI PER ANALISI CFD

Le ipotesi e le considerazioni fatte per definire l'analisi sono:

- Regime stazionario;
- Moto del fluido turbolento, la cui turbolenza è descritta dal modello "Spalart-Allmaras";
- Densità e temperatura costanti;
- Trascurate le componenti di fluttuazione delle grandezze fisiche che descrivono le equazioni del trasporto, consentendo così l'utilizzo del modello RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

Come setup per confrontare le diverse geometrie si è deciso di impostare una portata test in ingresso pari a 25 g/s e una pressione in uscita pari a quella ambiente.

Successivamente si genera la mesh, costituita da elementi prismatici. Nelle zone in cui il fluido lambisce la parete del collettore o dove vi è una geometria particolarmente complessa, la mesh è più fitta poiché proprio in quelle regioni si trovano le condizioni più interessanti dal punto di vista fluidodinamico, come zone di depressione locale o di reflusso d'aria.

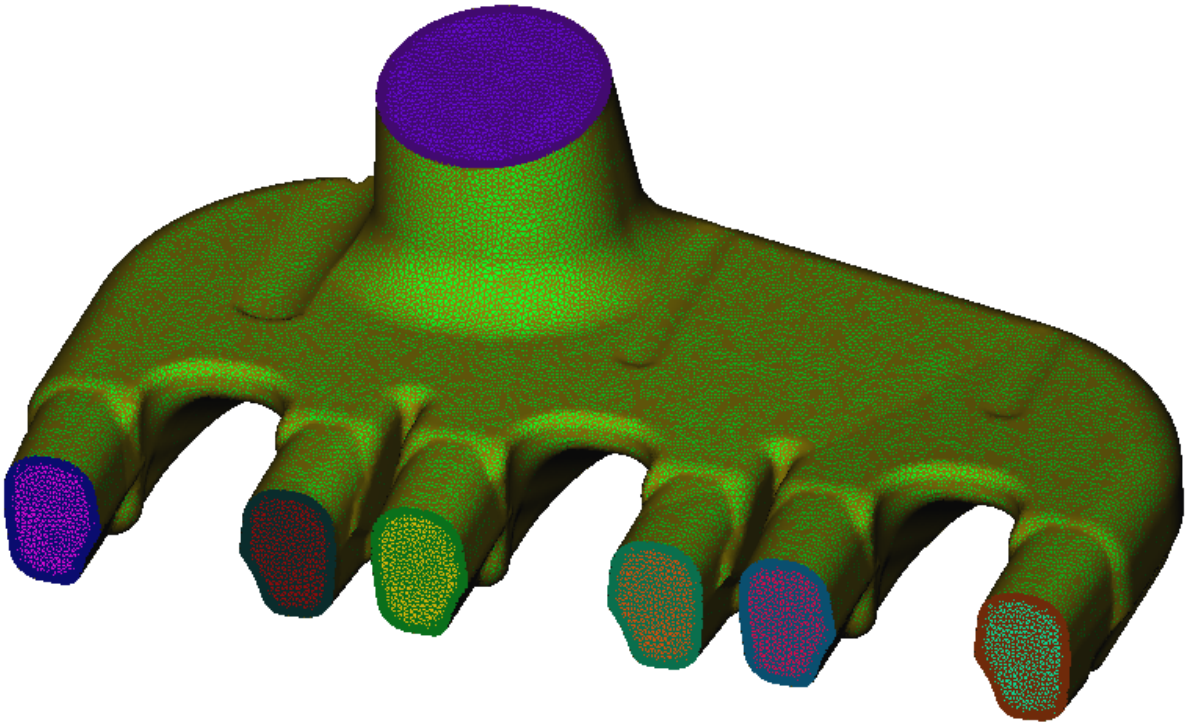


FIGURA 26 - GENERAZIONE MESH

I risultati in termini di pressione per le diverse geometrie sono mostrati nelle immagini seguenti.

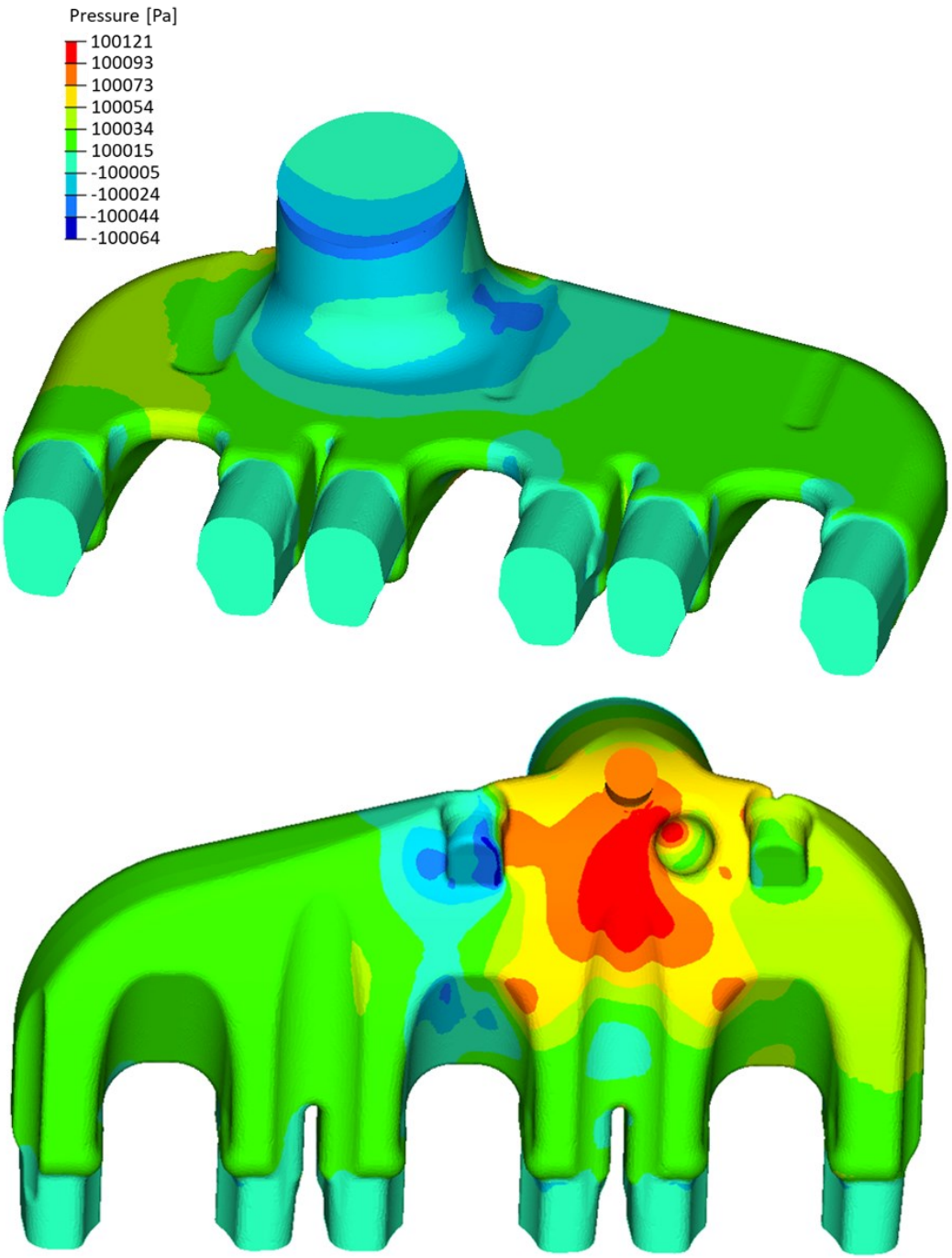


FIGURA 27 - PRESSIONE NEL COLLETTORE ORIGINALE

L'analisi fluidodinamica sul collettore originale mostra una ridotta differenza di pressione tra sezione di ingresso e uscita. Si può anche notare un incremento di pressione causato dall'incidenza del fluido sul fondo del collettore.

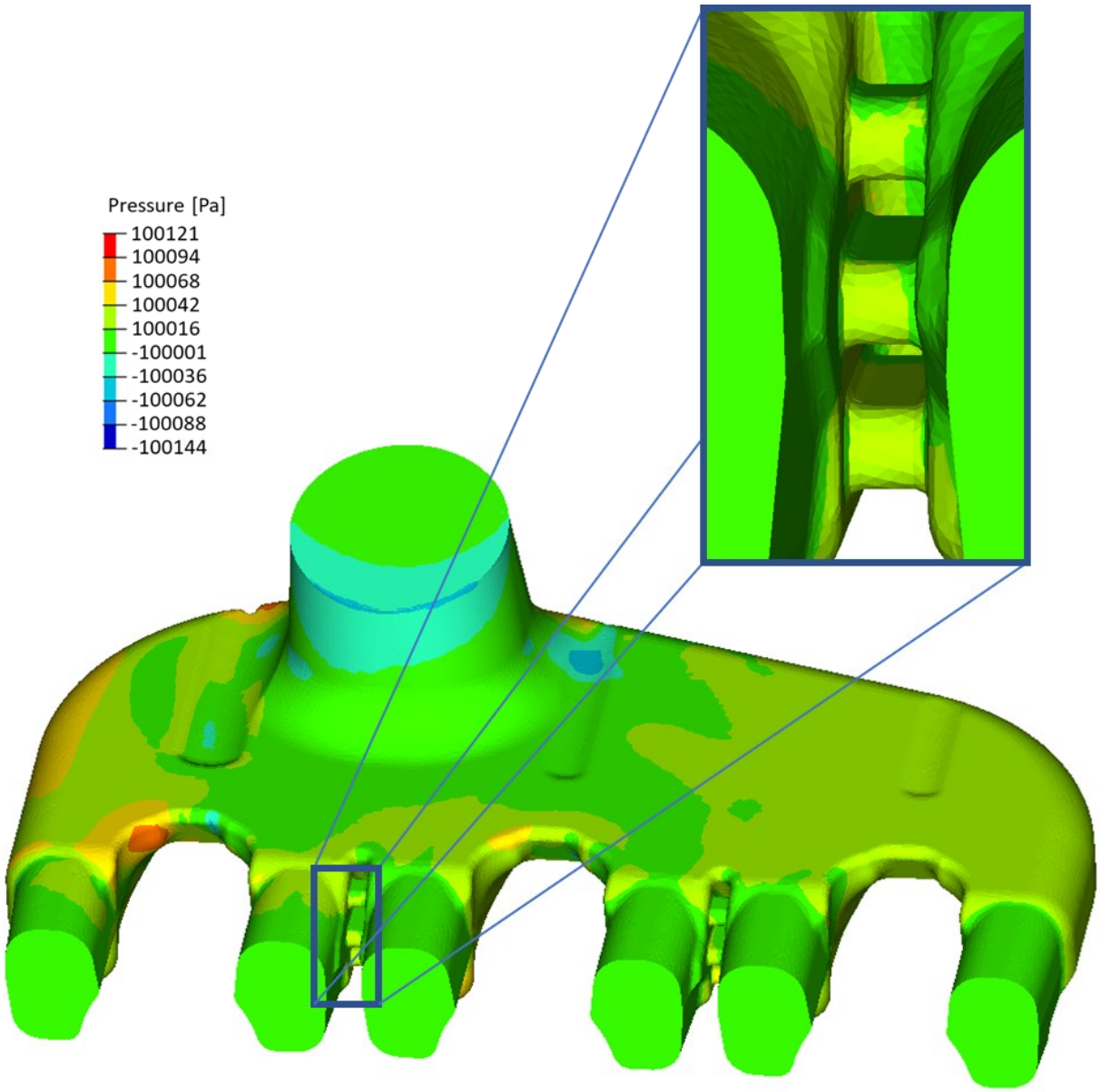


FIGURA 28 - PRESSIONE NELLA RIPROGETTAZIONE 1

La prima riprogettazione, a causa delle modeste modifiche sulla geometria, non mostra sostanziali differenze in termini di pressione rispetto al collettore originale.

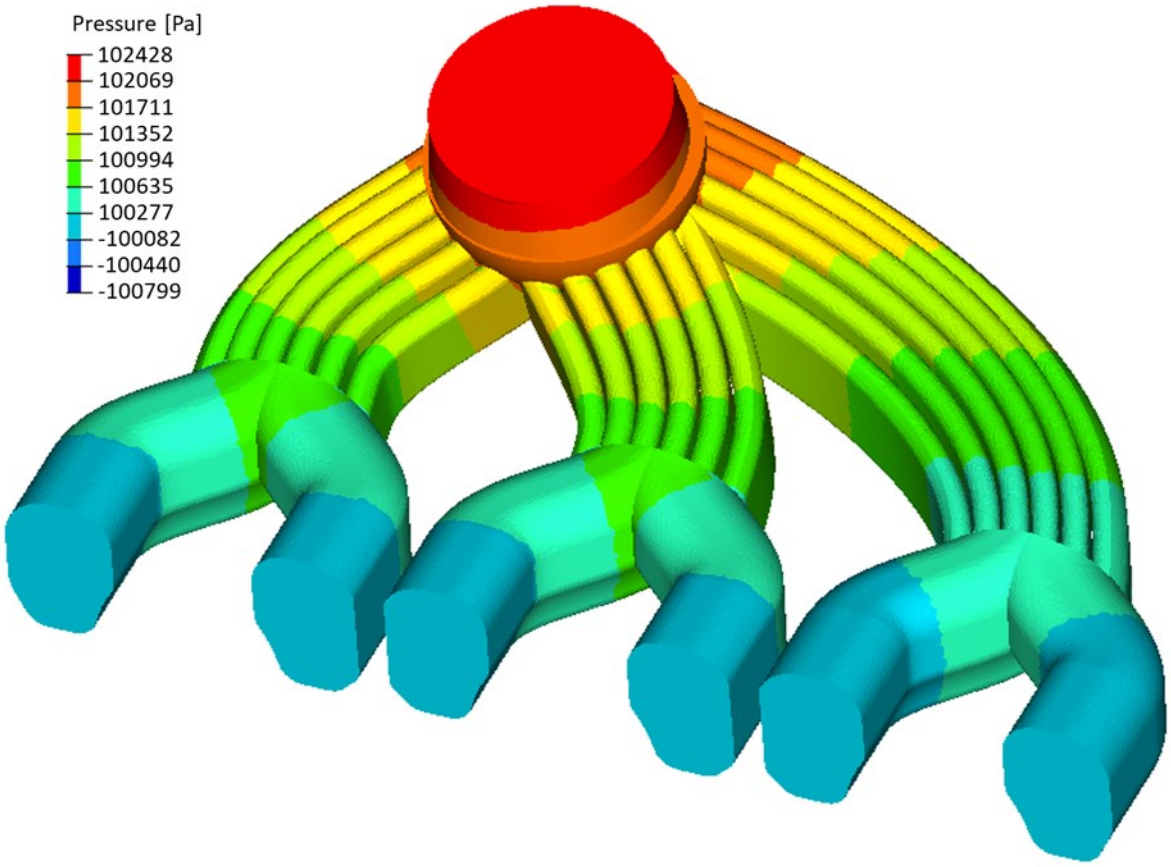


FIGURA 29 - PRESSIONE NELLA RIPROGETTAZIONE 2

L'analisi fluidodinamica della seconda riprogettazione mostra un'elevata differenza di pressione tra ingresso e uscita dovute alla presenza dei setti interni.

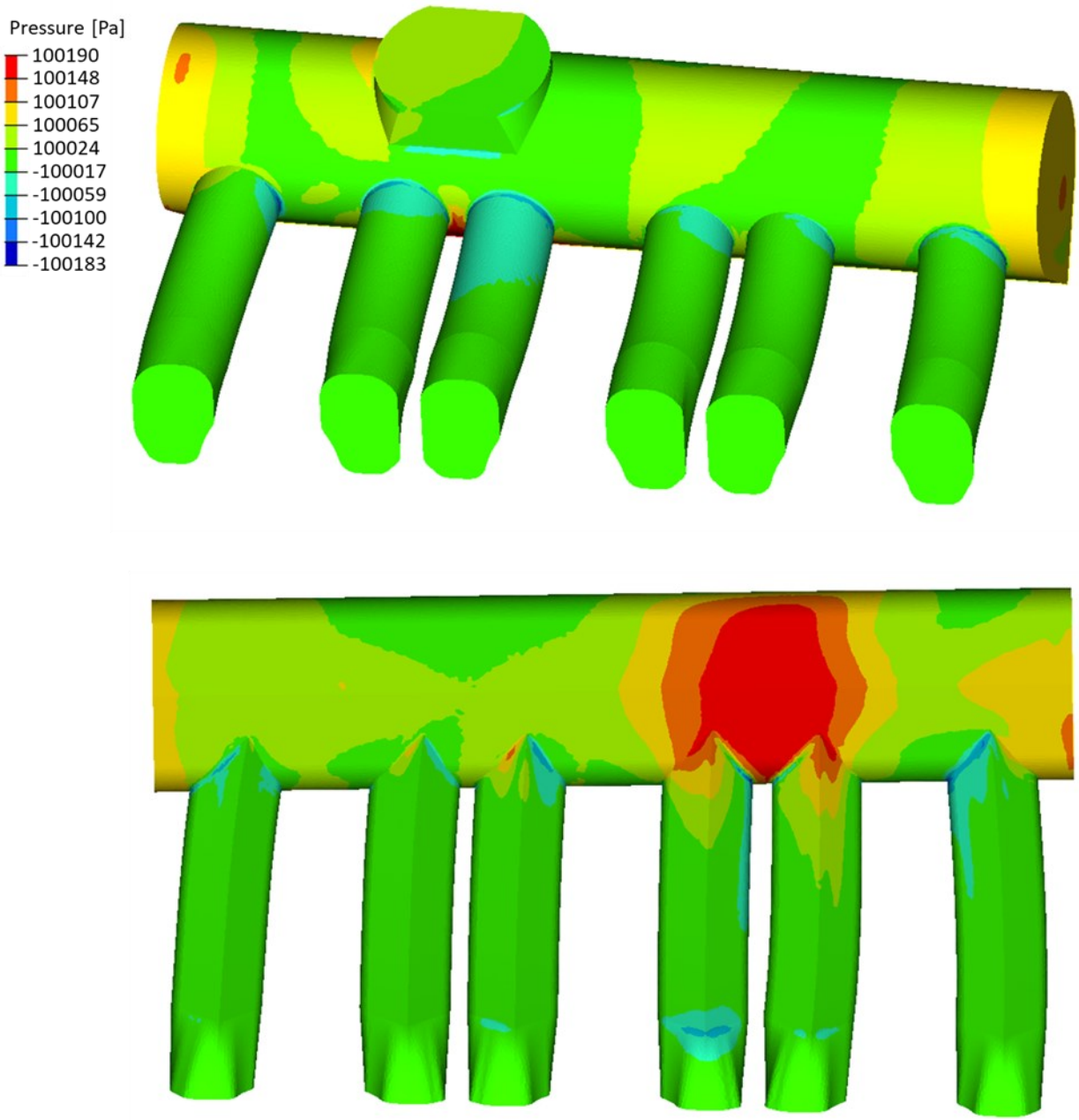


FIGURA 30 - PRESSIONE NELLA RIPROGETTAZIONE 3

La terza riprogettazione, similmente al collettore originale, permette una ridotta perdita di pressione tra ingresso e uscita.

4.3 Simulazione del pre-processing per la Fabbricazione Additiva

La prima simulazione del pre-processing effettuata riguarda la definizione dell'orientazione ottimale e la generazione dei supporti. Dopo aver convertito il file CAD in formato STL, è stato importato nel programma *Materialise Magics*. Il volume di lavoro è quello dei macchinari del partner Renishaw che produrrà il collettore ed è pari a 250x250x350 mm. Come anticipato, la modellazione della geometria e l'orientazione del collettore sono vincolati dalla necessaria assenza di supporti non rimovibili.

Le soluzioni migliori per le tre riprogettazioni sono mostrate nelle seguenti immagini:

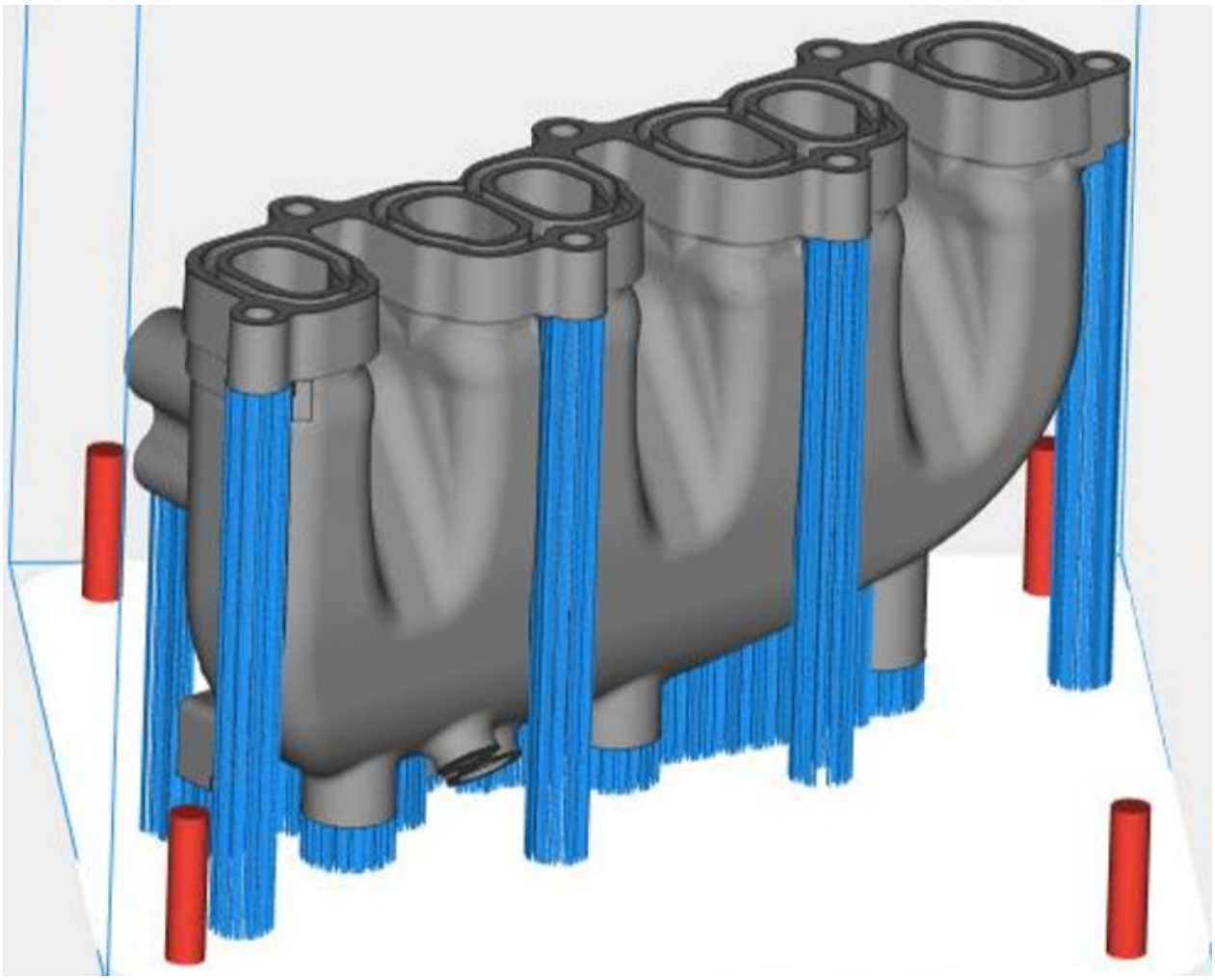


FIGURA 31 - ORIENTAZIONE E GENERAZIONE SUPPORTI RIPROGETTAZIONE 1

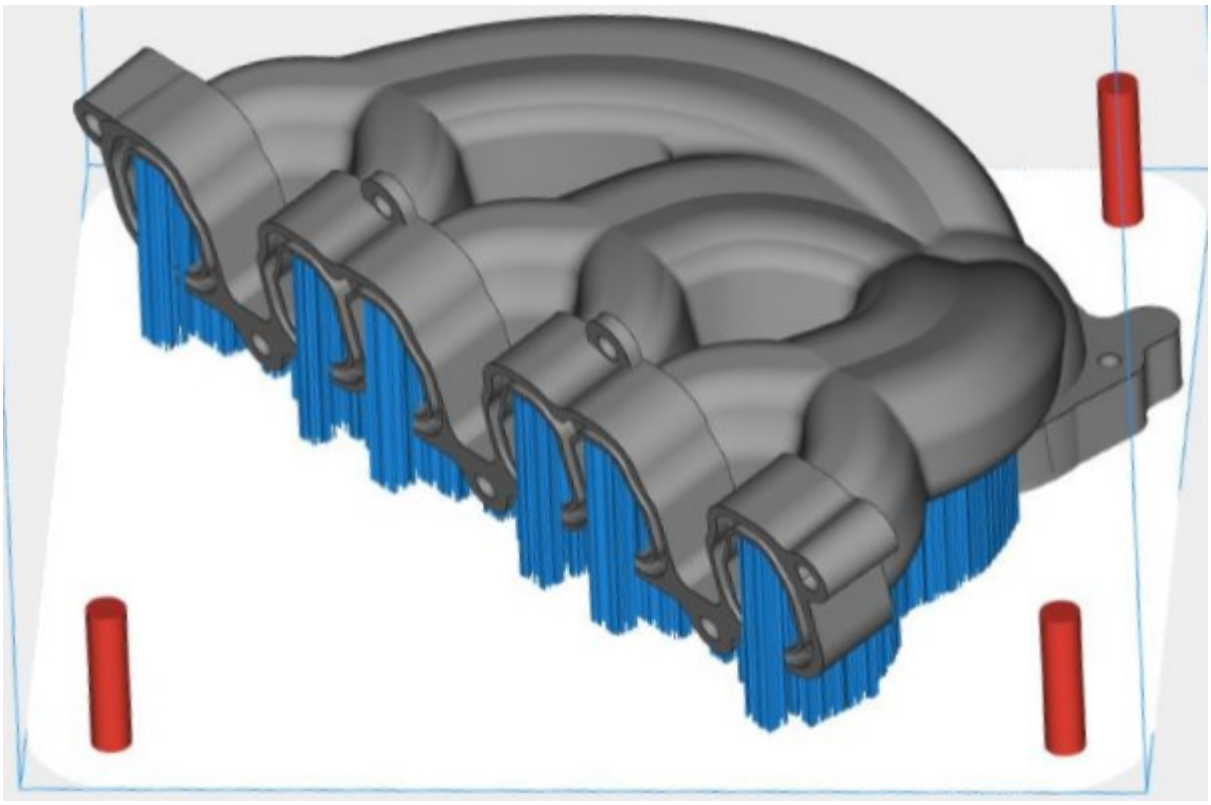


FIGURA 32 - ORIENTAZIONE E GENERAZIONE SUPPORTI RIPROGETTAZIONE 2

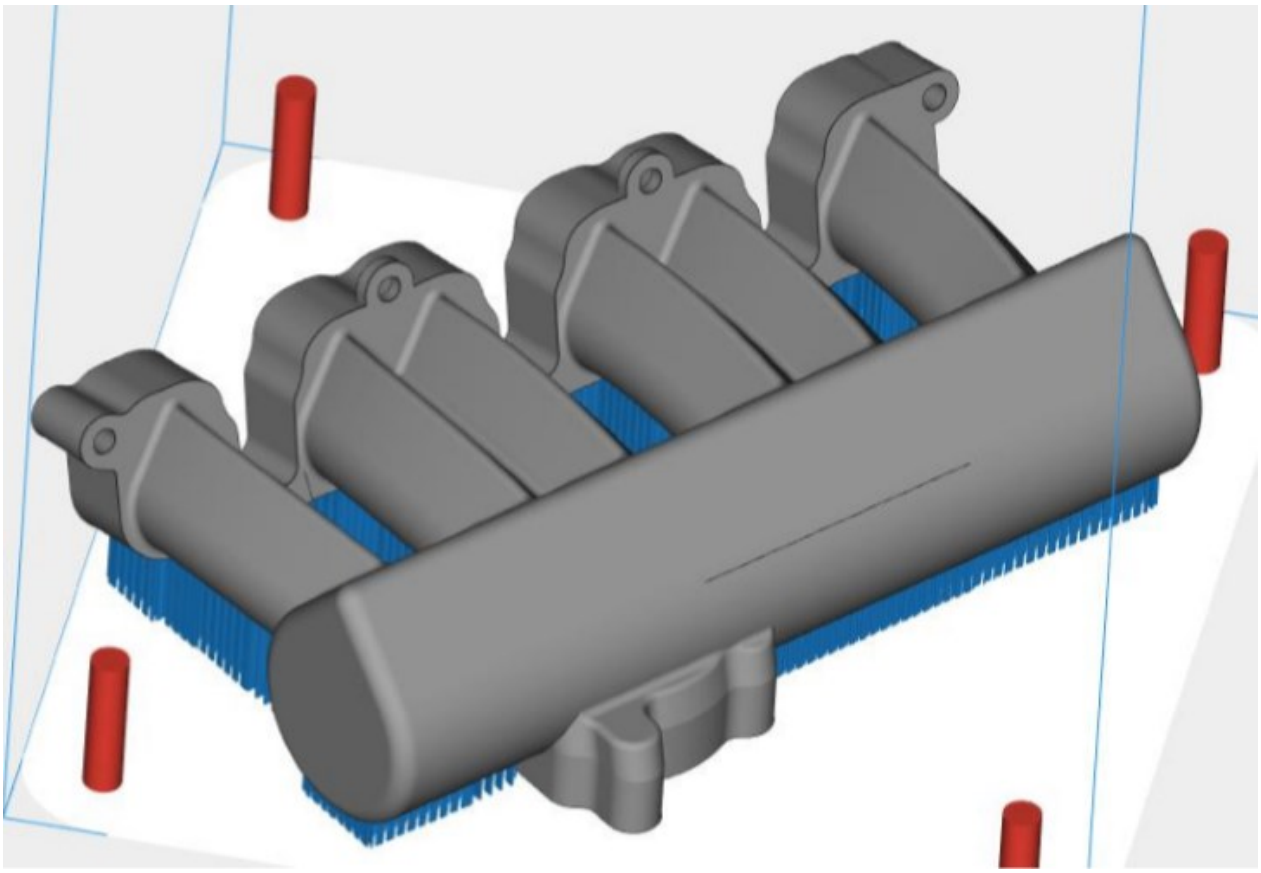


FIGURA 33 - ORIENTAZIONE E GENERAZIONE SUPPORTI RIPROGETTAZIONE 3

E' quindi possibile confrontare alcuni parametri delle varie orientazioni, considerando anche il collettore originale posto nella stessa orientazione della prima riprogettazione:

	Collettore originale	Riprogettazione 1	Riprogettazione 2	Riprogettazione 3
Volume totale dei supporti [cm3]	70,6 di cui 24,5 non rimovibili	53,1	69	74,9
Altezza massima [mm]	153,6	153,6	68,8	83,8

Tempo di costruzione [h]	75,2	63,4	50,1	38,3

Un'ulteriore validazione della geometria e dell'orientazione consiste nell'analisi sulle tensioni e distorsioni che si generano durante il processo di costruzione. Le analisi sono state effettuate dal partner ESI e sono mostrate di seguito.

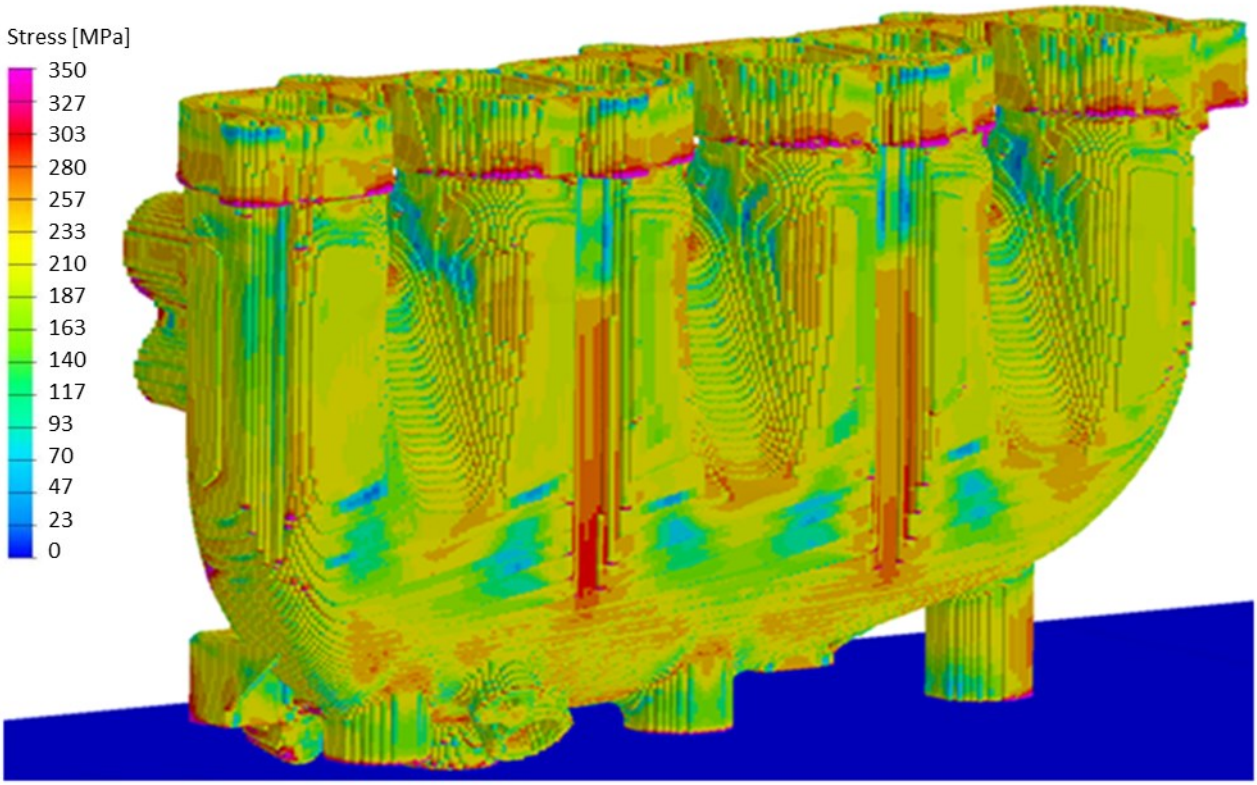


FIGURA 34 - ANALISI TENSIONI RIPROGETTAZIONE 1

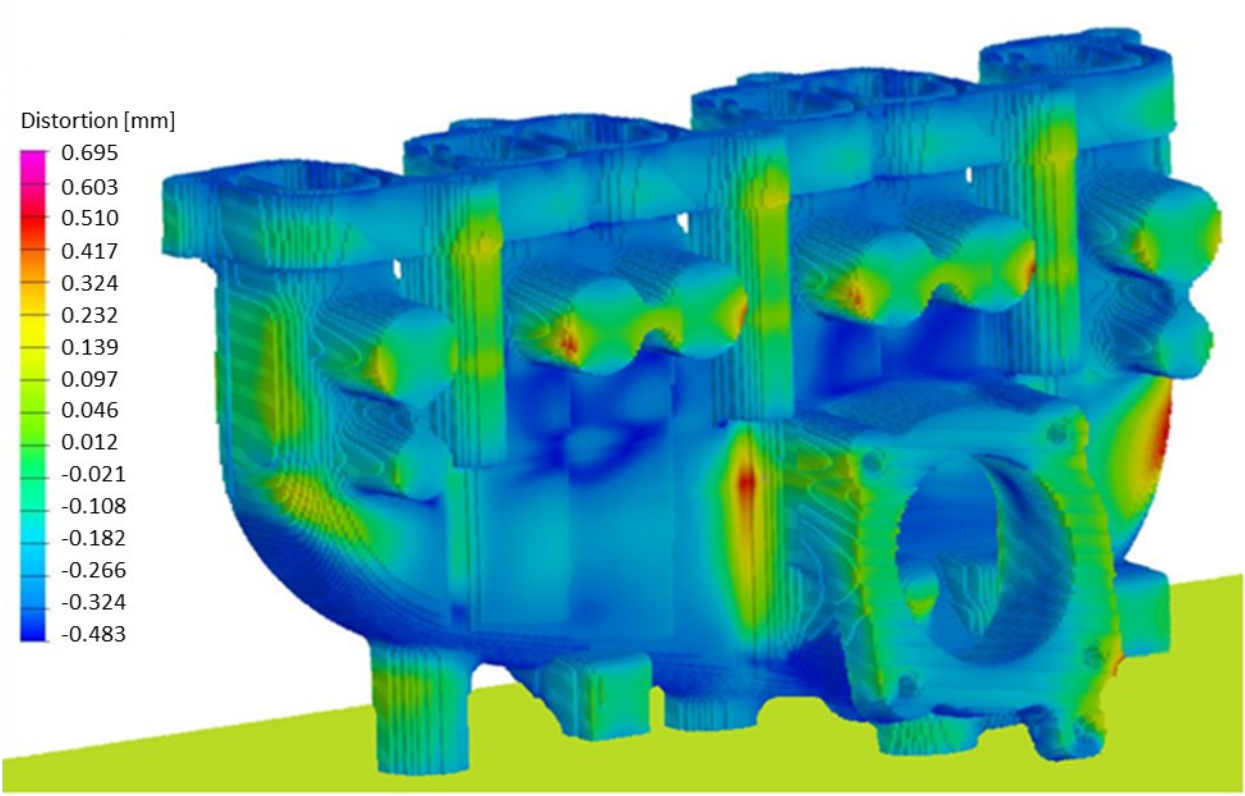


FIGURA 35 - ANALISI DEFORMAZIONI RIPROGETTAZIONE 1

La prima riprogettazione, complice la posizione verticale del collettore, presenta diverse zone con distorsioni piuttosto elevate.

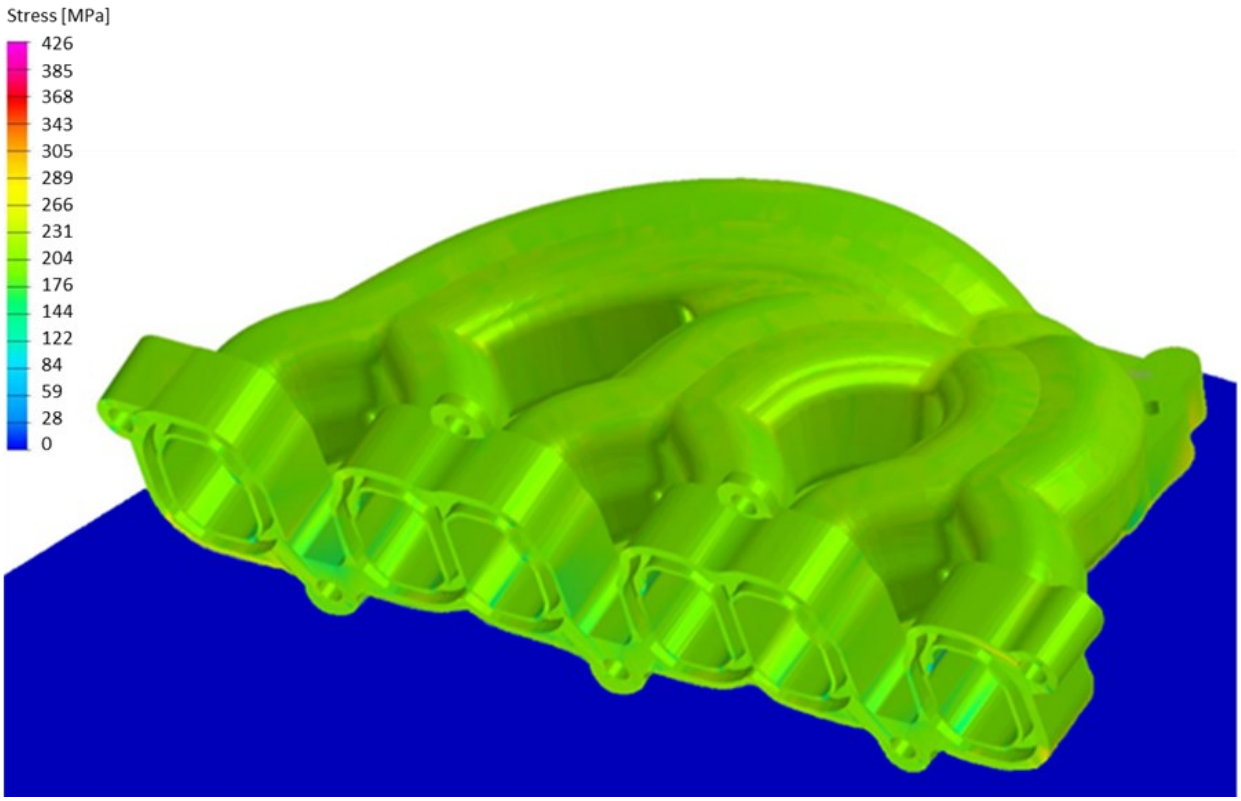


FIGURA 36 - ANALISI TENSIONI RIPROGETTAZIONE 2

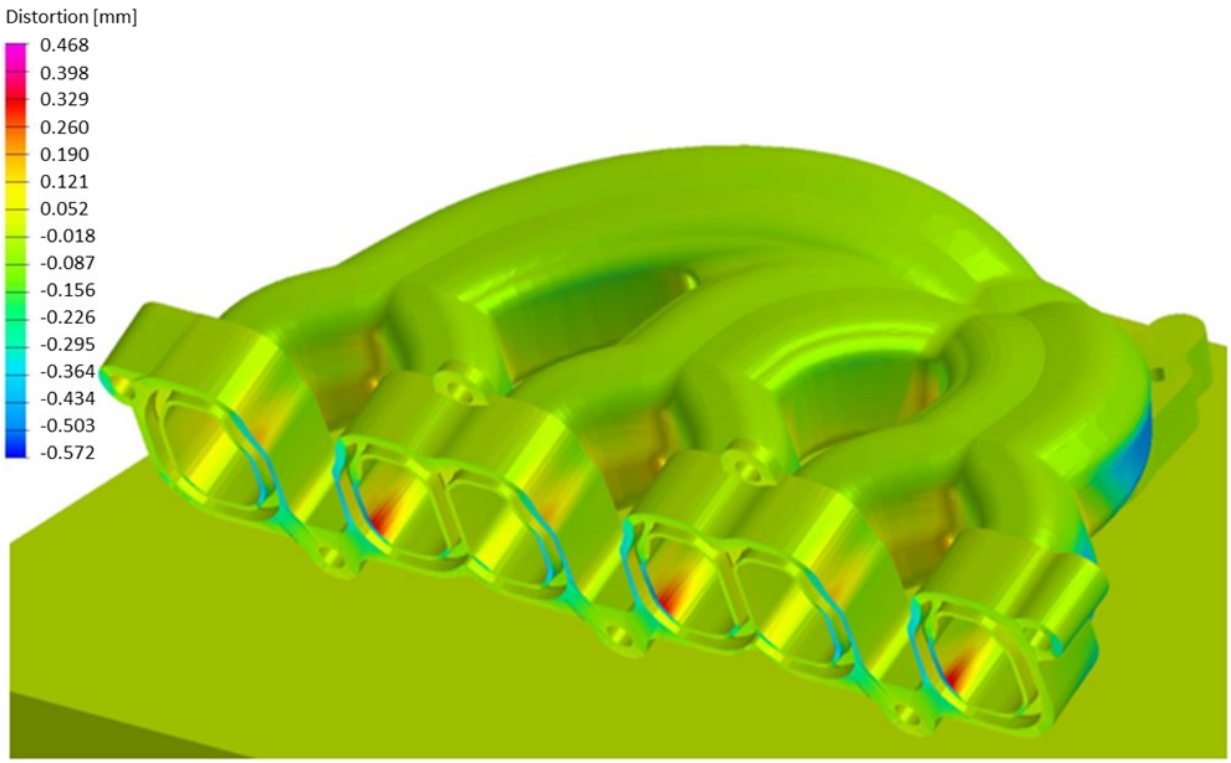


FIGURA 37 - ANALISI DEFORMAZIONI RIPROGETTAZIONE 2

Le distorsioni maggiori per la seconda riprogettazione si hanno alle sommità dei setti interni e nelle zone in corrispondenza delle sedi per le guarnizioni.

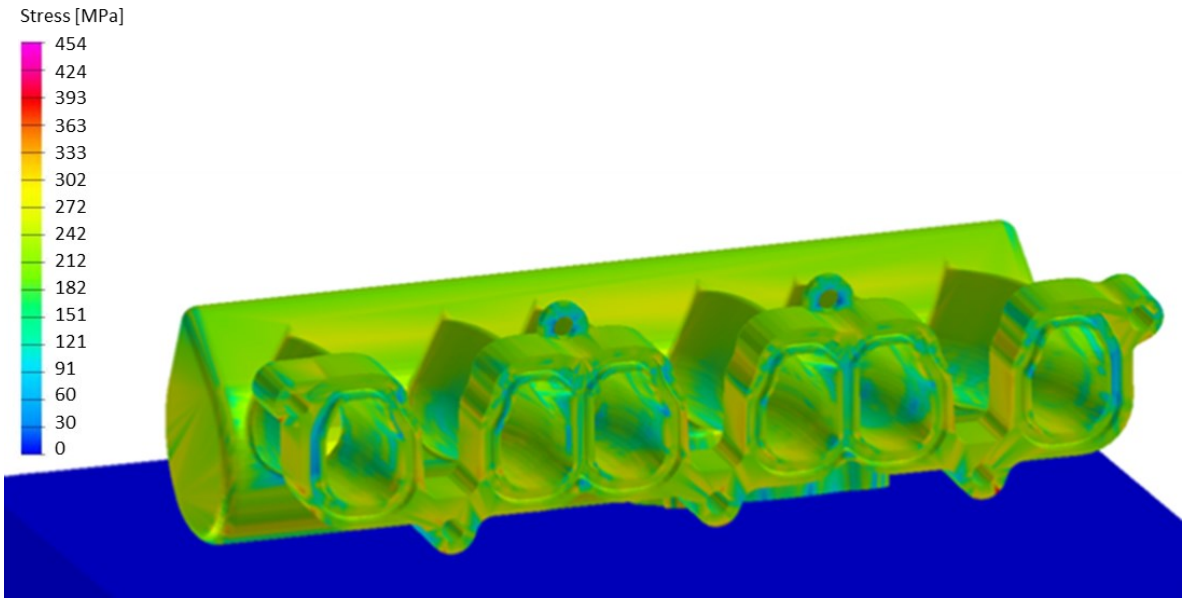


FIGURA 38 - ANALISI TENSIONI RIPROGETTAZIONE 3

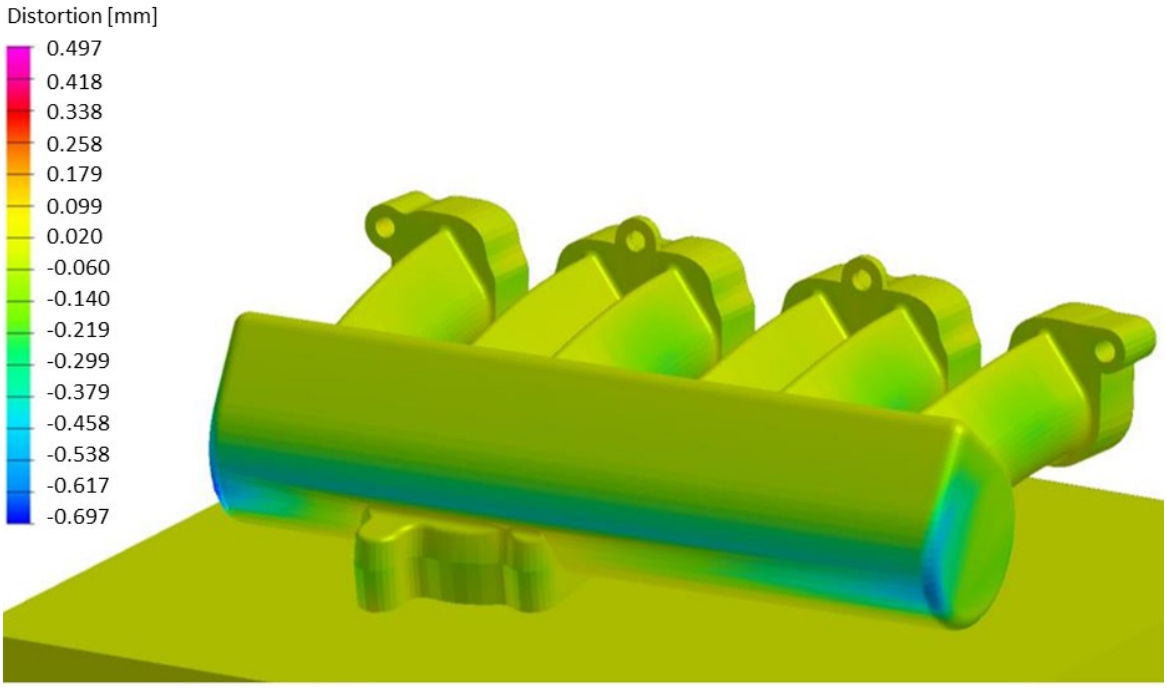


FIGURA 39 - ANALISI DEFORMAZIONI RIPROGETTAZIONE 3

Anche per la terza riprogettazione le distorsioni maggiori si hanno nella zona delle sedi per le guarnizioni.

L'ultima simulazione del pre-processing, effettuata dal partner MTC, riguarda la simulazione delle polveri intrappolate.

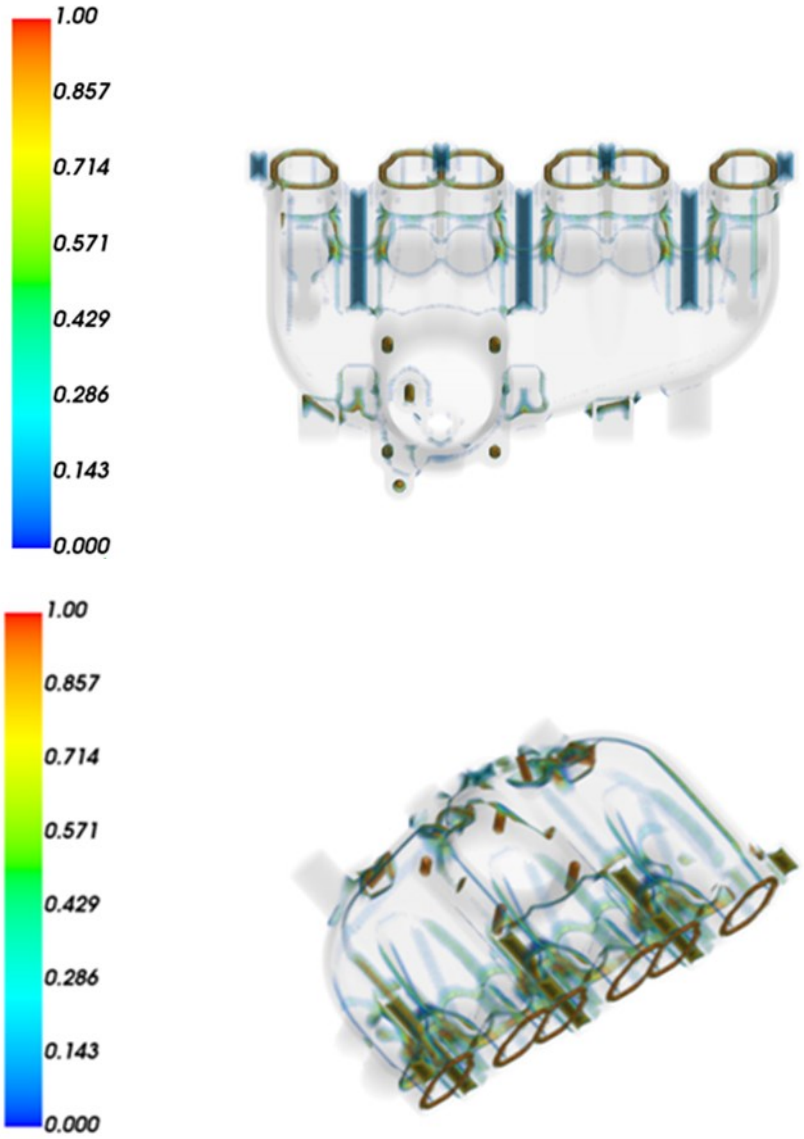


FIGURA 40 - SIMULAZIONE POLVERI INTRAPPOLATE

Analizzando il collettore originale, si può osservare come non vi siano problemi per la rimozione delle polveri dopo la produzione. Le diverse riprogettazioni presentano una situazione analoga.

4.4 Produzione del collettore

Confrontando le varie riprogettazioni in termini sia fluidodinamici che per la produzione in Fabbricazione Additiva, si può individuare quale sia la soluzione migliore. La seconda riprogettazione, al contrario delle altre due, presenta eccessive perdite di pressione. La prima riprogettazione ha un tempo di costruzione e deformazioni maggiori rispetto alla terza. Pertanto è stata scelta la geometria della terza riprogettazione per la produzione.

Come precedentemente detto, la produzione del collettore è stata effettuata dal partner Renishaw.

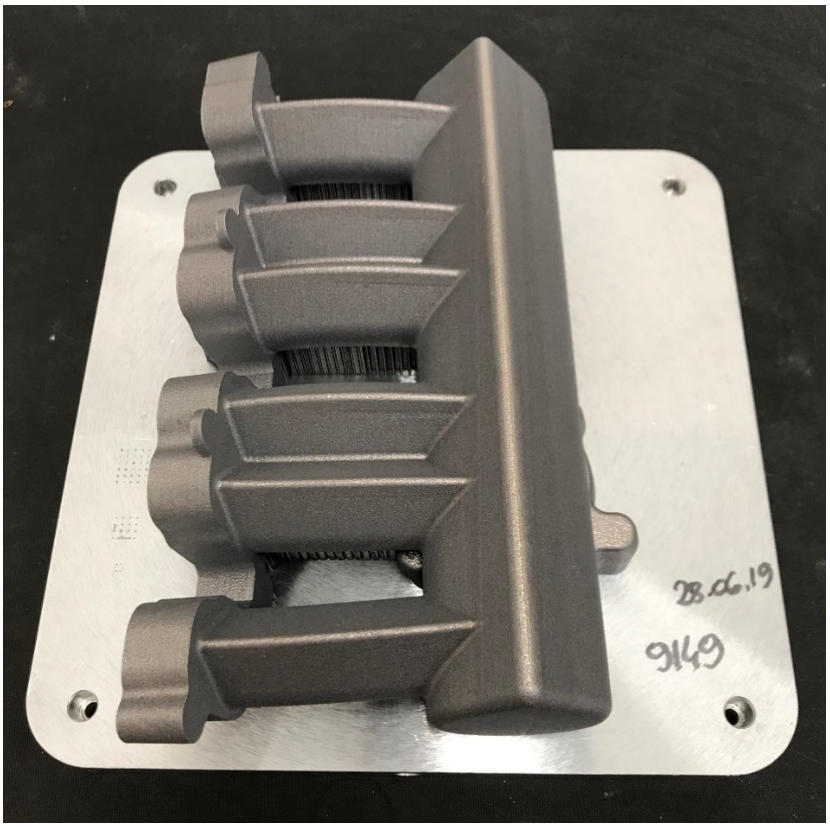


FIGURA 41 - PRODUZIONE COLLETTORE, VISTA SUPERIORE

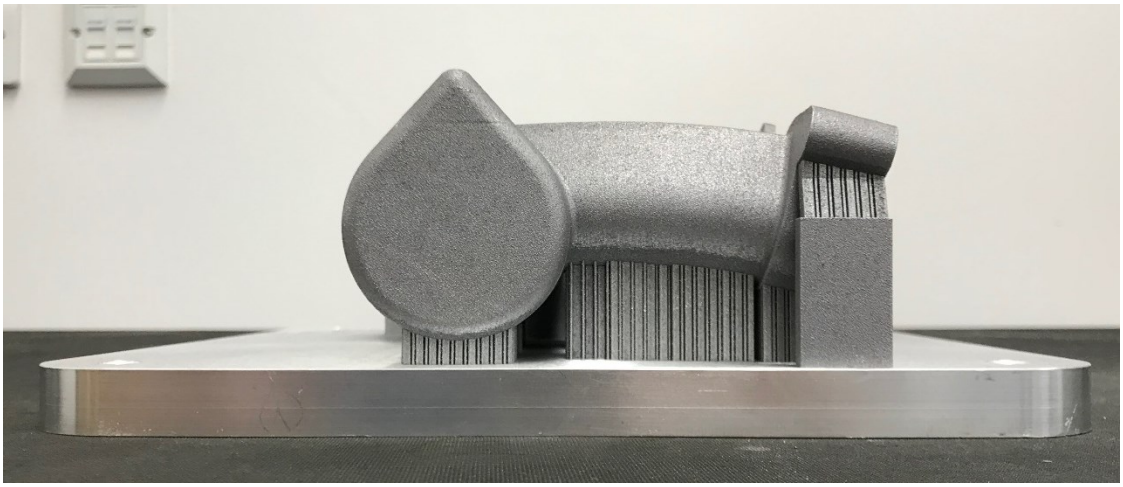


FIGURA 42 - PRODUZIONE COLLETTORE, VISTA LATERALE

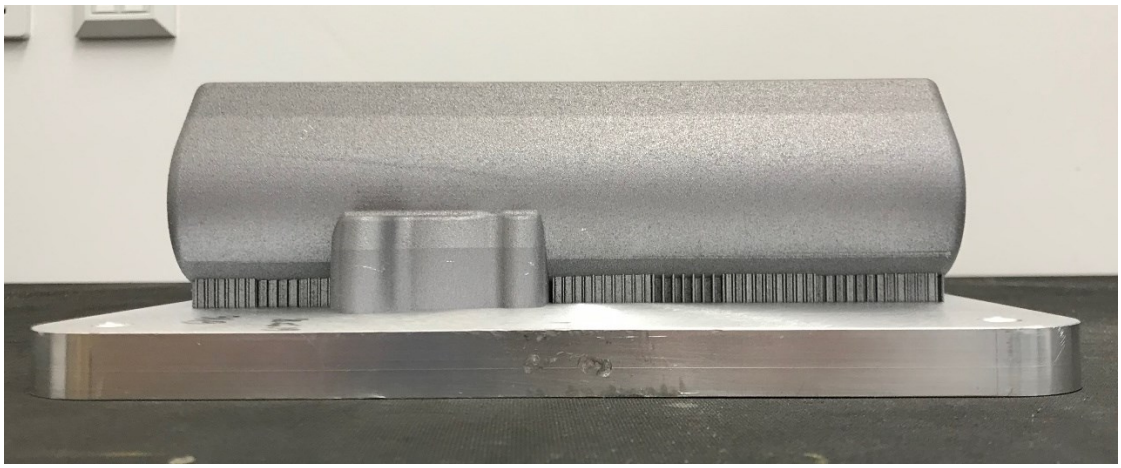


FIGURA 43 - PRODUZIONE COLLETTORE, VISTA POSTERIORE

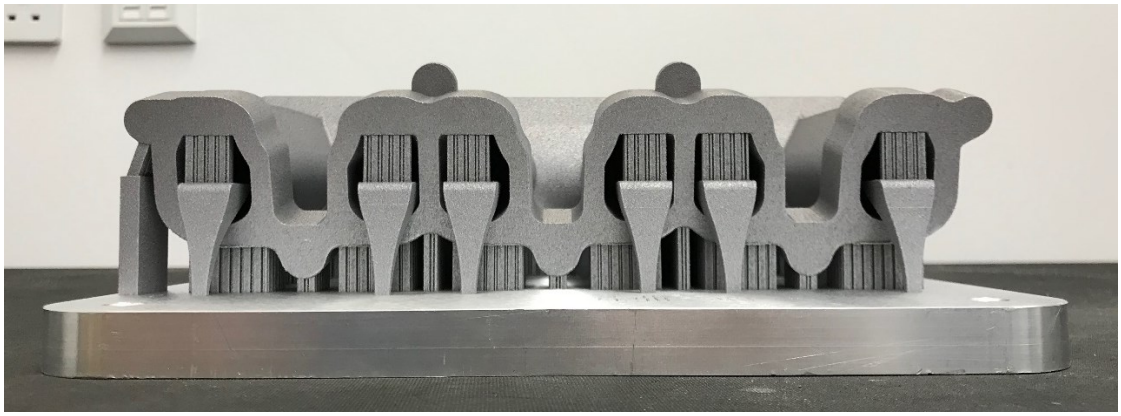


FIGURA 44 - PRODUZIONE COLLETTORE, VISTA FRONTALE

La rimozione dei supporti è avvenuta manualmente. Si è deciso di mantenere del sovrametallo nelle zone in cui si trovano le sedi delle guarnizioni poiché ritenute critiche per le possibili deformazioni in fase di produzione. Le lavorazioni post-produzione prevedono, oltre alla fresatura delle sedi, la foratura e la maschiatura per le viti di fissaggio.

5. Analisi della deposizione tramite L-DED su una matrice di trancia per stampaggio lamiera

Il ripristino di una matrice di trancia per stampaggio lamiera, caso studio del CRF per il progetto europeo *OpenHybrid*, è una lavorazione ideale per una macchina ibrida. I vantaggi che si possono ottenere sono:

- Incremento della vita utile della matrice grazie alle caratteristiche del materiale da additivare;
- Riduzione dei costi di manutenzione dello stampo;
- Aumento della produttività.

La matrice in oggetto, di dimensioni 240x92x44 mm, si usura lungo lo spigolo dove avviene la trancia e dopo circa 30000 stampate necessita di un ripristino.

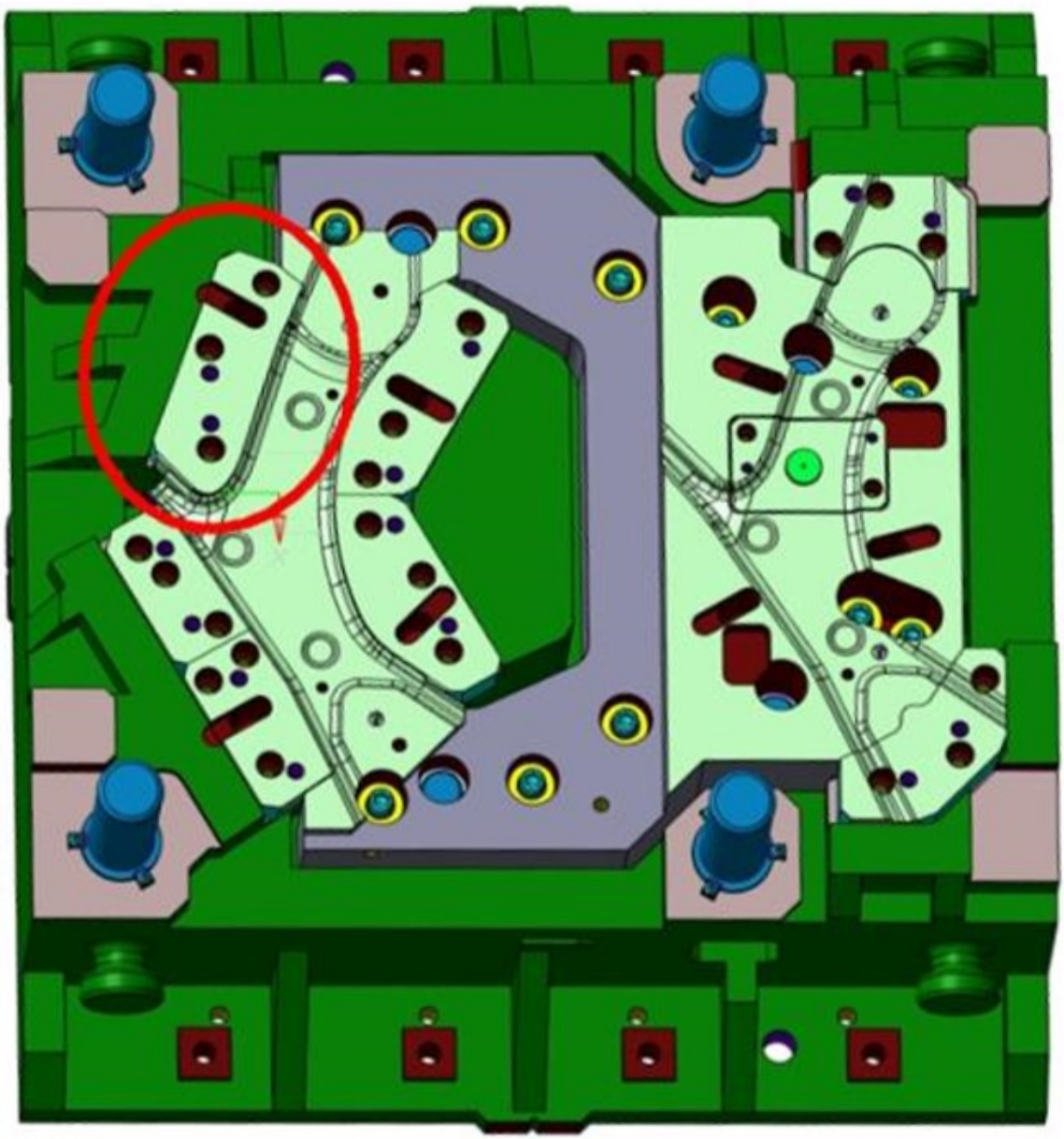


FIGURA 45 - STAMPO TRANSFER DELLA MATRICE CASO STUDIO

FIGURA 46 - MATRICE USURATA

L'operazione di manutenzione che si effettua normalmente è quella di riprendere tutta la superficie della matrice, inserendo poi uno spessore alla base per compensare la differenza di altezza causata dall'asportazione di materiale. Un'alternativa è quella di asportare solamente la zona usurata, saldare del nuovo materiale ed eseguire delle lavorazioni di finitura. Con macchinari tradizionali tale procedimento risulta più complesso e oneroso rispetto all'utilizzo di una macchina ibrida.

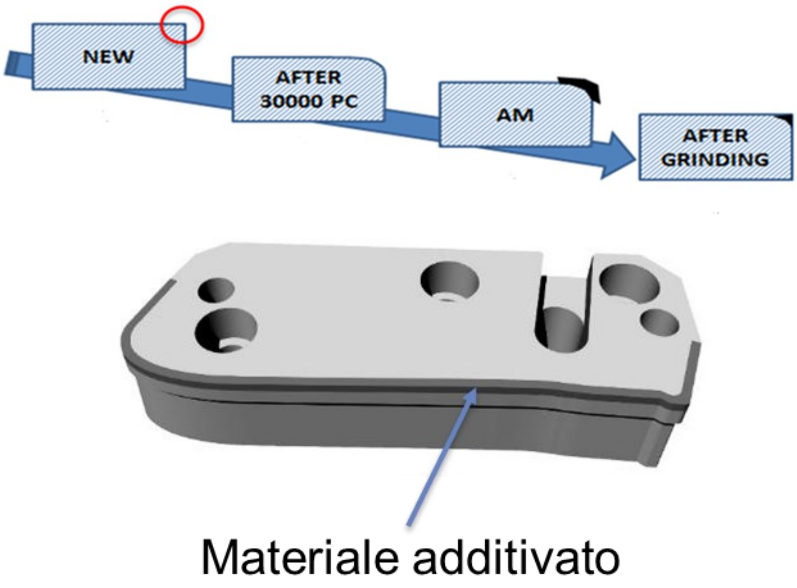


FIGURA 47 - PROCESSO DI RIPARAZIONE

Con la piattaforma ibrida del progetto *OpenHybrid* è possibile svolgere tutte le lavorazioni additive e sottrattive nello stesso ambiente di lavoro. Le parti principali sono la testa laser e quella per la scansione. La testa laser sfrutta la tecnologia L-DED, è dotata di termocoppie e si interfaccia con il sistema di alloggiamento progettato da Hybrid Manufacturing Technologies, montabile sia su macchine CNC sia su robot e in grado di supportare sia l'alimentazione con polvere che con filo.

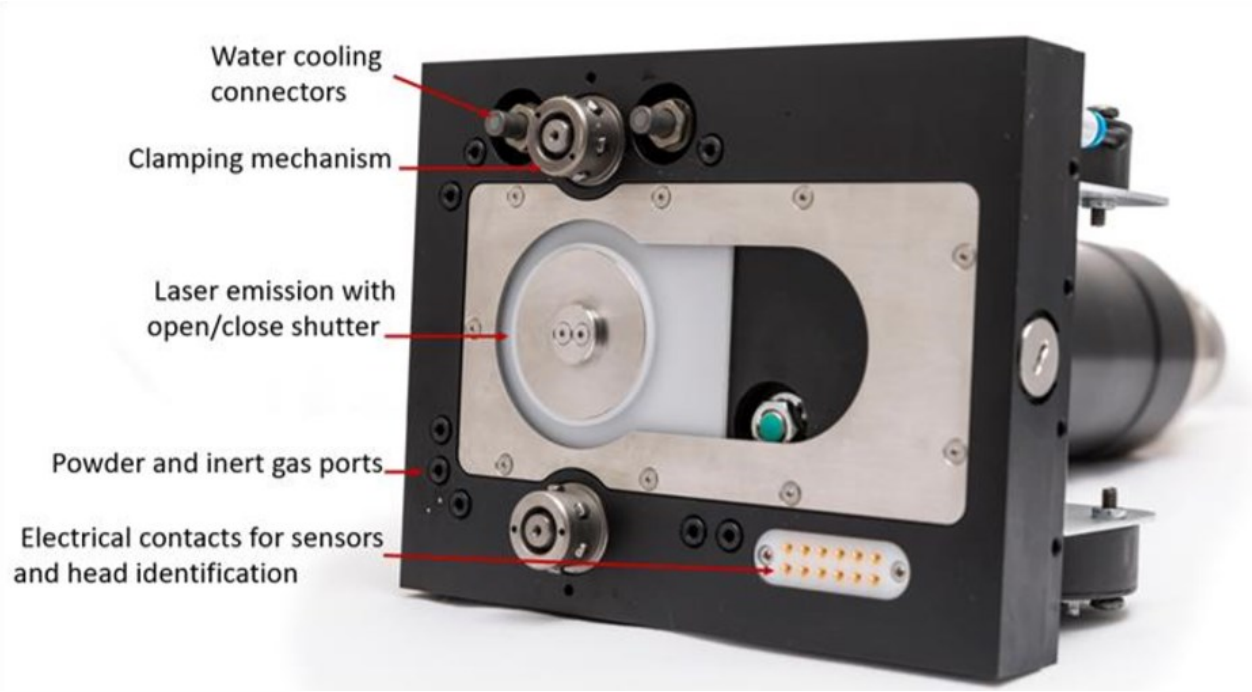


FIGURA 48 - SISTEMA DI ALLOGGIAMENTO

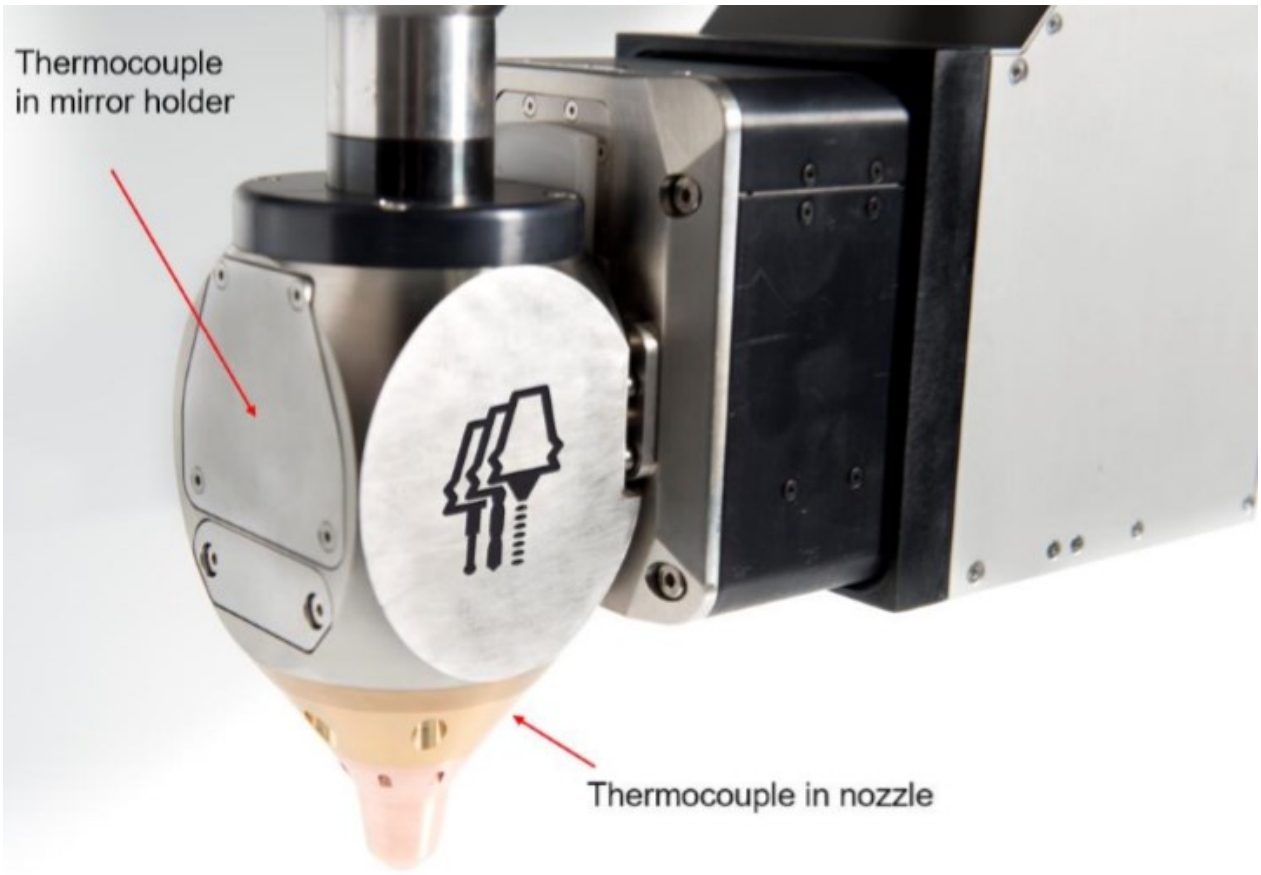


FIGURA 49 - TESTA LASER

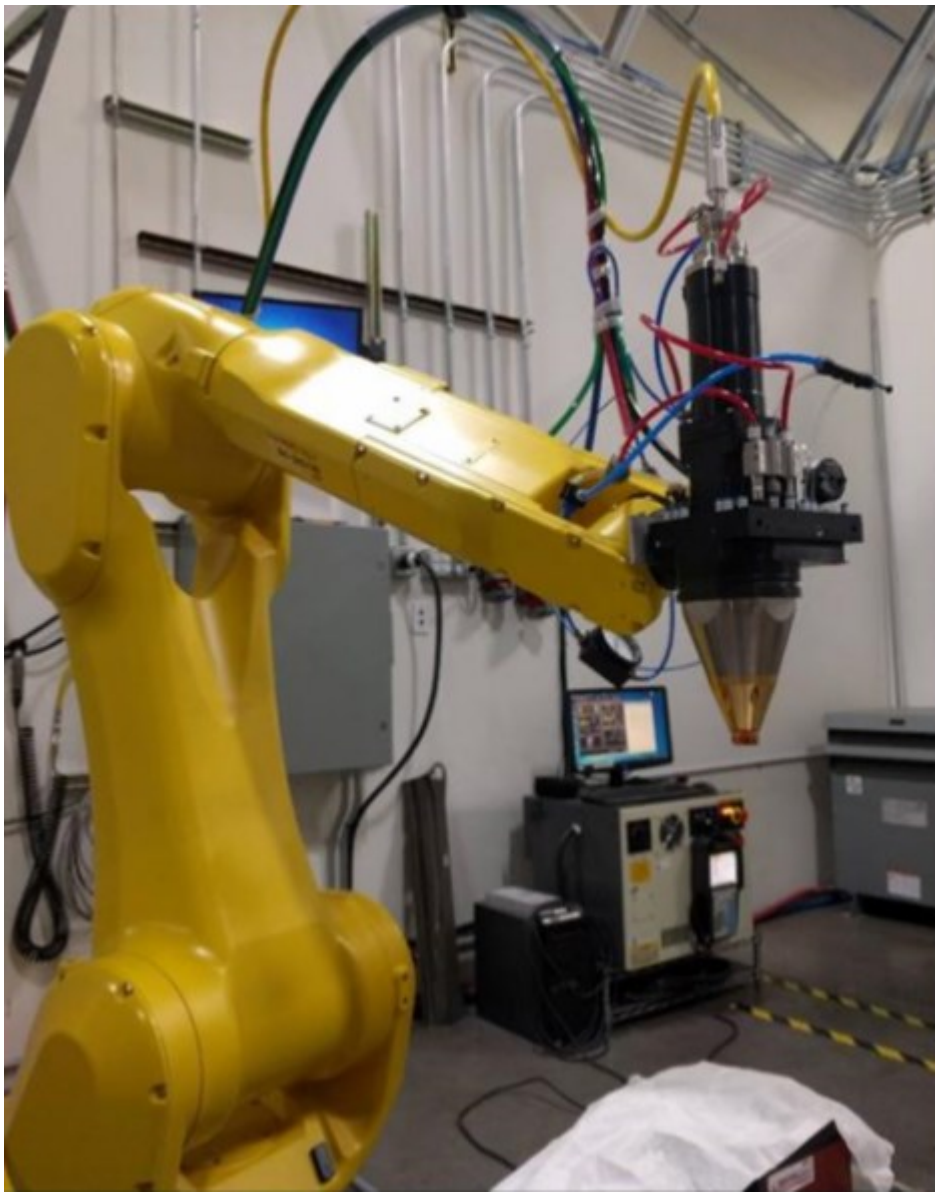


FIGURA 50 - MONTAGGIO TESTA LASER SU ROBOT

La testa per la scansione permette di definire la superficie del pezzo al fine di eseguire le successive lavorazioni e controlli. La nuvola di punti generata dalla scansione è ottenuta dalla combinazione della posizione in cui si trova il laser, data dalla macchina a controllo numerico, e

della distanza tra pezzo e laser. Per garantire che la posizione del laser e la distanza misurata da quest'ultimo vengano rilevate nello stesso istante, viene utilizzato un segnale d'attivazione sincronizzato.

FIGURA 51 - TESTA DI SCANSIONE

Come per *Encompass*, anche in *OpenHybrid* alcuni partner hanno scelto dei casi studio significativi per permettere la messa a punto e mostrare le potenzialità del progetto.

La prima questione affrontata riguardo al caso studio proposto dal CRF, una matrice di trancia di uno stampo transfer per braccio sospensione, è stata la fresatura della zona usurata. Inizialmente si è optato per una fresatura a sezione quadrata tra i 4 e i 5 mm:

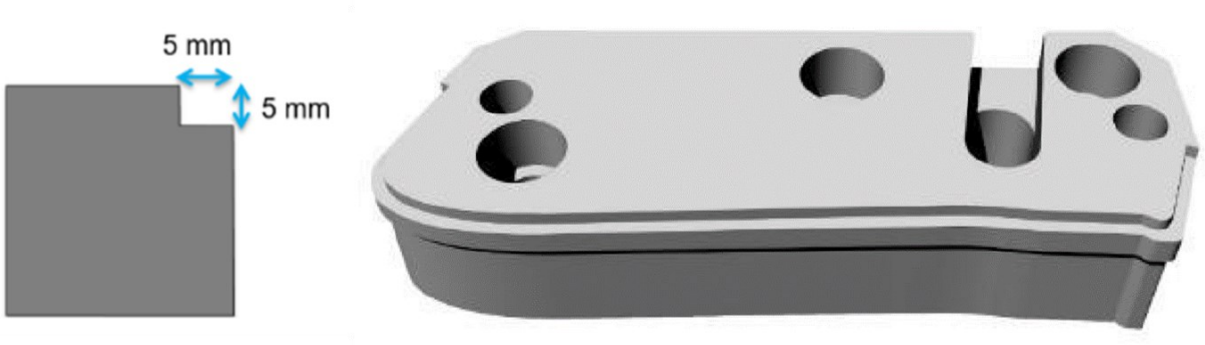


FIGURA 52 - FRESATURA A SEZIONE QUADRATA

Dopo aver analizzato la deposizione su alcuni provini, si è deciso di modificare la fresatura sfruttando il raggio di punta della fresa a due taglienti di diametro 16mm della Sandvik Coromant; tale geometria asimmetrica permette un migliore supporto per il materiale additivato.

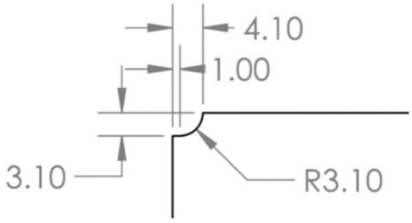


FIGURA 53 - FRESATURA ASIMMETRICA

Le prove di fresatura e di deposizione sono state effettuate su dei blocchetti di dimensioni 100x100x150 mm. Il materiale e il trattamento termico sono gli stessi della matrice: acciaio per utensili Uddeholm Sleipner temprato. La polvere da additivare mediante L-DED ha caratteristiche simili ed è commercializzata da Rovalma.

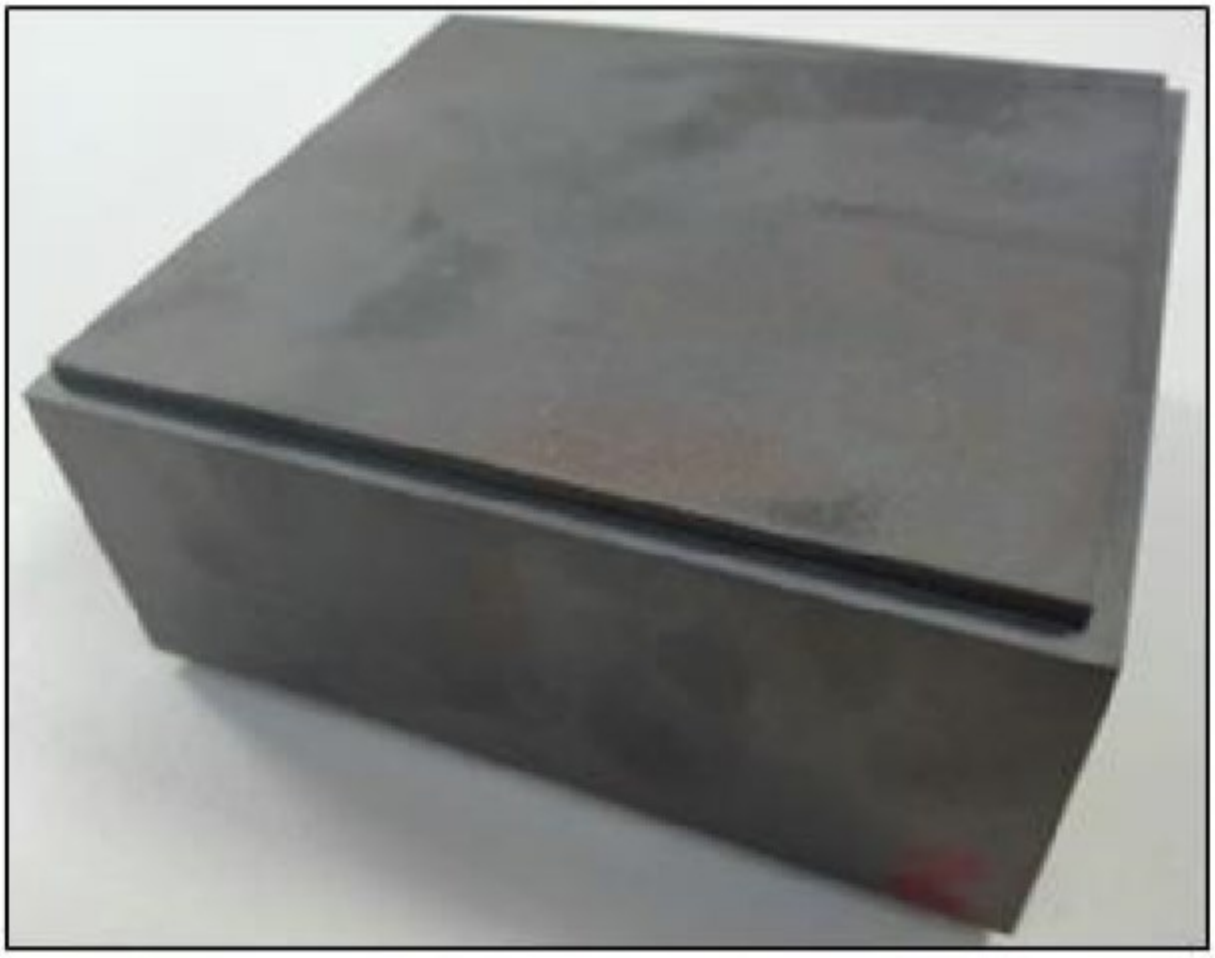


FIGURA 54 - PROVINO

Per quanto riguarda le prove di fresatura, dopo aver programmato il percorso utensile, sono state condotte misurazioni di usura della fresa al variare dei parametri di taglio.

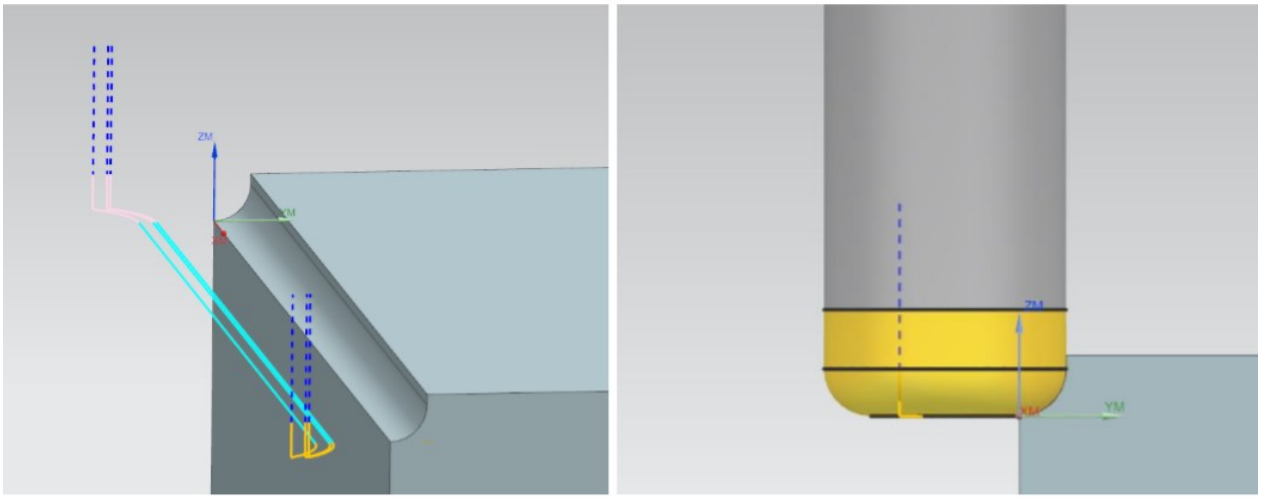


FIGURA 55 - PROGRAMMAZIONE PERCORSO UTENSILE

I diversi parametri provati rientrano nel range dei valori consigliati dal produttore del materiale e sono illustrati nella tabella sottostante. I parametri principali sono la velocità di taglio e l'avanzamento per dente; la velocità di avanzamento e del mandrino sono calcolati di conseguenza.

Test numero	Profondità di taglio [mm]	Velocità del mandrino, n [rpm]	Velocità di avanzamento, V_f [mm/min]	Velocità di taglio, V_c [m/min]	Avanzamento per dente, f_z [mm]
1	3,1	2387	573	120	0,12
2	3,1	2387	764	120	0,16
3	3,1	2387	955	120	0,20
4	3,1	2487	597	125	0,12

5	3,1	2487	796	125	0,16
6	3,1	2487	995	125	0,20
7	3,1	2586	621	130	0,12
8	3,1	2586	828	130	0,16
9	3,1	2586	1035	130	0,20

Al fine di ottimizzare il numero di provini, le fresature sono state effettuate più volte lungo uno spigolo.

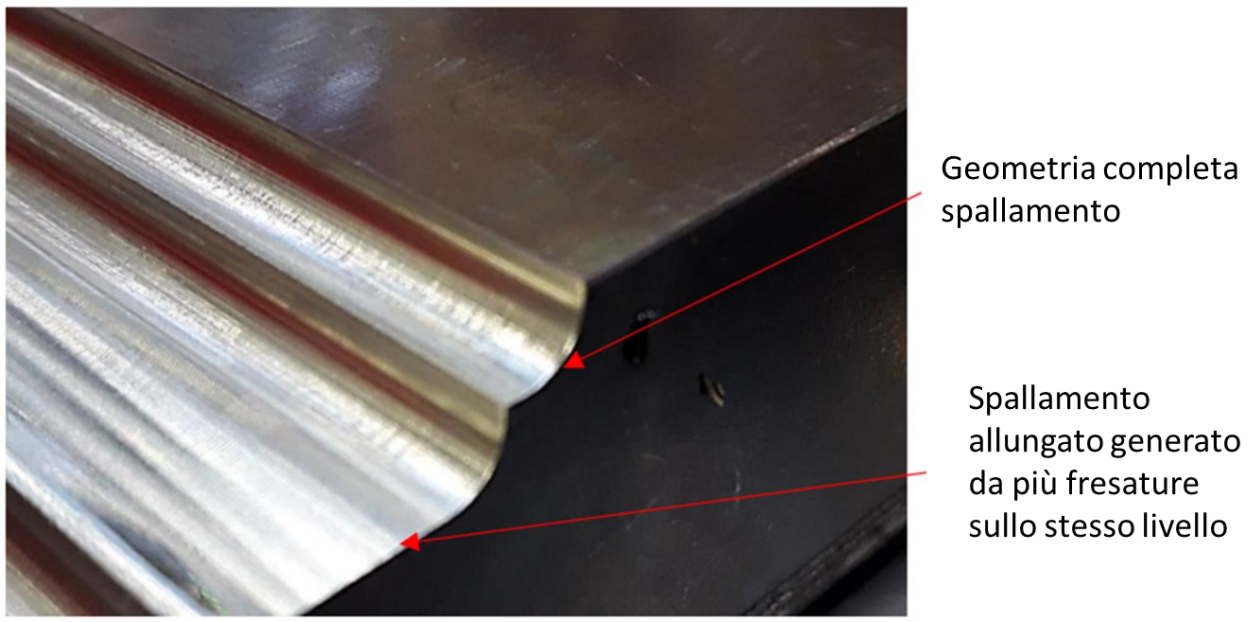
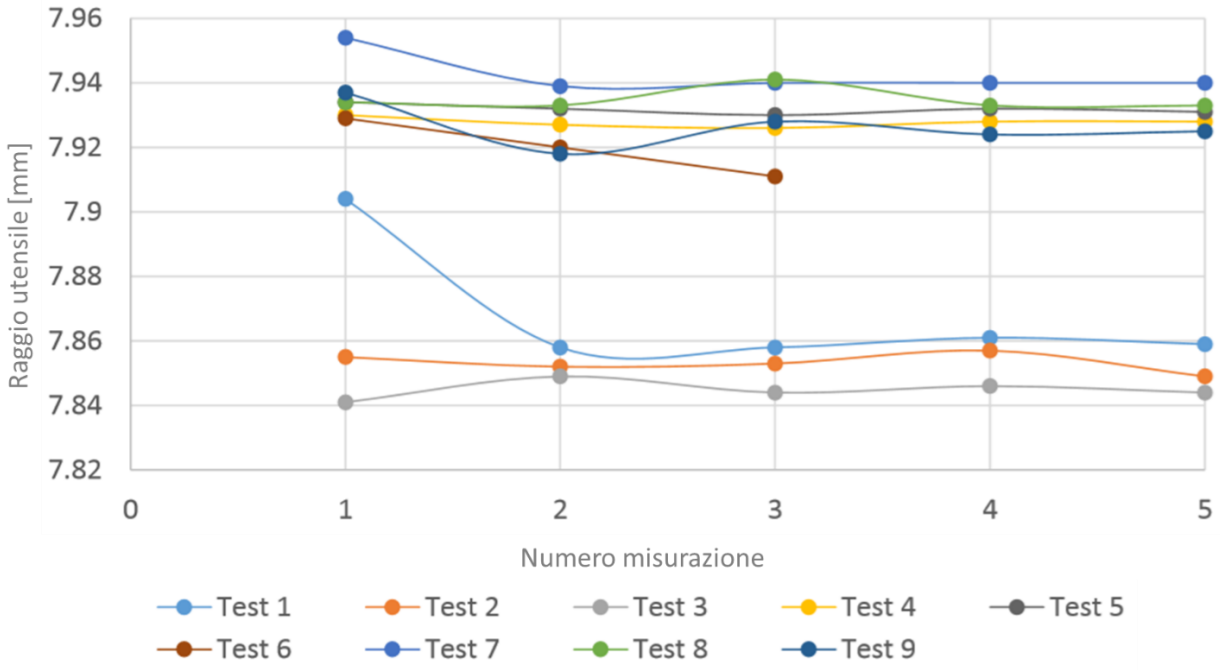


FIGURA 56 - SPALLAMENTI SU PROVINO

Per valutare l'usura dell'utensile sono stati effettuati quattro spallamenti per ogni set di parametri, misurando ogni volta il raggio della fresa.



Osservando il grafico si può osservare come la maggior parte dell'usura avvenga dopo la prima lavorazione. Le variazioni misurate rientrano nei 10 µm e in alcuni casi i valori del raggio aumentano con l'avanzare delle prove. Ciò è dovuto presumibilmente a variazioni di temperatura dell'utensile o a impurità rimaste adese durante le misurazioni. I parametri ottimali per la fresatura dello spallamento risultano essere quelli del test 8: V_c = 130 m/min e f_z = 0,16 mm.

Le prove di deposizione, effettuate da TWI, si sono concentrate sulla corretta fusione del materiale e sulla sovrapposizione degli strati. Pertanto la deposizione non è avvenuta in continuo (maggior efficienza e velocità) ma lungo vettori discreti per analizzare la fusione tra il punto di inizio e di fine di due vettori consecutivi. I diversi strati sono disposti in linea tra di loro per assicurare una migliore definizione dei bordi del pezzo.

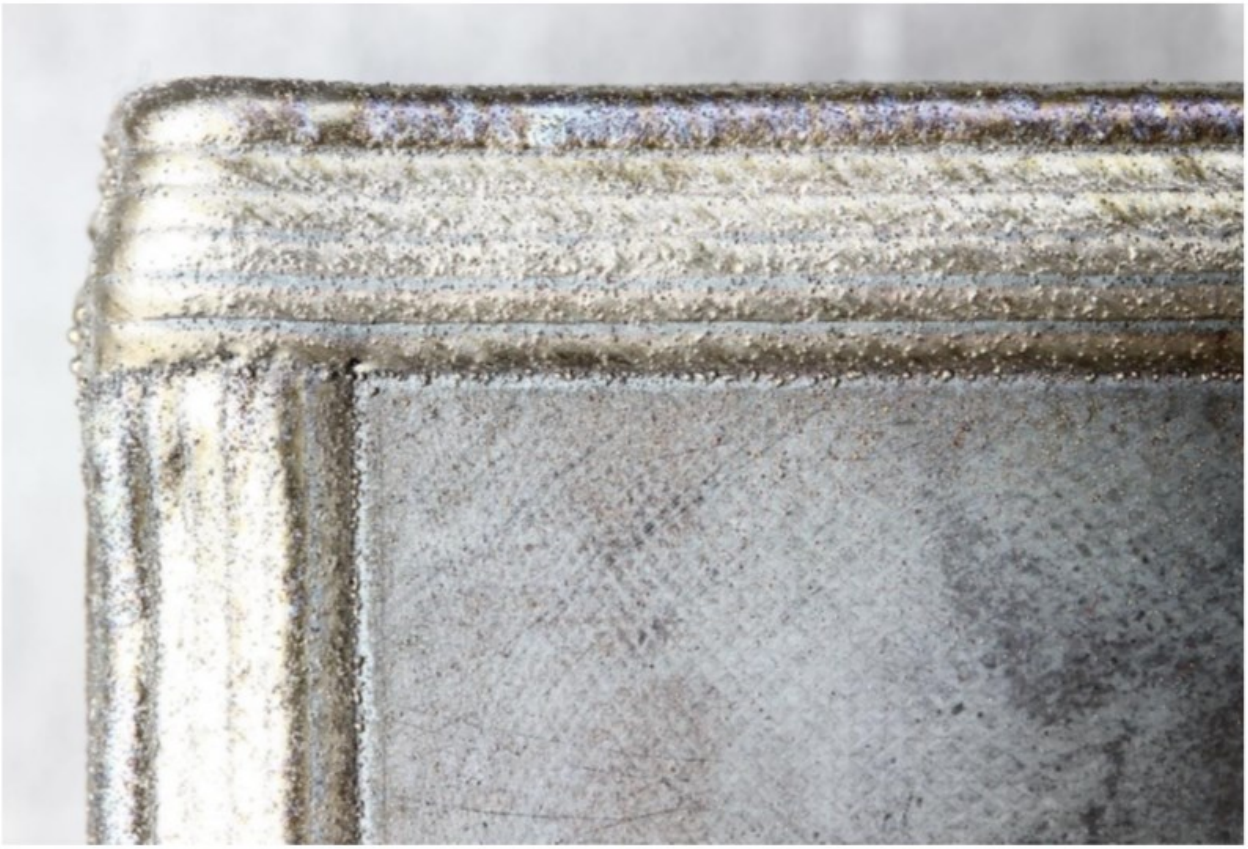


FIGURA 57 - DEPOSIZIONE, VISTA SUPERIORE

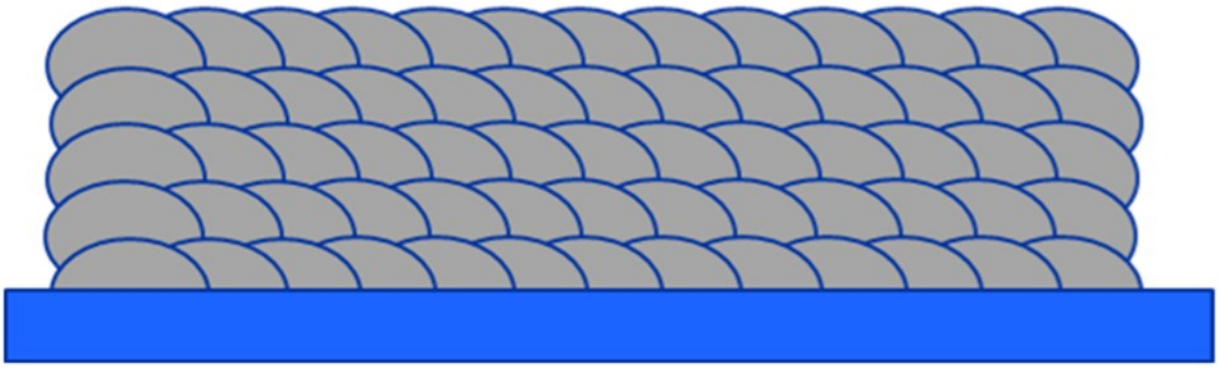


FIGURA 58 - SOVRAPPOSIZIONE STRATI DEPOSIZIONE

La testa laser è stata inclinata di un angolo di 30° per riuscire ad effettuare una corretta deposizione. Il pre-riscaldamento è dato da una piastra riscaldante.

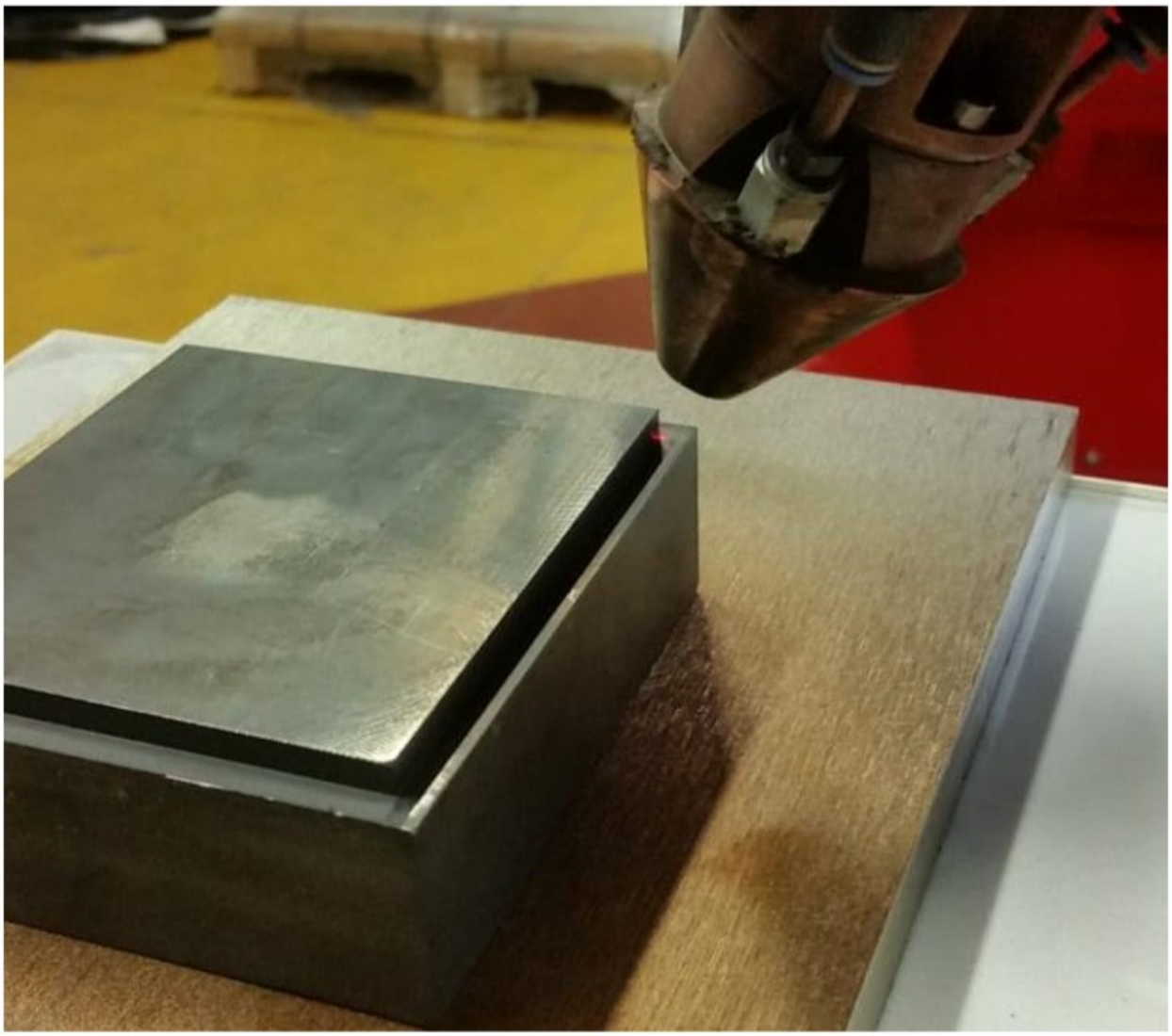


FIGURA 59 - PROCESSO DI DEPOSIZIONE

Le prove iniziali hanno mostrato che senza un adeguato controllo termico si hanno rotture del materiale depositato. Una temperatura di circa 300°C è risultata la minima per non incorrere in

rotture; anche prove a temperature più elevate (400°C) hanno dato buoni risultati. La fusione sia tra i vari strati depositati che con il provino risulta accettabile.

I parametri di deposizione ottimizzati sono i seguenti:

- Potenza del laser: 700 W;
- Densità di energia: 54 J/mm^2;
- Diametro fascio laser: 1,5 mm;
- Velocità di avanzamento: 11 m/s;
- Portata polvere: 4,5 g/min;
- Portata gas di copertura: 4 l/min;
- Portata gas polvere: 3,5 l/min;
- Distanza tra le tracce: 1 mm;
- Altezza strato: 0,4 mm;
- Temperatura pre-riscaldamento: 350°C.

Per controllare la qualità della deposizione a diverse profondità sono state effettuate tre differenti fresature.

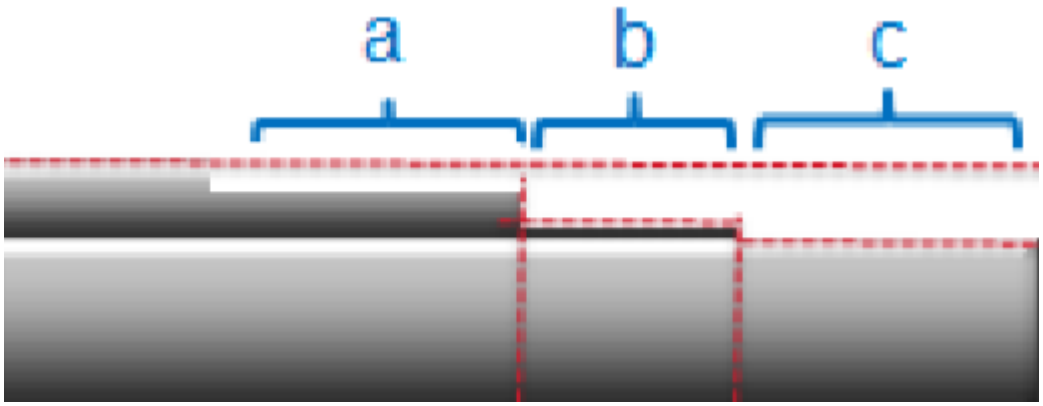


FIGURA 60 - FRESATURE A DIFFERENTI PROFONDITÀ

Tra la zona di fresatura denominata “a” e quella “b” si è osservato un difetto; trovandosi su uno spigolo fresato risulta difficile definire se sia stato causato da un problema durante la deposizione o dalla fresatura stessa.

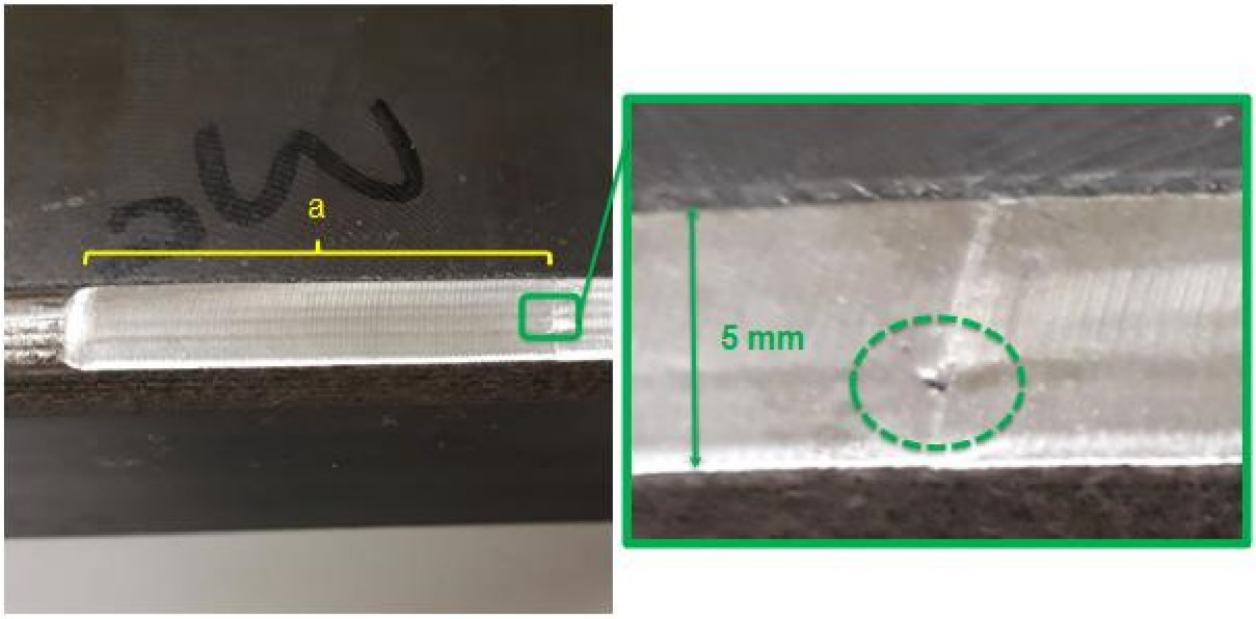


FIGURA 61 - DIFETTO SU PROVINO

La durezza del materiale additivato è stata misurata in diversi punti e si attesta intorno ai 60 HRC, la stessa che possiede il resto del provino.

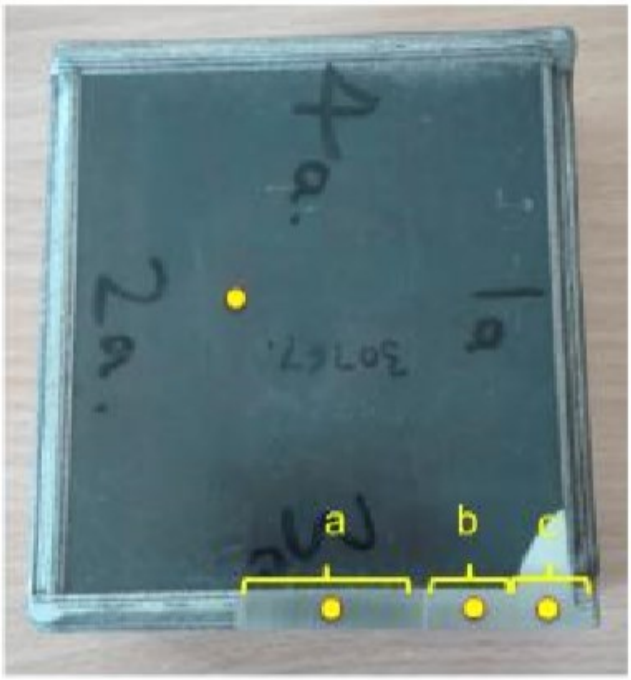


FIGURA 62 - PUNTI PROVE DI DUREZZA

Si è poi sezionato il provino e dopo averlo lucidato e trattato con il Nital, è stata eseguita un'analisi metallografica.

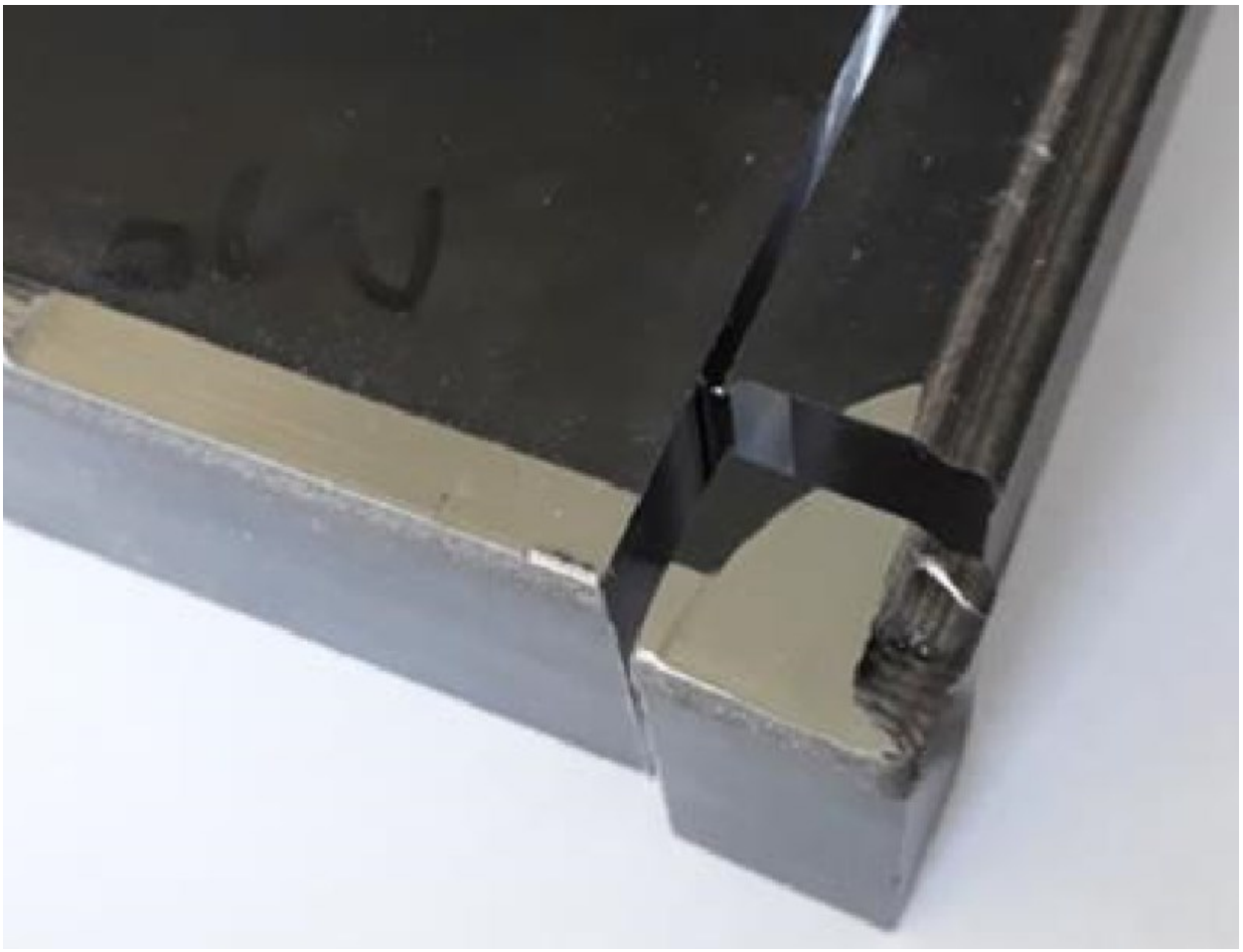


FIGURA 63 - PROVINO SEZIONATO

Dalla metallografia si sono osservati diversi pori di dimensioni variabili tra i 5 e i 50 µm con densità costante sia al centro che ai bordi della deposizione. Non risultano evidenze di problemi legati alla mancata fusione del materiale.

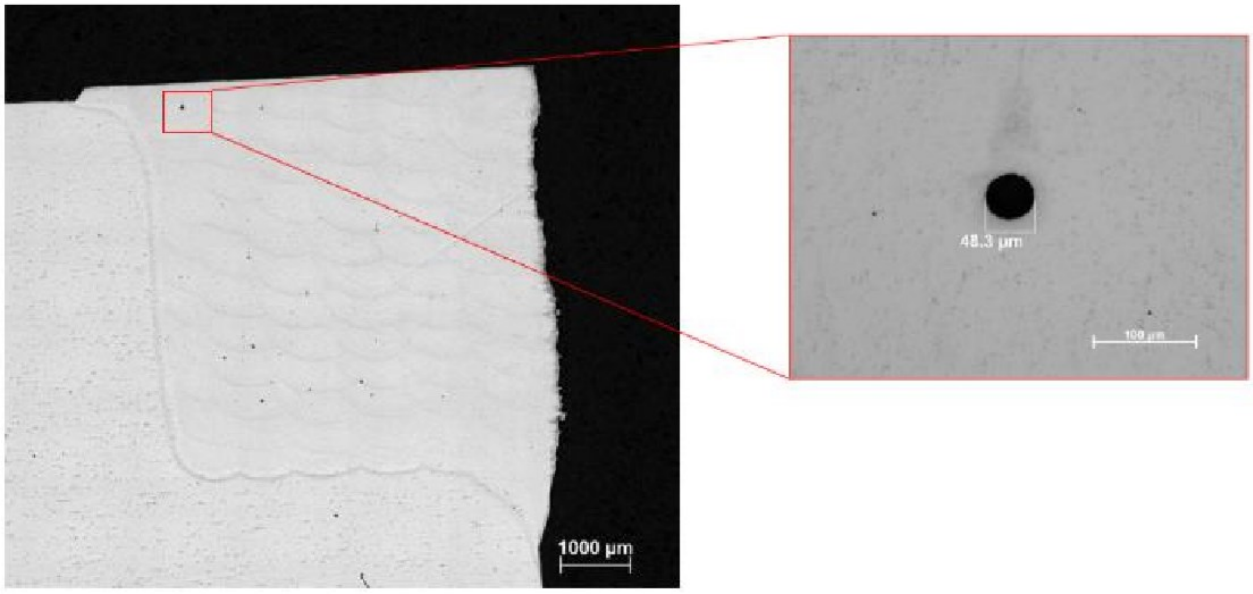


FIGURA 64 - ANALISI METALLOGRAFICA

Successivamente è stata analizzata la fresatura della parte additivata. Sono state effettuate una fresatura di sgrossatura e poi una di finitura, sia sulla faccia superiore che lateralmente. La sgrossatura è stata fatta a 0,3 mm di distanza dalle facce del provino. La fresa utilizzata ha le stesse specifiche di quella usata per gli spallamenti eccetto per il raggio al vertice che passa da 3,1 a 0,8 mm.

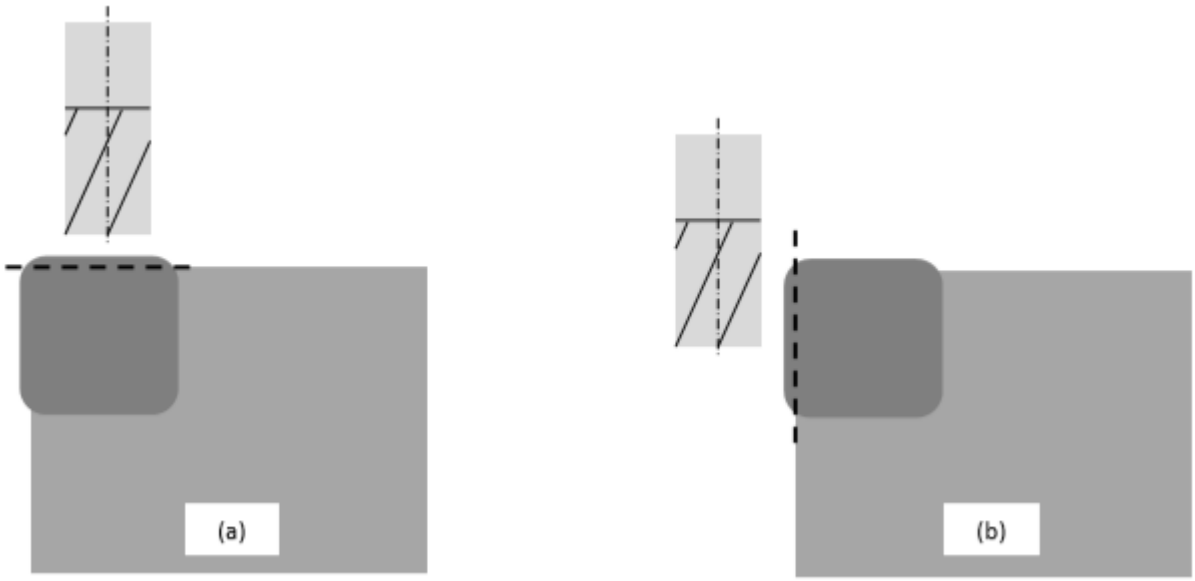
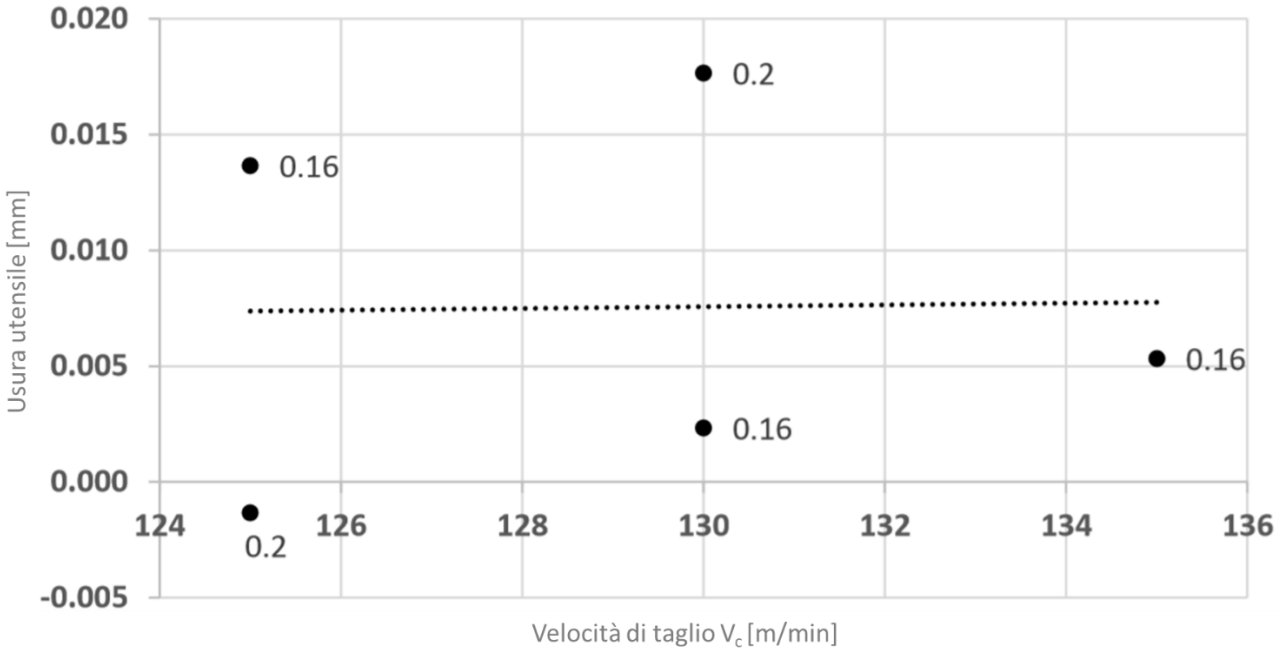
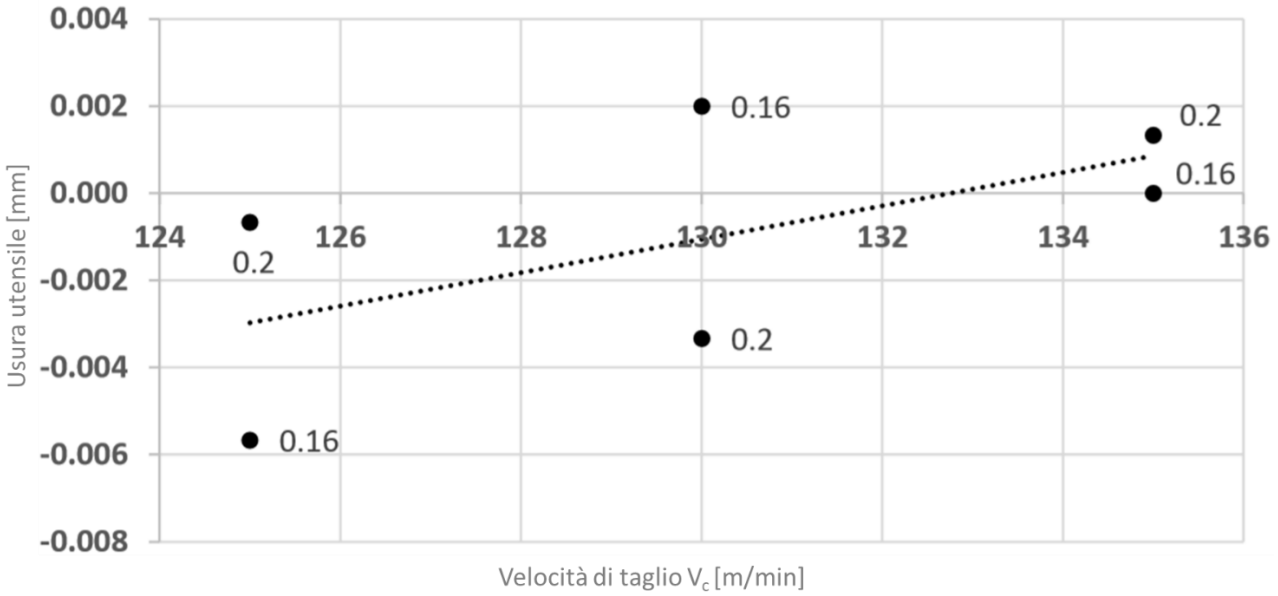


FIGURA 65 - FRESATURA SU SUPERFICIE SUPERIORE (A) E LATERALE (B)

I parametri ottimali di sgrossatura sono stati ottenuti misurando l'usura dell'utensile in funzione della velocità di taglio V_c e dell'avanzamento per dente f_z.

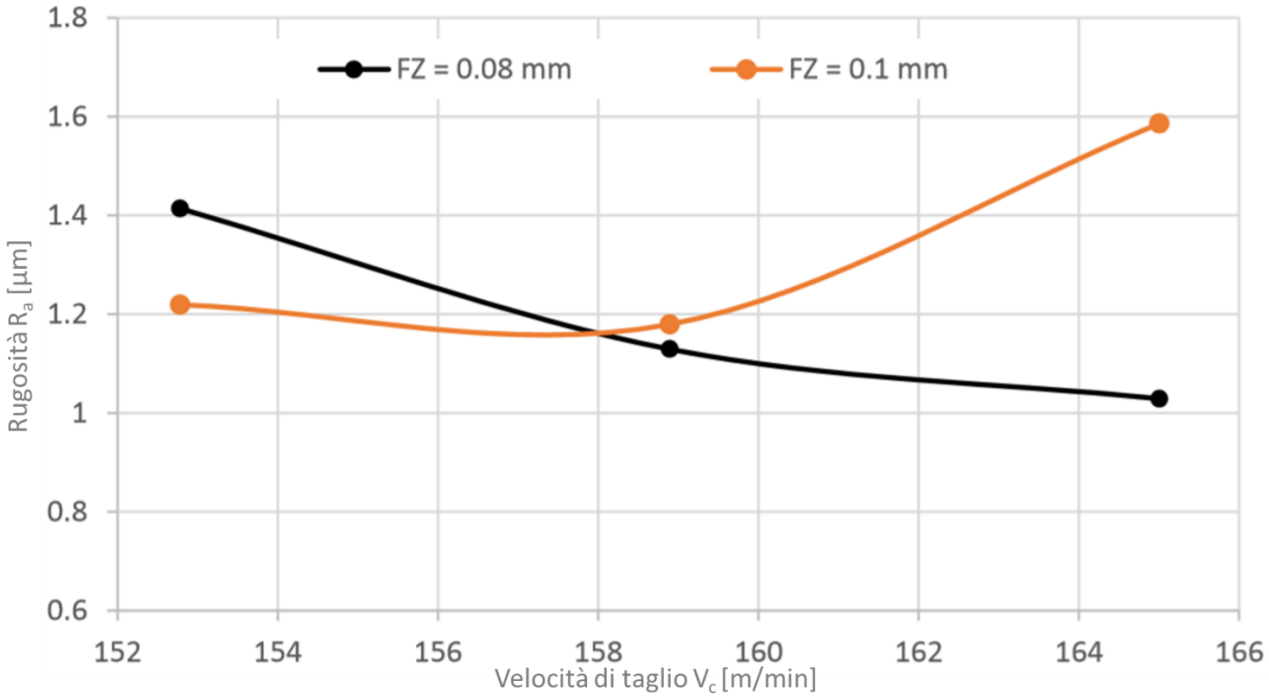


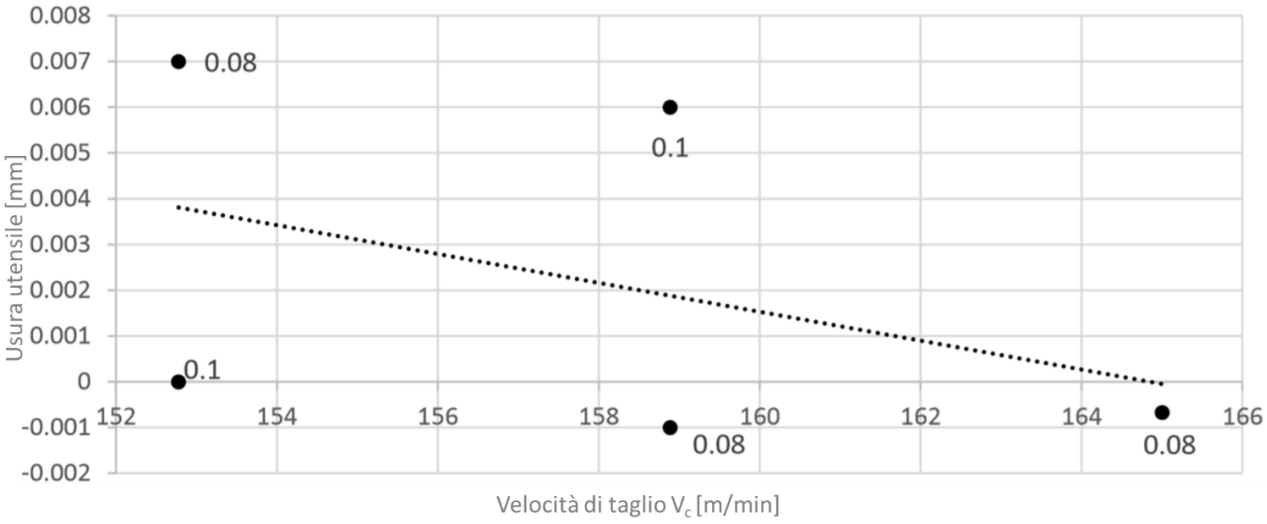


I valori di usura dell'utensile per la fresatura della faccia superiore sono più elevati di quelli della faccia laterale. La differenza di avanzamento per dente ha un effetto maggiore per la faccia

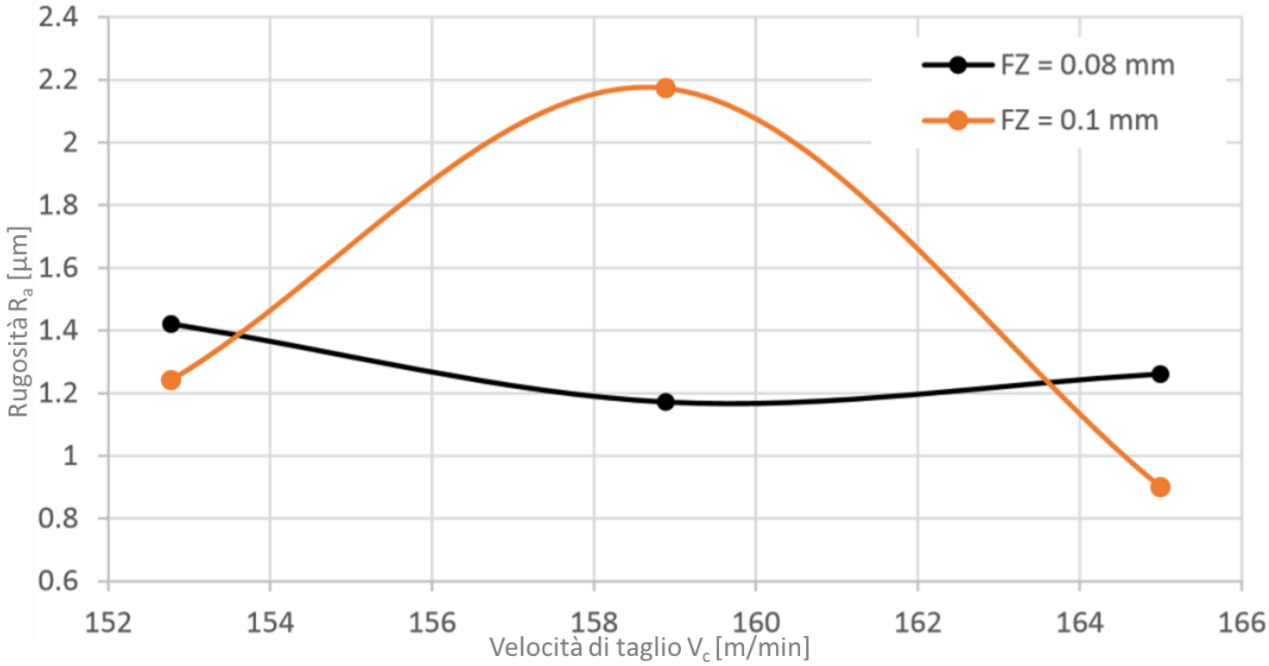
superiore rispetto a quella laterale. Entrambi questi risultati dipendono dalla diversa area di taglio dell'utensile: in un caso l'area è ridotta al vertice della fresa, nell'altro viene sfruttata una maggiore porzione della superficie di taglio. Come si evidenzia dai grafici, i valori ottimali per la fresatura di sgrossatura della faccia superiore sono V_c = 125 m/min, f_z = 0,2 mm; per quella laterale V_c = 125 m/min, f_z = 0,16 mm.

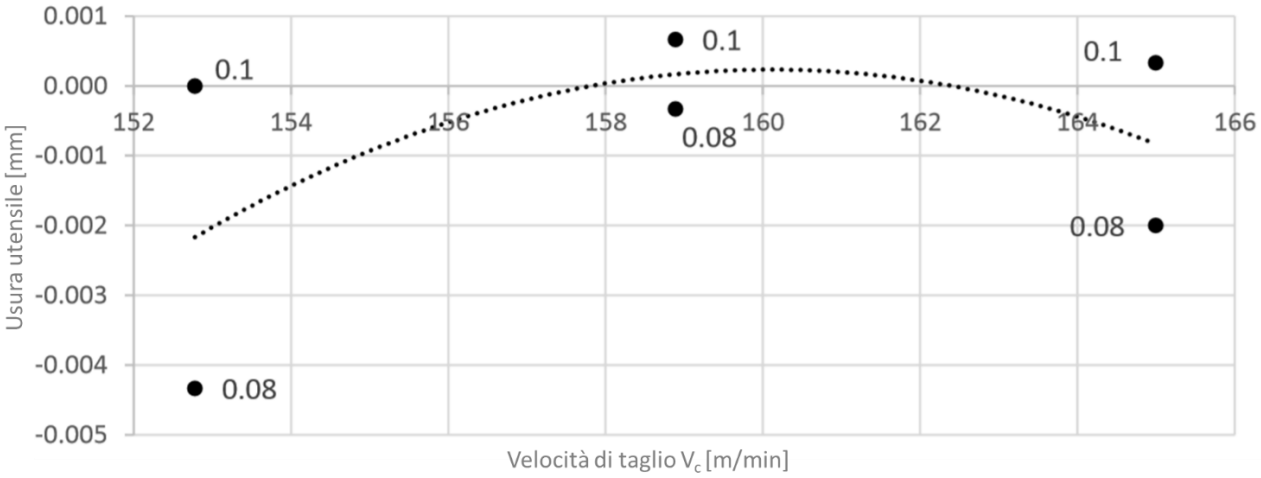
Per quanto riguarda la fresatura di finitura, oltre all'usura dell'utensile è stata considerata anche la rugosità superficiale.





Comparando i due grafici relativi alla faccia superiore, si può osservare come diminuendo l'avanzamento per dente a 0,08 mm e aumentando il numero di giri migliorino sia la rugosità sia l'usura dell'utensile.





Per la fresatura laterale la miglior rugosità si ha con un avanzamento per dente di 0,08 mm e una velocità di taglio di 159 m/min. L'usura è talmente bassa che i valori misurati risultano essere altamente affetti da disturbi esterni come impurità o variazioni di temperatura. Si noti come siano raggiungibili valori di rugosità di circa 1 µm senza la necessità di ulteriori lavorazioni.

6. Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha permesso l'approfondimento del processo di Fabbricazione Additiva metallica grazie alla partecipazione a due progetti di ricerca europei.

Per il progetto denominato EnCompass è stata effettuata una riprogettazione al fine di testare un applicativo software (IDDS) che possa migliorare i processi additivi basati su letto di polvere. A seguito della riprogettazione descritta in questa tesi, eseguita in maniera "tradizionale" per comprenderne le criticità e fornire una banca dati per l'implementazione del software, si è conclusa la programmazione dell'IDDS e sono state effettuate delle prove con il suo utilizzo.

Per il progetto OpenHybrid è stata analizzata la deposizione mediante L-DED e le relative lavorazioni sottrattive su provini di una matrice di trancia per mettere a punto i diversi componenti del sistema ibrido, quali la testa laser, di scansione e la piattaforma di interfaccia. L'ulteriore prova effettuata è stata la riparazione della matrice di trancia con il sistema ibrido di OpenHybrid e la prova di stampaggio della stessa.

Una delle principali sfide affrontate durante questo lavoro è stata dimostrare l'applicabilità delle tecnologie additive al settore automobilistico. Infatti, mentre nel campo biomedicale ed aerospaziale le tecnologie additive hanno cominciato a diffondersi molto rapidamente, trovando riscontro in numerosi casi applicativi, nell'automotive il loro sviluppo risulta essere ancora agli esordi, complici il livello di competizione sui costi e il volume di produzione superiori ad altri settori di mercato. Nei prossimi anni l'ulteriore sviluppo di queste tecnologie in termini di materiali, rapidità del processo e riduzione dei costi favoriranno l'assunzione della tecnologia da parte di altri settori industriali, fornendo un nuovo valido strumento con il quale realizzare prodotti ad alto valore aggiunto.

7. Bibliografia e sitografia

1. ASTM (2010) F2792-10e1, *Standard terminology for additive manufacturing technologies*, ASTM International.
2. Iuliano L., Dispense per il corso *Produzione assistita dal calcolatore*, Politecnico di Torino.
3. Milewski John O., *Additive Manufacturing of Metals. From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*, Springer, 2017.
4. Yang L., Hsu K., Baughman B., Godfrey D., Medina F., Menon M., Wiener S., *Additive Manufacturing of Metals: The technology, Materials, Design and Production*, Springer, 2017.
5. Fino P., *Metal powders for AM processes*, Torino, 2017.
6. Gibson I., Rosen D., Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2015.
7. C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, S. L. Sing, *Review of selective laser melting: Materials and applications*, Applied Physics Reviews, Dicembre 2015.
8. Fino P., Dispense per il corso *Materiali per la fabbricazione additiva*, Politecnico di Torino.
9. https://www.crf.it
10. https://cordis.europa.eu
11. https://www.researchitaly.it/horizon-2020
12. http://www.horizon2020news.it
13. http://encompass-am.eu
14. http://www.openhybrid.eu
15. https://altairhyperworks.com