



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di strumenti per l'implementazione funzionale e customizzata del selective laser melting nella produzione di giranti micro e mini hydro

A. Boschetto
L. Bottini



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Report RdS/PTR2021/234

SVILUPPO DI STRUMENTI PER L'IMPLEMENTAZIONE FUNZIONALE E CUSTOMIZZATA DEL SELECTIVE LASER MELTING NELLA PRODUZIONE DI GIRANTI MICRO E MINI HYDRO

A. Boschetto Dipartimento Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, La Sapienza Università di Roma
L. Bottini Dipartimento Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, La Sapienza Università di Roma

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo : *Tecnologie*

Progetto: "Materiali di Frontiera per usi energetici"

Work package: WP4 Realizzazioni sperimentali di componenti Additive Manufacturing, a favore delle industrie dei componenti metallici

Linea di attività: LA 4.14 Sviluppo del sistema di produzione di giranti mini e micro hydro attraverso la tecnologia di Selective Laser Melting

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia ENEA

Responsabile del Work package: Federica Bezzi ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Sapienza Università di Roma: "Sviluppo di strumenti per l'implementazione funzionale e customizzata del selective laser melting nella produzione di giranti micro e mini hydro".

Responsabile scientifico ENEA: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile scientifico UNIROMA1: Alberto Boschetto

Indice

SOMMARIO	5
1 INTRODUZIONE	6
2 ATTIVITÀ LA2.1 PRODUZIONE AGGREGATA ATTRAVERSO IL SELECTIVE LASER MELTING	7
2.1 L'ANNIDAMENTO	7
2.2 BASE SCIENTIFICA DEL NESTING	8
2.3 IL NESTING IN MAGICS	9
2.3.1 IL NESTING A RIQUADRO DELIMITATORE	9
2.3.2 IL NESTING A GEOMETRIA CON ROTAZIONE	12
2.3.3 IL NESTING A GEOMETRIA CON ROTAZIONE MULTIASSIALE	15
2.4 LE STRUTTURE DI SUPPORTO	16
2.4.1 IMPORTANZA E CRITICITÀ DELLE STRUTTURE DI SUPPORTO	16
2.4.2 STRUTTURE DI SUPPORTO NEL SELECTIVE LASER MELTING	19
2.4.3 CONSIGLI E ATTENZIONI PRATICHE	22
2.5 IL NESTING CON LE STRUTTURE DI SUPPORTO	23
2.6 CALCOLO DEI TEMPI DI PRODUZIONE CON LOTTI ANNIDATI	26
3 ATTIVITÀ LA2.2 STUDIO DELLA PRODUZIONE IN SELECTIVE LASER MELTING DELLA PALETTATURA DELLA GIRANTE PELTON	30
3.1 PREMessa	30
3.2 PROGETTAZIONE DELLA TURBINA	30
3.2.1 CARATTERISTICHE DI IMPIANTO	30
3.2.2 PROCEDURA STANDARDIZZATA	33
3.2.3 DIMENSIONI CARATTERISTICHE DEL CUCCHIAIO	34
3.2.3.1 IL TAGLIANTE	36
3.2.3.2 SCELTA DEI PARAMETRI DI PROGETTAZIONE	37
3.2.4 MODELLAZIONE SOLIDA	38
3.2.4.1 MODELLAZIONE IN AMBIENTE AUTODESK INVENTOR	38
3.2.4.2 MODELLAZIONE PARAMETRICA	45
3.3 LINEE GUIDA PER LA FABBRICAZIONE IN SELECTIVE LASER MELTING DI LEGHE DI ALLUMINIO	53
3.3.1 SPESSORE MINIMO DELLA PARETE	53
3.3.2 DIMENSIONE DEL DETTAGLIO	53
3.3.3 ACCURATEZZA	53
3.3.4 RIMOZIONE DELLA POLVERE NELLE STRUTTURE CHIUSE	53
3.3.5 FABBRICAZIONE DI FORI	54
3.4 MANAGING DEL FILE DI INTERSCAMBIO	54
3.4.1 TRASFORMAZIONE DEL MODELLO SOLIDO IN STL	54
3.4.2 GENERAZIONE DEI SUPPORTI	59
3.4.2.1 CONFIGURAZIONE DEL MACCHINARIO	59
3.4.2.2 CONFIGURAZIONE DELLE STRATEGIE PER LA GENERAZIONE DELLE STRUTTURE DI SUPPORTO	60
3.4.2.3 GENERAZIONE DELLE STRUTTURE DI SUPPORTO PER LA PALETTA PELTON	63
4 ATTIVITÀ LA2.3 FABBRICAZIONE DEI COMPONENTI	66
4.1 PARAMETRI DI FABBRICAZIONE	66
4.1.1 PARAMETRI DI MACCHINA	66
4.1.2 PARAMETRI DI ESPOSIZIONE	67
4.1.2.1 DEFINIZIONI DEI PARAMETRI	67
4.1.2.2 VALORI DEI PARAMETRI DI ESPOSIZIONE	72
4.1.3 STUDIO DI DIVERSE ORIENTAZIONI DELLE PALETTE	75
4.1.3.1 CREAZIONE DELLE STRUTTURE DI SUPPORTO PER CIASCUNA ORIENTAZIONE	76
4.2 FABBRICAZIONE FISICA DELLE PALETTE	77
4.2.1 COMPONENTISTICA E WORKFLOW	79

4.2.2	CARICAMENTO DELLE POLVERI IN MACCHINA.....	81
4.2.3	CALIBRAZIONE E DISTESA DEL PRIMO LAYER.....	81
4.2.4	FABBRICAZIONE FISICA.....	82
4.2.5	ESTRAZIONE DEL COMPONENTE.....	82
4.2.6	DISTACCO DALLA TAVOLA DI FABBRICAZIONE E POST-PROCESSING	83
4.3	ANALISI DELLA RUGOSITÀ OTTENUTA	84
4.4	MISURA DELL'ACCURATEZZA GEOMETRICA OTTENUTA.....	86
5	CONCLUSIONI DEL PROGETTO	92
5.1	BENEFICI DEL PROGETTO	92
5.1.1	ESEMPIO DI QUANTIFICAZIONE	94
5.1.2	CONFRONTO CON LE TECNOLOGIE TRADIZIONALI.....	95
2	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	99
3	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	100

Sommario

Il presente documento riporta le attività, le metodologie, i risultati e le conclusioni del primo anno di progetto inerente all'implementazione della tecnologia di Selective Laser Melting (SLM) per la produzione integrata di giranti micro e mini hydro. La struttura del documento segue quello delle attività del progetto. Il secondo anno è focalizzato sulla produzione delle giranti Pelton. Gli strumenti sviluppati nell'anno precedente verranno impiegati per determinare come la manifattura additiva possa essere impiegata con ottimizzazioni specifiche volte alla riduzione dei costi. Nell'attività LA2.1 si investigheranno le tecniche di nesting ovvero annidamento in piattaforma di componenti eguali o diversi al fine di ottimizzare lo spazio a disposizione e fabbricare il maggior numero possibile di parti allo stesso momento. Nell'attività LA2.2 un componente specifico verrà sottoposto all'intero processo di analisi permettendo di individuare i punti deboli forieri di difetti nell'informazione caratterizzante i diversi step del Selective Laser Melting. Ogni punto debole verrà evidenziato e sottoposto a interventi in grado di rendere il processo dedicato robusto rispetto a tali errori. A dimostrazione della capacità del sistema parti di girante verranno prodotte fisicamente in modo da misurarne fisicamente la qualità. Tecniche di rugosimetria e di reverse engineering a light scattering permetteranno di verificare rispettivamente la finitura superficiale e la rispondenza alla forma progettata.

1 Introduzione

La produzione aggregata di componenti consiste nel pianificare gli strumenti produttivi in modo da ottimizzare il mix produttivo piuttosto che ogni singolo prodotto. Vi sono altri aspetti da considerare per ottenere la massimizzazione più considerevole: ciascun prodotto deve poter essere prodotto con diverse metodologie in modo da avere una rosa di combinazioni con cui produrre molto più ampia. Tali opportunità conducono a complicazioni nella ricerca dell'ottimo poiché generalmente l'attività di pianificazione vera e propria consta di procedure e algoritmi che non intervengono nei parametri dei processi di fabbricazione. Ciò premesso, l'Additive Manufacturing si presta a vari livelli a determinare varianti di fabbricazione per uno stesso prodotto. Dato il più importante beneficio di poter fabbricare allo stesso tempo diversi componenti, va da sé l'importanza di sfruttare tale vantaggio. Naturalmente occorre generare solo quelle soluzioni che non costituiscano una limitazione o un rischio all'ottenimento della qualità richiesta. Ancor meno le soluzioni non devono deviare verso l'impossibilità a fabbricare in quanto causa di impedimenti alle delicate operazioni costituenti il processo. Di non secondaria importanza è il flusso delle informazioni e dati necessari al processo additivo che potrebbe essere causa di errori o ulteriori deviazioni quando non progettato in modo robusto. In genere è proprio la generazione e l'impiego di file STL critici che si riflette in problematiche a livello di slicing e generazione dei supporti. Allo scopo di evitare l'insorgenza di tali problemi occorre dotarsi di sistemi di verifica e riparazione dei file tessellati che però necessitano di personale qualificato e con esperienza. Oltretutto l'adozione delle procedure di riparazione è spesso basata sui tentativi e, di conseguenza, non assicura l'esito finale né tantomeno permette di dedurre il tempo necessario. Purtroppo, la più diffusa insorgenza di difetti nasce proprio in sede di modellazione solida poiché anche l'ambiente più evoluto non è robusto a sufficienza per creare un file di interscambio esente da problemi [1]. Per questo motivo nel presente progetto si è presa in esame la possibilità di generare la geometria necessaria attraverso un sistema intelligente che prende in ingresso variabili, per così dire, di alto livello senza richiedere un'abilità di modellazione specifica. Tale sistema dovrà prevedere l'uso di sole quelle operazioni di trasformazione che sono altamente affidabili e si rispecchiano in un file STL esente da errori. Va ribadito il punto che solitamente tale ottenimento risulta piuttosto ambizioso, specie quando la geometria è caratterizzata da molteplici e complesse feature geometriche. Una turbina Pelton è caratterizzata da palette piuttosto articolate con sottosquadri che limitano la possibilità di una fabbricazione semplificata attraverso il Selective Laser melting che trova nelle strutture di supporto uno strumento inalienabile per evitare l'insorgenza di livelli di tensioni residue o temperature della zona scansionata e raffreddata che impediscano la fabbricazione stessa.

2 Attività LA2.1 Produzione aggregata attraverso il Selective Laser Melting

2.1 L'annidamento

I modelli sviluppati nell'anno precedente permettono di determinare rapidamente i costi di produzione al variare delle condizioni di processo. In particolare, uno stesso oggetto può essere prodotto con differenti orientazioni necessitando strutture di supporto completamente differenti. Di fatto, pur scaturendo dalla stessa geometria, il processo produttivo è completamente differente. Tipicamente l'orientazione ha effetto su diversi aspetti concernenti la qualità del componente come la rugosità superficiale e l'accuratezza. In merito al primo aspetto nell'anno precedente le attività hanno permesso di determinare set di parametri che non solo permettono di ridurre la rugosità superficiale migliorando le prestazioni della paletta ma consentono anche di avvicinarsi ad una isotropia costruttiva rendendo più flessibili le scelte di processo. In merito all'accuratezza occorre avere ben chiari gli aspetti connessi con le criticità della lavorazione soprattutto in ambito termo-meccanico. Per questo motivo si opereranno delle scelte volte al conseguimento di un componente caratterizzato da una grande affidabilità fabbricativa. Ciò sarà possibile adottando particolari strategie in sede di pre-processing. Con questa premessa la tecnologia Selective Laser Melting diviene particolarmente vantaggiosa per quello che viene denominato produzione aggregata di componenti.

In generale le tecnologie di Additive Manufacturing consentono la pianificazione e produzione di componenti in batch di piccolo e medio taglio anche se di natura differente. Dato che la preparazione di una piattaforma di produzione richiede un tempo di setup è naturale cercare di inserire il numero di componenti più alto possibile. Tuttavia, le geometrie non si prestano ad un annidamento semplice da intuire anzi sono particolarmente complesse da comporre. Per questo motivo esistono molti algoritmi il cui scopo è proprio quello di eseguire le cosiddette operazioni di nesting. Vanno però selezionati dei parametri di processo che debbono considerare le possibilità costruttive della tecnologia adottata e le limitazioni indotte da criticità geometriche nel componente.

Un ulteriore problema nasce dal dover considerare nell'annidamento le strutture di supporto: esse dovranno essere spostate senza perdere l'allineamento con la parte da supportare, si dovrà eseguire un'analisi di collisione tra elementi scatolari che potrebbero risultare errati per i software più comuni, il raggruppamento finale non deve eliminare le necessarie distinzioni tra elementi caratterizzati da parametri di processo differenti.

In commercio esistono numerosissimi software di Nesting. A titolo di esempio:

- CutPro
- PatternPro
- AccuNest
- Nest Expert MultiNest
- PowerNest
- Jet-Term
- Astra Nesting

A questi software dedicati si aggiungono tutti i tool a disposizione delle più diffuse piattaforme di modellazione solida come il SolidEdge, il SolidWorks, Autodesk Inventor, etc. Tuttavia questi software non tengono conto delle necessità del Selective Laser Melting e trovano difficile applicazione nel contesto del presente progetto. Il software scelto per effettuare le operazioni di nesting è il Materialise Magics. Su questa piattaforma, infatti, i modelli tessellati vengono trattati in modo da strutturare con affidabilità le strutture di supporto ed entrambe queste entità vengono considerate nell'applicativo di Nesting naturalmente presente nella piattaforma. È importante anche considerare che, una volta effettuata l'ottimizzazione, i posizionamenti e le rotazioni devono poter essere salvate nel formato utile al successivo processamento in macchina. Si tratta di un punto critico che deve poter essere svolto senza criticità. Possibili collisioni devono, infatti, essere escluse categoricamente e, per questo, nella piattaforma devono essere presenti strumenti che possano validare il contenuto digitale prima di inserirlo in macchina.

2.2 Base scientifica del nesting

Nella ricerca operativa il problema dell'impacchettamento e del taglio trovano la stessa formulazione matematica. Si tratta infatti di determinare una configurazione dei pezzi in ingresso tale da riempire l'area desiderata senza sovrapposizioni. Generalmente il problema viene chiamato nesting bidimensionale irregolare e considera oggetti descrivibili da poligoni da inserire in un contenitore di forma rettangolare. In questa categoria ricadono molti dei problemi di cutting & packing la cui risoluzione è piuttosto ardua specie quando di considerano oggetti complessi e in lotti medi o grandi. Per questo motivo, la maggior parte degli algoritmi è di natura euristica.

Una delle idee più diffuse è quella della rappresentazione a griglia. Essa si basa sulla suddivisione dell'area in zone quadrate di uguale dimensione ed utilizzare una matrice per memorizzare quali posizioni del foglio sono occupate e quali no. I metodi con cui viene utilizzata la matrice sono diversi: Il più semplice è quello proposto da J.F. Oliveira e J.S. Ferreira in [2]. Esso adotta il valore 0 per le zone libere e a questa cifra viene aggiunto 1 ogni volta che un pezzo viene posizionato in quella posizione. In questo modo le zone che hanno un valore maggiore di 1 sono zone in cui vi è una sovrapposizione.

Un altro metodo interessante che permette di controllare anche il contatto tra i pezzi è quello proposto da Sagenreich e Braga in [3]. Il valore zero nella matrice rappresenta sempre una zona vuota e quando viene posizionato un nuovo pezzo viene aggiunto un 3 nelle zone interne al pezzo ed un 1 nelle zone del bordo. In questo modo il controllo della sovrapposizione si riduce a controllare che la matrice non presenti numeri maggiori od uguali a 4 e le zone che presentano un 2 sono quelle di contatto tra i pezzi.

Nell'approccio di Babu e Babu [AB01] la codifica della matrice assegna un numero maggiore di 0 alle posizioni libere del foglio. In particolare, ogni volta che viene posizionato un pezzo, per ogni riga interessata viene posto un 1 nella posizione libera più a destra e incrementando di uno ogni volta ci si sposta da destra verso sinistra. Questa codifica è particolarmente efficace nel caso in cui si voglia adottare un metodo euristico di tipo bottom-left. Il numero presente su una zona del foglio indica quante caselle bisogna spostarsi verso destra per trovare una possibile posizione ammissibile (senza intersezioni con i pezzi già disposti). D'altra parte, questa codifica richiede però un maggiore costo nell'aggiornamento della matrice.

I vantaggi dei metodi di rappresentazione a griglia possono essere riassunti come a seguire:

- velocità nel controllare l'ammissibilità di una data soluzione
- versatilità dei pezzi che possono essere usati. Non viene fatta differenza per pezzi convessi o meno, oppure pezzi più o meno complessi.
- Facilità nel calcolare le distanze che i pezzi devono percorrere per raggiungere una posizione ammissibile.

Esistono ovviamente degli svantaggi:

- la griglia non approssima un modo accurato pezzi che non hanno dei bordi con soli angoli retti
- all'aumentare della precisione che si chiede aumenta sostanzialmente anche la memoria richiesta per mantenere la matrice.
- Difficile attuazione della rotazione dei pezzi. Una soluzione potrebbe essere quella di ruotare il pezzo originale e ricalcolarne la codifica in matrice, il che sarebbe come avere un nuovo pezzo, oppure si potrebbe ruotare direttamente la matrice ma questo è possibile solo con rotazioni multiple di 90 gradi, infatti, quest'ultimo metodo spesso non viene usato poiché troppo restrittivo nelle rotazioni.

La prima formulazione del problema di taglio aggregato risale al 1939 e fu realizzata da Kantorovich. [4]. A partire da questo lavoro si sono diffusi molti metodi che possono essere classificati utilizzando lo schema proposto da Dyckhoff. Questa classificazione prevede quattro diverse categorie:

1. Dimensione
 - a. Numero delle dimensioni
2. Tipo di assegnamento
 - a. Utilizzo di tutto il pezzo grande e di una selezione dei pezzi piccoli
 - b. Utilizzo di una parte del pezzo grande e di tutti i pezzi piccoli
3. Assortimento dei pezzi grandi da tagliare

- a. Un solo pezzo grande
- b. Molti pezzi grandi tutti della stessa dimensione
- c. Molti pezzi grandi di dimensioni diverse
- 4. Assortimento dei pezzi piccoli
 - a. Pochi pezzi di dimensioni diverse
 - b. Molti pezzi con molte dimensioni diverse
 - c. Molti pezzi con poche dimensioni diverse
 - d. Molti pezzi delle stesse dimensioni

È stato dimostrato che anche i problemi di taglio più semplici sono NP – Hard è molto improbabile che esista un algoritmo che risolva l'annidamento in maniera ottimale. Per questo motivo sin dall'inizio il problema del cutting & packing è stato affrontato sviluppando algoritmi euristici.

Una semplice formulazione è quella che considera il problema di taglio bidimensionale, ortogonale, non a ghigliottina, che consiste nel ricavare un insieme finito di piccoli pezzi rettangolari a partire da un rettangolo base di dimensioni prefissate, in modo da massimizzare il profitto.

Il rettangolo base R ha lunghezza L ed altezza W, mentre ogni pezzo i da tagliare ha dimensioni (l_i, w_i) e un valore indicato con v_i . Il problema consiste nel tagliare x_i copie di ogni pezzo i in modo che $0 \leq P_i \leq x_i \leq Q_i$, $i = 1, \dots, m$ e che il valore totale $\sum v_i x_i$ sia massimizzato. Il massimo numero di pezzi che possono essere tagliati è indicato con $\sum Q_i$. I pezzi da tagliare sono soggetti a due ulteriori vincoli:

- I pezzi hanno un'orientazione fissata, cioè pezzi di dimensione (a, b) e (b, a) non sono la stessa cosa.
- Ogni pezzo deve essere tagliato con i suoi lati paralleli a quelli del rettangolo base (tagli ortogonali).

A seconda dei valori di P_i e Q_i , si possono distinguere tre tipi di problemi:

1. Unconstrained: $\forall i, P_i = 0, Q_i = bL * W/l_i * w_i$.
2. Constrained: $\forall i, P_i = 0, \exists i, Q_i < bL * W/l_i * w_i$.
3. Doubly Constrained: $\exists i, P_i > 0; \exists j, Q_j < bL * W/l_j * w_j$.

L'efficienza di un pezzo i è definita come $e_i = v_i/(l_i * w_i)$; a seconda dell'efficienza dei pezzi si possono distinguere altre categorie di problemi:

1. Unweighted: $e_i = 1, \forall i$. Il valore di ogni pezzo è uguale alla sua area.
2. Weighted: $e_i \neq 1$, almeno per un pezzo i. Alcuni pezzi hanno un valore che non corrisponde alla loro superficie, ma riflette altri aspetti come la loro forma o la loro relativa importanza per i clienti.

È possibile ottenere un semplice upper bound per il problema risolvendo il seguente knapsack problem, dove la variabile x_i rappresenta il numero di pezzi del tipo i che devono essere tagliati in più rispetto al suo lower bound P_i :

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} \sum_{i=1}^m v_i x_i + \sum_{i=1}^m v_i P_i \\
 & \sum_{i=1}^m (l_i w_i) x_i \leq LW - \sum_{i=1}^m P_i (l_i w_i) \\
 & x_i \leq Q_i - P_i, i = 1, \dots, m \\
 & x_i \geq 0, \text{intero}, i = 1, \dots, m
 \end{aligned}$$

2.3 Il nesting in Magics

2.3.1 Il nesting a riquadro delimitatore

I metodi euristici trovano il vantaggio di rendere l'operazione di calcolo molto snella e, di conseguenza, sono i più diffusi negli applicativi. Anche il Materialise Magics impiega diversi algoritmi euristici allo scopo di ottenere risultati in accordo con prescritti desiderata.

Si prenda a titolo di esempio il lotto di oggetti rappresentato in Figura 1. È possibile osservare come le geometrie abbiano estensioni e caratteristiche differenti. Ciò rende arduo un annidamento efficiente. Le forme caratterizzate da scritte hanno un'intricata geometria che deve essere necessariamente semplificata dagli algoritmi pena un'intensa richiesta computazionale. Le forme a "C" sono insidiose per lo spazio libero lasciato. L'effetto scala di oggetti diversi ha effetti totalmente diversi e oggetti della stessa forma ma di dimensioni diverse vanno considerati come geometrie differenti.

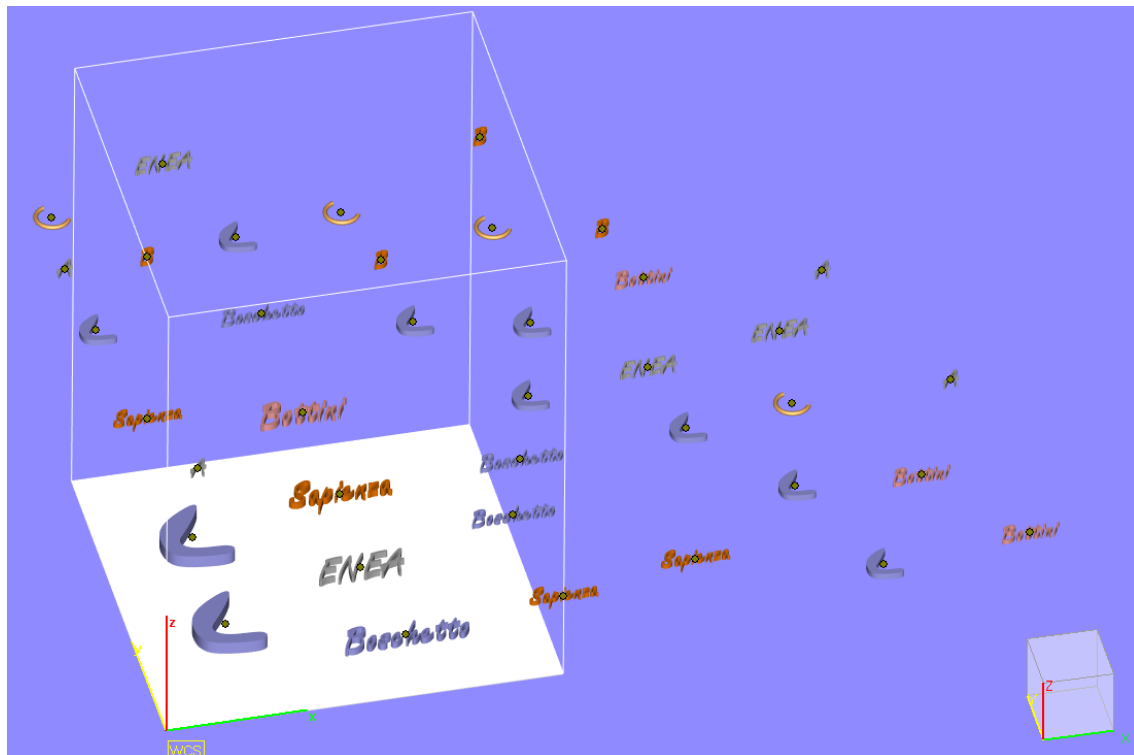


Figura 1 Lotto di oggetti di varia natura prima dell'operazione di nesting

In Materialise Magics è possibile selezionare diversi algoritmi con efficienze e velocità completamente differenti. Il metodo a riquadro delimitatore offre la maggior velocità a discapito di una soluzione incapace di allineare le geometrie entrando nella loro bounding box. In Figura 2 è riportato il pannello specifico. È evidente dallo schema rappresentativo come la geometria è semplificata al rettangolo contenente la stessa chiamato riquadro delimitatore appunto.

Intervallo parte	10,000	mm
Margine piattaforma	10,000	mm
Parti da annidare		
☒ Annida tutte le parti	☐ Ordina secondo altezza Z	
☐ Parti selezionate	☒ Inizia con Z min	
	☐ Inizia con Z max	
Altezza Z e supporto		
☐ Trasla in posizione Z predefinita (Alberi, supporti manuali e STL verranno rimossi)		
☒ Mantieni posizione Z corrente (Tutti i tipi di supporto verranno mantenuti)		
☐ Abilita posizionamento multi-piattaforma		
Geometria Riquadro delimitatore [BETA] Geometria 2.5		
Soluzione posizionamento		
☒ Prima soluzione possibile		
☐ Area superficie minima		
☐ Dimensione X minima		
☐ Inverti direzione		
☐ Dimensione Y minima		
☐ Inverti direzione		
☐ Centro piattaforma		

Figura 2 Pannello di controllo per nesting a riquadro

Il sistema prevede di definire 5 scopi:

- Prima soluzione possibile
- Area superficie minima. Rende possibile la ricerca dell'area più piccola lasciando lo spazio contiguo più grande possibile. Ciò è utile quando ci si aspetta di inserire nella stessa piattaforma di produzione altri oggetti ancora in arrivo
- Dimensione X minima. Va ricordato che il Selective Laser Melting necessita di un recoater per la distesa dello strato di polvere. La direzione di tale movimento è la X per convenzione. Una riduzione dello spazio potrebbe essere desiderata quando si hanno problemi di completamento del letto di polvere.
- Dimensione Y minima. In direzione Y è convenzione considerare la direzione del flusso di argon. Anche in questa direzione possono insorgere dei problemi: troppo vicino agli ugelli di uscita ci possono essere turbolenze che potrebbero movimentare le particelle metalliche precedentemente depositate; all'imbocco del collettore, ovvero alla massima distanza dagli ugelli, le prestazioni del flusso sono ridotte con conseguente aumento del rischio di danneggiamenti causati dal flusso piroclastico generato dalla scansione laser.
- Centro della piattaforma. Scopo di questo algoritmo è quello di lasciare spazio tutto attorno all'annidamento in modo da sfruttare la zona della piattaforma migliore in termini dei precedenti problemi.

L'esecuzione degli algoritmi come precedentemente sottolineato non è ottima e i risultati devono essere generati perseguendo scopi ben precisi. Applicando l'algoritmo più veloce si ottiene il risultato di Figura 3 a sinistra. Il tempo di calcolo è stato di circa 5 secondi su un personal computer dotato di un chip Intel i7 di seconda generazione e una scheda video Nvidia GeForce M150. Alcune parti sono state lasciate al di fuori della piattaforma ma la velocità di esecuzione è stata elevata. Limitando l'algoritmo all'area minima (figura di destra) è possibile notare come con pochi secondi in più un numero minore di pezzi ricade al di fuori della piattaforma.



Figura 3 Soluzioni per algoritmi a riquadro delimitatore: prima soluzione possibile (sinistra) e area superficie minima (destra)

Volendo applicare gli algoritmi per la ricerca di posizionamenti in grado di occupare un'area minima orizzontalmente si ottiene il risultato di Figura 4 a sinistra. L'algoritmo non è riuscito ad inserire ben 8 parti che sono disposte ordinatamente in alto a sinistra ma fuori dalla tavola. Ciò è dovuto principalmente al fatto che la ricerca è fortemente influenzata dalla geometria e in alcuni casi come questo l'obiettivo è causa di posizionamenti non fortunati. Con questo set di geometrie se si applica la ricerca ottimizzata per il centro della piattaforma si ottiene la soluzione di destra. Apparentemente la soluzione è migliore ma se si osserva attentamente i pezzi eccedenti sono 10 contro gli 8 precedenti.

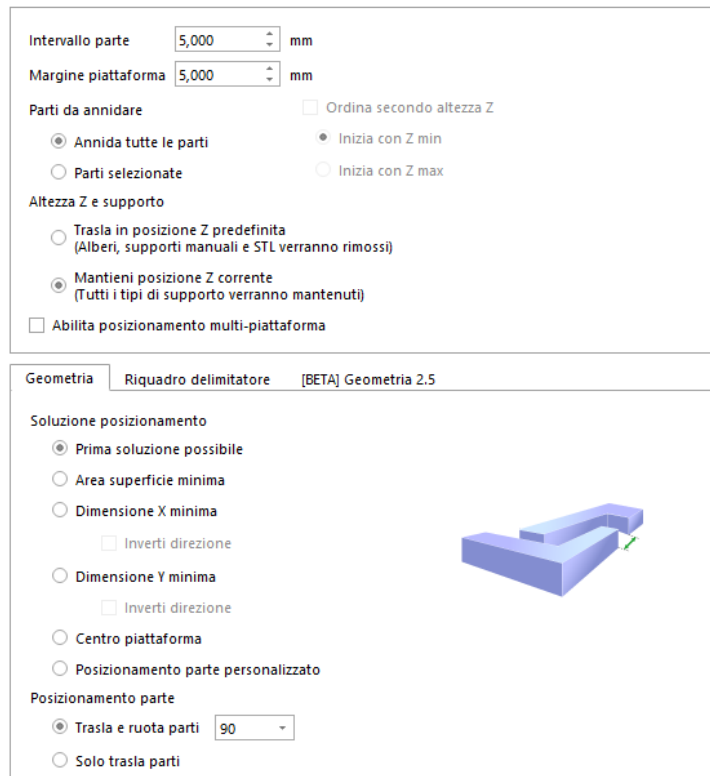


Figura 4 Soluzioni per algoritmi a riquadro delimitatore: dimensione X minima (sinistra) e centro piattaforma (destra)

2.3.2 Il nesting a geometria con rotazione

Il piccolo lotto preso in esame è caratterizzato da geometrie profondamente differenti. Va rilevato che le forme a “C” sono quelle che beneficerebbero di algoritmi che non semplificano alla bounding box ma considerano la possibilità di incastrare tra di loro le geometrie. Nell’ambiente Magics tale possibilità è presente e il relativo pannello di controllo è riportato in Figura 5. Anche in questo caso gli scopi sono delle stesse precedenti tipologie. Tuttavia, possibili incastri sarebbero fortemente limitati se non si permettesse all’algoritmo di ruotare gli oggetti in modo da cercare un vasto assortimento di configurazioni e tra queste soddisfare lo scopo richiesto. L’esecuzione dell’algoritmo per la ricerca della prima soluzione possibile ha richiesto circa 15 secondi. Si tratta di un tempo triplo rispetto a prima ma del tutto ragionevole. In Figura 6 a sinistra è riportata la soluzione: si tratta di un annidamento che non solo posiziona tutti le parti all’interno della piattaforma ma lascia anche dello spazio in alto a destra. L’efficienza di tale annidamento è dovuta alla possibilità di incastrare parti tra di loro come quelle a “C” che hanno permesso di risparmiare molto spazio. Va sottolineato che l’effetto di una rotazione potrebbe essere influente la qualità dell’oggetto fabbricato. Si tratta di una rotazione con asse perpendicolare alla tavola e, di conseguenza, modifica la direzione in cui l’oggetto vede il flusso e il recoater. Per il primo, di norma, se la zona scansionata viene ruotata l’abilità del flusso di portare via le proiezioni piroclastiche non viene modificata. Per ciò che concerne il recoater è bene considerare come la parte interessata possa contrastare tale operazione. Il recoater esercita una forza non trascurabile sulla zona scansionata e maggiore che sulle polveri processate poiché l’oggetto solido creato è soggetto a distorsioni risultato in un marcato attrito con il recoater stesso. Soprattutto quando il recoater incontra la zona scansionata si verifica un impatto. Particolare cura va posta nel posizionamento in modo da orientare tale bordo in modo che l’interazione sia graduale: ciò vale a dire

che un bordo rettilineo non deve essere posizionato parallelo al recoater altrimenti l'impatto esercitato è enorme. Tornando alla rotazione dell'algoritmo di nesting se si consentisse una rotazione di 90° si potrebbe vanificare la cura precedentemente menzionata. Un consiglio è quello di ruotare l'oggetto prima del nesting di pochi gradi (sufficienti all'eliminazione di tale problema). In questo modo è molto poco probabile che un oggetto ruotato di 90° presenti una superficie parallela al recoater.



Intervallo parte 5,000 mm

Margine piattaforma 5,000 mm

Parti da annidare ☐ Ordina secondo altezza Z

☒ Annida tutte le parti ☒ Inizia con Z min

☐ Parti selezionate ☐ Inizia con Z max

Altezza Z e supporto

☐ Trasla in posizione Z predefinita (Alberi, supporti manuali e STL verranno rimossi)

☒ Mantieni posizione Z corrente (Tutti i tipi di supporto verranno mantenuti)

☐ Abilita posizionamento multi-piattaforma

Geometria **Riquadro delimitatore** [BETA] Geometria 2.5

Soluzione posizionamento

☒ Prima soluzione possibile

☐ Area superficie minima

☐ Dimensione X minima

☐ Inverti direzione

☐ Dimensione Y minima

☐ Inverti direzione

☐ Centro piattaforma

☐ Posizionamento parte personalizzato

Posizionamento parte

☒ Trasla e ruota parti 90

☐ Solo trasla parti

Figura 5 Pannello di controllo per algoritmi che considerano la geometria

Con pochi secondi di processamento in più (circa 18 secondi) è possibile distribuire le parti in modo da occupare il minor spazio orizzontale. In Figura 6 a destra è possibile osservare la soluzione ove una grande porzione della tavola (circa il 36%) è libera e contigua.

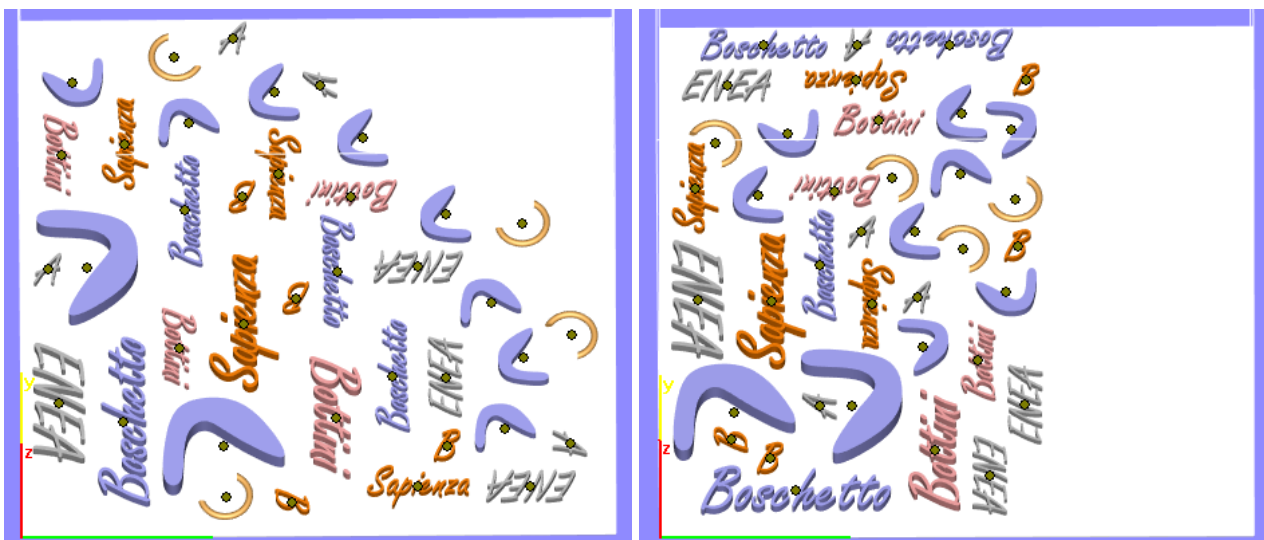


Figura 6 Applicazione dell'algoritmo euristico per geometrie a primo tentativo (sinistra) e a minimo spazio orizzontale (destra)

Applicando l'algoritmo per il centro della tavola si ottiene il risultato di Figura 7 a sinistra. È bene ricordare che tra le possibilità connesse con il Selective Laser Melting vi è quella di fabbricare oggetti distanti tra di loro uno spazio molto piccolo. Se ben progettate le parti si possono trovare anche a pochi millimetri. La soluzione di sinistra è ottimizzata lasciando un interspazio tra i componenti di 5 mm. Se lo si riduce a solo 1 mm il risultato è ben diverso come mostrato nella figura di destra.

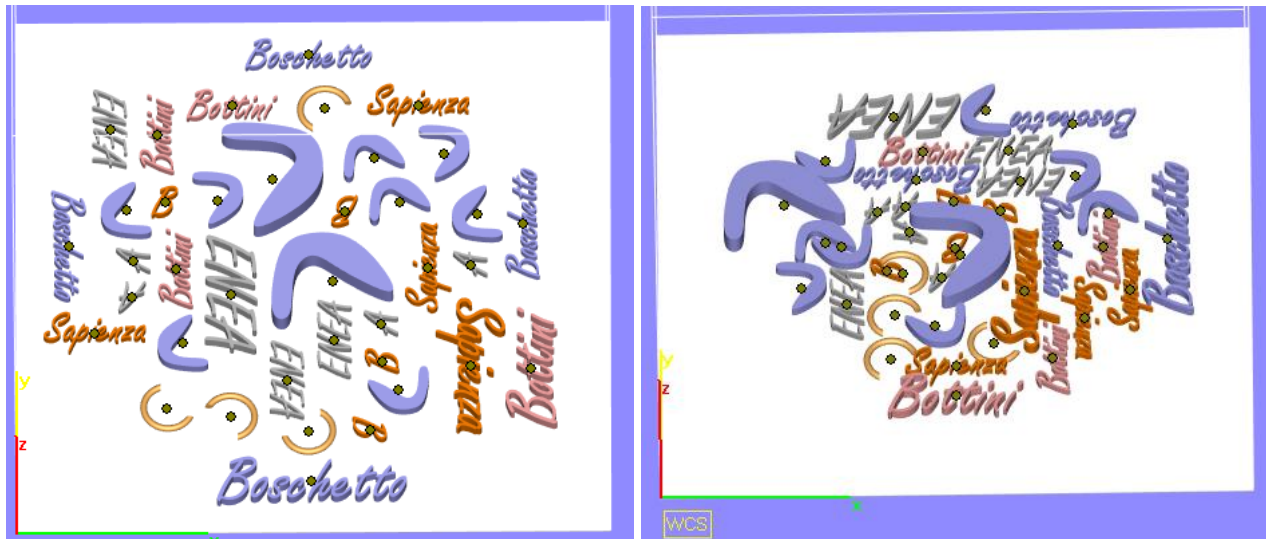


Figura 7 Applicazione dell'algoritmo euristico per geometrie con ottimizzazione per il centro della tavola a 5 mm di interspazio tra i componenti (sinistra) e solo 1 mm di interspazio (destra)

Come precedentemente evidenziato è possibile che con mutevoli cambiamenti gli oggetti possano essere caratterizzati da compenetrazioni. In questo caso è bene validare le soluzioni attraverso dei tool in grado di rilevare le collisioni. Ne è un esempio l'analisi di Figura 8 relativa all'ultima soluzione trovata.

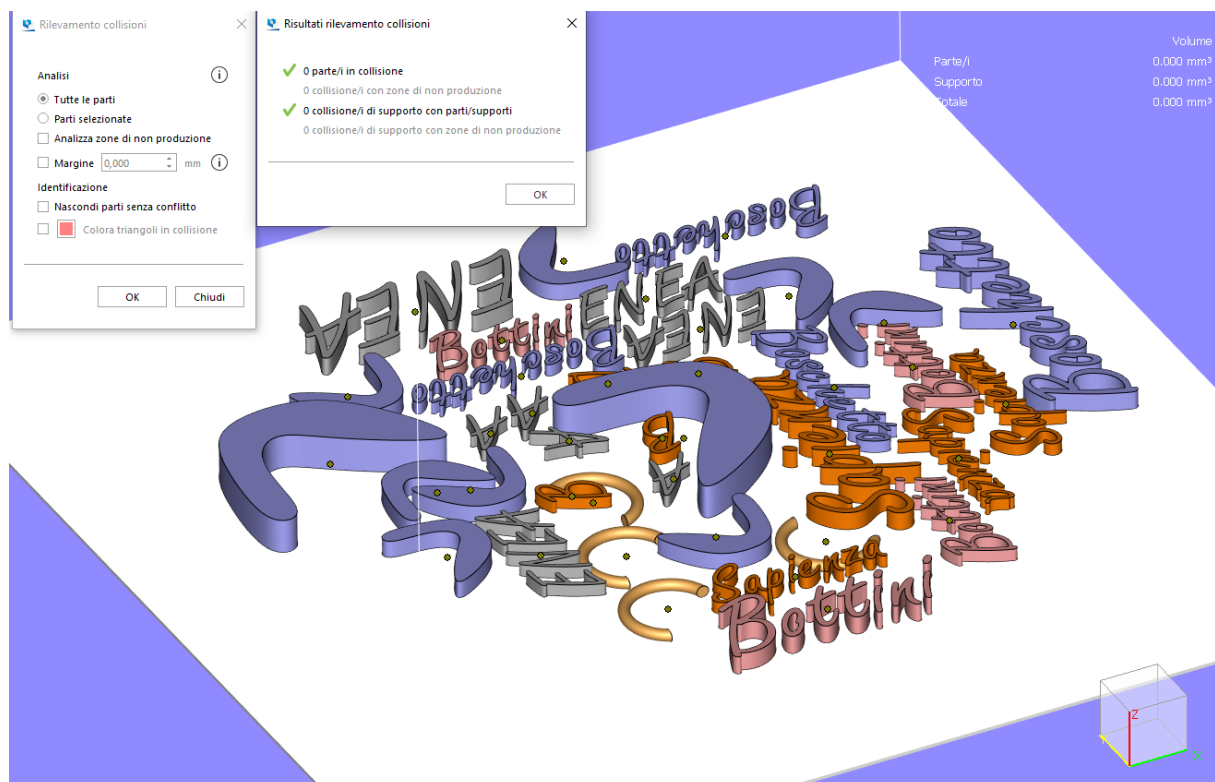


Figura 8 Analisi delle collisioni tra gli oggetti

2.3.3 *Il nesting a geometria con rotazione multiassiale*

In ultimo si vuole considerare uno dei più nuovi algoritmi in grado di generare soluzioni con rotazione delle parti attorno a tutti e tre gli assi coordinati. A parte la complessità del metodo e il tempo computazionale necessario va chiarito precisamente il beneficio e le controindicazioni che si possono ottenere da un'implementazione di tale operazione. Per ciò che concerne i benefici è sufficiente mostrare il risultato che si ottiene dall'applicazione di questo metodo innovativo al precedente lotto di parti. Pur limitando a 5 mm lo spazio minimo tra i componenti si giunge all'annidamento mostrato in Figura 9. La soluzione è strabiliante: più del 70% della tavola è ora libera. Naturalmente, le geometrie precedentemente posizionate con la loro superficie maggiore in tavola trovano ampio margine di ottimizzazione se possono essere ruotate lungo X o Y e, di conseguenza, la soluzione mostrata è molto speculativa. Tuttavia, è indubbio che lasciare così tanti gradi di libertà all'algoritmo di nesting permetta la generazione di un'enorme quantità di risultati da cui attingere quelle ottima.

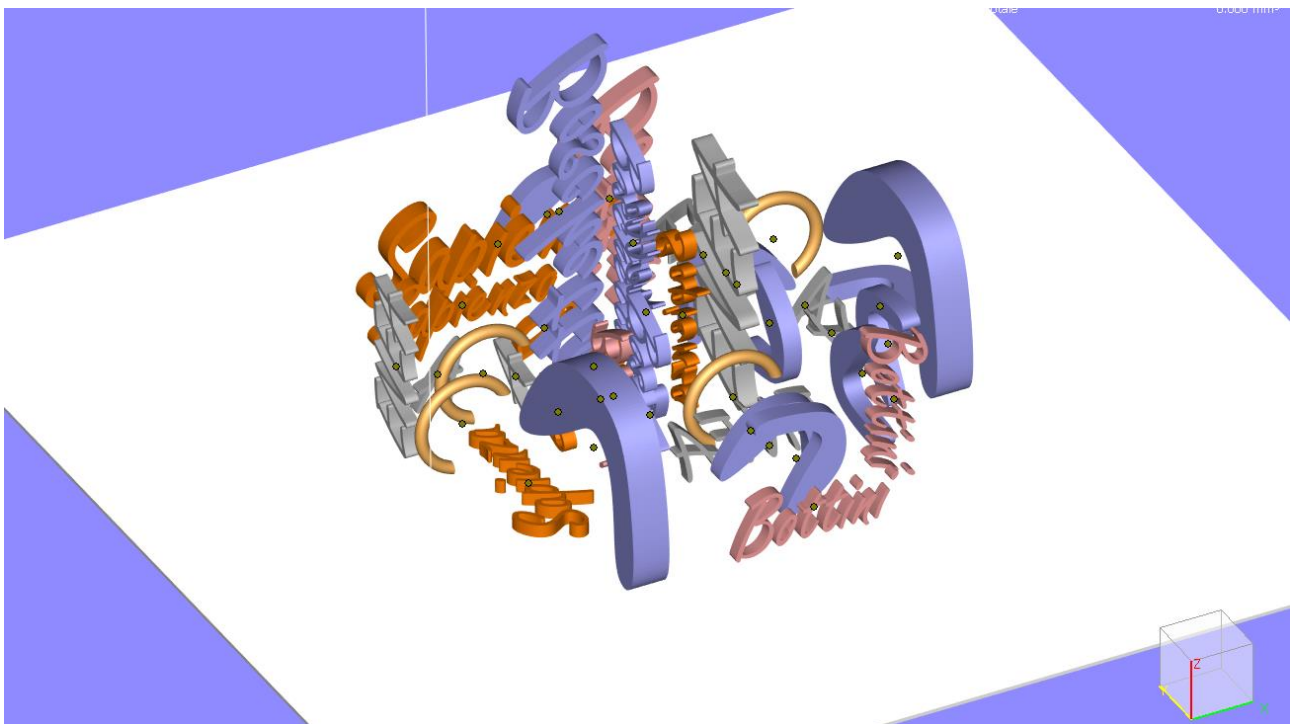


Figura 9 Applicazione del nuovo algoritmo in grado di effettuare rotazioni di 90° su tutti e tre gli assi

Di contro vi sono però degli svantaggi che impediscono l'applicazione di tale algoritmo. In primis nelle precedenti esecuzioni non si sono considerati i supporti. Va da sé che una rotazione lungo Z non modifica la geometria dei supporti se l'altezza in Z dell'oggetto non varia. Quando però la rotazione non segue queste prescrizioni le strutture di supporto vanno rigenerate e, conseguentemente, si perdono una serie di attività che, in merito alla paletta Pelton, verranno trattate nella LA2.2. Per questo motivo l'uso di questo algoritmo non può essere consigliato in un progetto il cui scopo è rendere affidabile l'esecuzione della fabbricazione additiva. Ciò non significa che gli oggetti non debbano essere ruotati rispetto ad assi diversi da Z. Significa che le varie rotazioni lungo X e Y vanno investigate accuratamente in modo da avere contezza degli effetti sulle strutture di supporto nonché sull'accuratezza dimensionale e sulla rugosità. Gran parte del lavoro svolto nel primo anno è stato rivolto al miglioramento della finitura superficiale ottenibile e come ben documentato questa dipende dall'angolo locale di stratificazione ovvero l'angolo tra la direzione di stratificazione e la normale nel punto della superficie dell'oggetto che si sta costruendo. Tale angolo è invariante di rotazioni lungo Z ma fortemente affetto da qualsiasi rotazione attorno a X e Y. Pertanto, gli algoritmi di nesting vanno limitati. Per un'ottimizzazione, comunque, esaustiva si dovrà fornire loro un set di oggetti caratterizzati da rotazioni multiple le cui combinazioni vanno studiate ex-ante.

2.4 Le strutture di supporto

2.4.1 Importanza e criticità delle strutture di supporto

Le strutture di supporto si rendono necessarie per la tecnologia di Selective Laser melting per le seguenti ragioni in ordine di importanza:

- Drenaggio del calore generato in fase di consolidamento laser verso la piattaforma
- Ridurre lo stato di tensioni termica di ritiro residua
- Contenere le distorsioni del pezzo e ancorarlo adeguatamente alla piattaforma
- Ridurre il fenomeno del dropping su superfici downskin

Il primo punto può risultare il più critico poiché una struttura aggettante produce durante la fabbricazione una quantità di calore ingente che non può essere smaltita dalla polvere non processata in quanto caratterizzata da un basso coefficiente di conducibilità. Una zona completamente aggettante come quella mostrata in Figura 10 se non supportata sarà caratterizzata da deviazioni di forma causate dalla considerevole temperatura raggiunta nella zona più lontana che, nel migliore dei casi, produrrà deviazioni di forma mentre, nel peggiore dei casi, il collasso del pezzo [5].

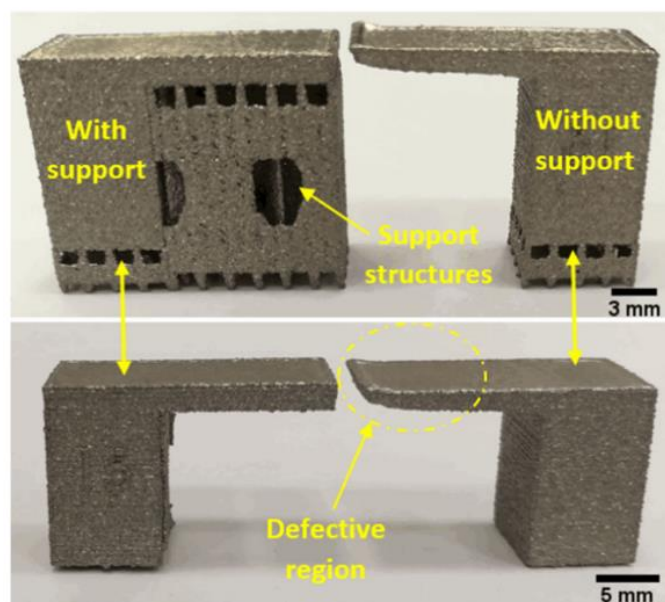


Figura 10 Effetto della mancanza di strutture di supporto

Lo stato di tensione termica è una caratteristica tipica del Selective Laser melting in quanto lavorazione a freddo. Si tratta di un difetto impossibile da evitare. Tuttavia, attraverso una buona progettazione delle strutture di supporto e un'adeguata orientazione del pezzo in tavola, è possibile ridurre ad un livello trascurabile o tale da poter essere risolto attraverso un successivo trattamento termico di distensione. Nel caso di errata progettazione del processo, ad esempio con una orientazione volta alla sola riduzione dei tempi, la lavorazione potrebbe essere portata a termine ma, al momento del distacco dalla piattaforma di fabbricazione il rilascio dello stato di tensione potrebbe generare una consistente deformazione permanente nel pezzo rendendolo inaccettabile. È il caso mostrato in Figura 11 dove il risultato di fabbricazione è una deformazione fuori dal piano di diversi millimetri. In questo caso è suggeribile migliorare le strutture di supporto e, soprattutto, modificare l'orientazione del pezzo in modo tale che la zona massiva della base venga scansionata una zona alla volta piuttosto che tutta insieme.



Figura 11 Stato di deformazione indotto in un pannello a cella esagonale evidenziato dopo il distacco dalla tavola di fabbricazione

In altri casi lo stato di tensione potrebbe essere così elevato che il pezzo si rompe. Cricche più o meno evidenti possono ingenerarsi per il superamento del limite di rottura da parte di dette tensioni. In Figura 12 sono mostrati evidenti esempi di cricche e fratture. Alcune volte invece le strutture di supporto non sono sufficienti a mantenere il pezzo e si verifica un distacco tra queste ultime e la superficie da supportare (Figura 14).

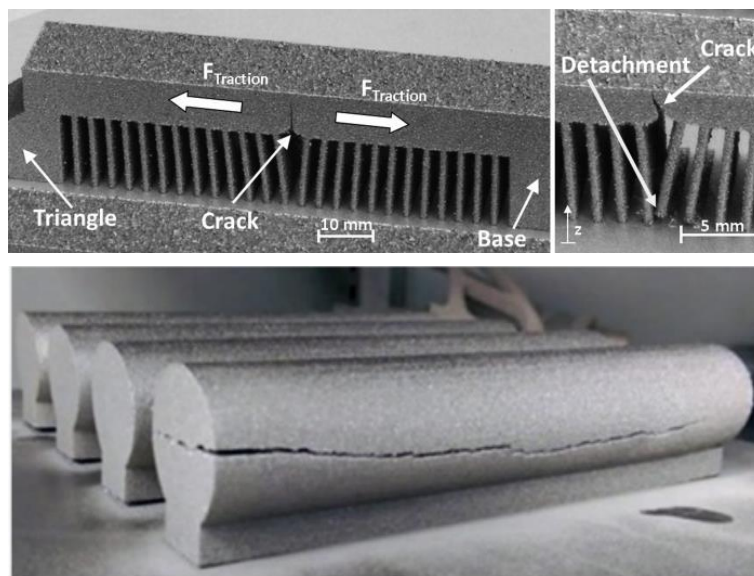


Figura 12 Cricche e fratture nel componente causate dalle tensioni termiche di ritiro



Figura 13 Distacco delle strutture di supporto nella zona da sostenere

Le strutture di supporto devono ancorare adeguatamente il pezzo alla piattaforma. Se non ben progettate il distacco può avvenire proprio rispetto alla superficie della tavola come mostrato in Figura 14

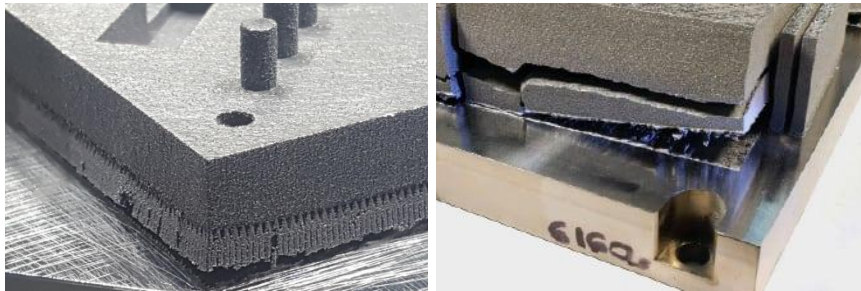


Figura 14 Distacco tra le strutture di supporto e la piattaforma di fabbricazione

L'ultimo fenomeno che occorre tenere sotto controllo mediante le strutture di supporto riguarda la percolazione di liquido metallico all'interno delle particelle di polvere per quelle zone con angolo locale di stratificazione maggiore di 90° vale a dire le superfici aggettanti. Infatti, in questi casi la scansione si esplica parzialmente su un substrato di polvere non scansionato: il materiale fuso sottoposto alla scansione tenderà a penetrare nei vuoti tra le particelle producendo un peggioramento al livello micro-geometrico (rugosità ottenibile) e macro-geometrico (perdita di tolleranze). La Figura 15 mostra la schematizzazione di questo fenomeno e una micrografia di una zona aggettante fabbricata senza supporti.

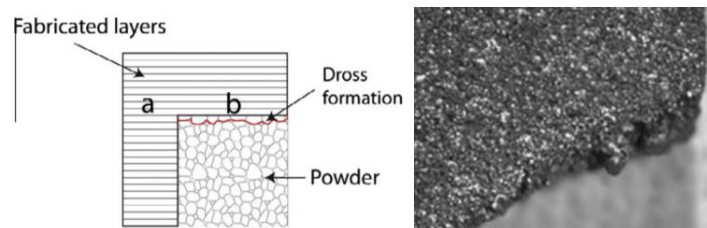


Figura 15 Schema del fenomeno di dropping e superficie aggettante fabbricata senza supporti

L'adozione di specifici parametri può ridurre questo effetto così come sviluppato nel primo anno di progetto. Si può passare dalla situazione mostrata in Figura 16 a sinistra, ove il materiale fuso si è distribuito ben oltre la zona progettata, a quella di destra dove il fenomeno è molto più contenuto.

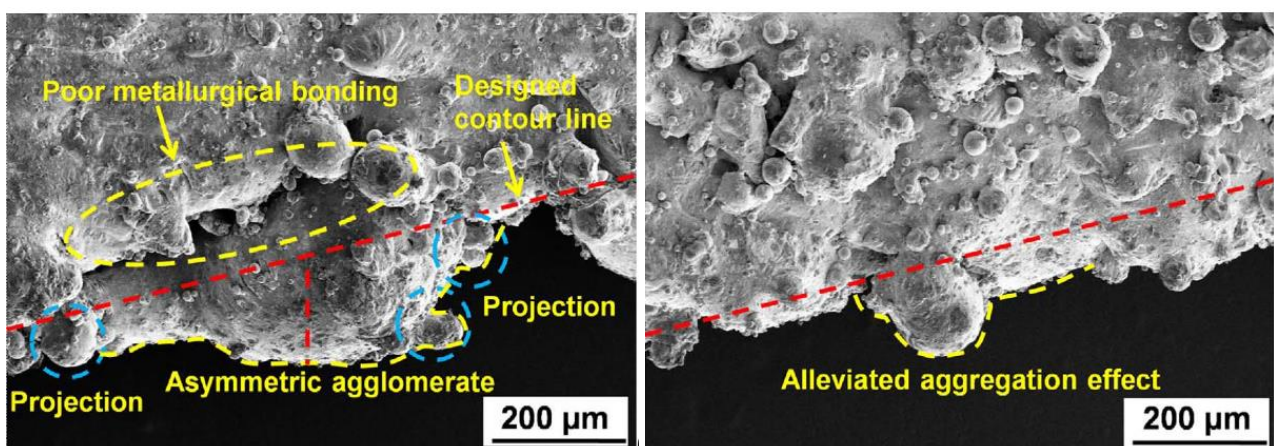


Figura 16 Foto al SEM del fenomeno di dropping in differenti condizioni termiche

Tuttavia, per inclinazioni superiori a 135° è necessario apporre delle strutture di supporto. Mediante queste strutture sarà possibile drenare il calore residuo riducendo i tempi di solidificazione e, di conseguenza, i tempi in cui il liquido permane tale. Il fenomeno del dropping sarà in questo caso contenuto.

In Figura 17 l'oggetto è stato prodotto senza alcuna struttura di supporto: come è ben evidente molte zone si sono distaccate dalle superfici inferiori procurando difetti inaccettabili.



Figura 17 Effetto della mancanza delle strutture di supporto per superfici completamente aggettanti

Naturalmente i fenomeni fin qui descritti si verificano sempre in modo accoppiato. Come ultimo esempio si riporta l'oggetto di Figura 18: si tratta di una superficie aggettante la cui base è molto sottile [6]. Nonostante la zona aggettante è molto contenuta, si verifica un non trascurabile effetto di dropping poiché il calore accumulato, sebbene ridotto, non può essere smaltito con sufficiente velocità dalla piccola sezione di base. Questo è un esempio in cui la geometria del pezzo deve essere analizzata nel complessivo e non si possono dare delle regole generiche adottabile per singola parte geometrica.

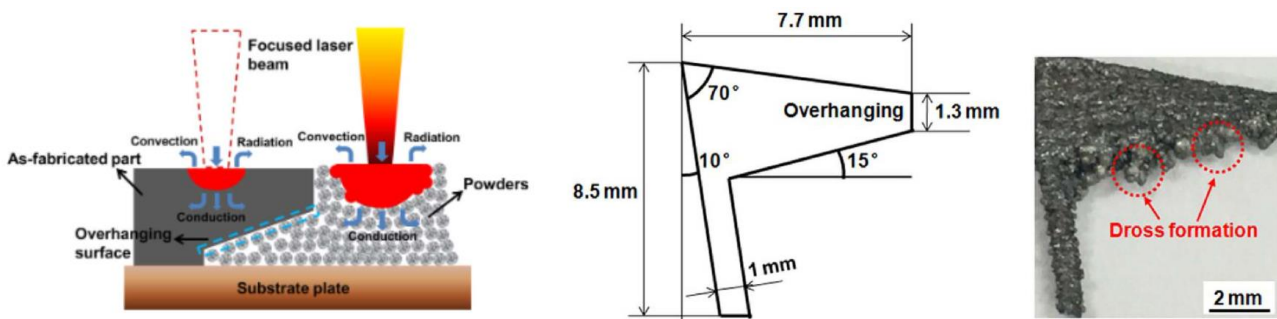


Figura 18 Struttura aggettante caratterizzata da una piccola base.

2.4.2 Strutture di supporto nel Selective Laser Melting

La piattaforma Magics è dotata di un modulo apposito per la generazione delle strutture di supporto. I supporti generati sono direttamente compatibili con le macchine EOS che utilizzano il formato SLI e CLI. Il generatore di supporto consente di generare supporti per un'intera piattaforma e quindi modificare il supporto su ciascuna superficie singolarmente. Questa routine di lavoro di generazione del supporto consente di adattare facilmente i supporti anche dopo che il pezzo è stato sostituito sulla piattaforma di costruzione. Il supporto è necessario solo su determinate superfici. I parametri di generazione del supporto sono cruciali durante la generazione iniziale del supporto automatico, ma possono essere modificati per ogni singolo supporto. In primo luogo, è possibile adattare i parametri di costruzione, che sono definiti in modo interattivo nel setup della macchina. In secondo luogo, è possibile rimuovere parti del supporto in 3D o rimuovere e, se necessario, ridisegnare parti del supporto nella finestra di modifica 2D. La sequenza operativa segue i seguenti passaggi:

1. Definizione della selezione e dei parametri costruttivi nel Setup Macchina

2. Generazione automatica del supporto
3. Modifica dei tipi di supporto e dei parametri di costruzione
4. Editing 2D e 3D dei supporti
5. Salvataggio ed esportazione dei supporti.

Nel Selective Laser Melting la tipologia standard di supporto è il block. Si tratta di strutture scatolari di facile implementazione impiegabili per piccole e grandi superfici. In Figura 19 è riportata la finestra di generazione da cui si accede all'editing bidimensionale: poiché sono strutture estruse la modifica è molto più semplice che per altre tipologie. Inoltre, queste strutture sono facili da rimuovere proprio perché cave.

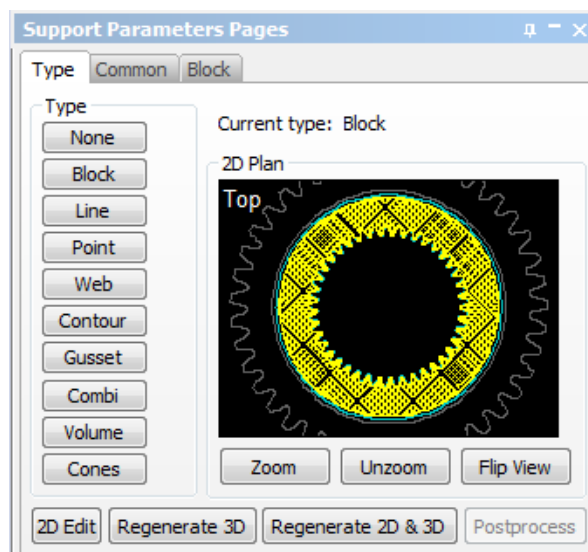


Figura 19 Supporti di tipo block

La struttura di tipo block è preferibile per la semplicità con cui si possono selezionare i parametri di processo generanti la struttura stessa. Tra i parametri più importanti vi è la distanza di hatching che definisce lo spazio tra le celle così come schematizzato in Figura 20.

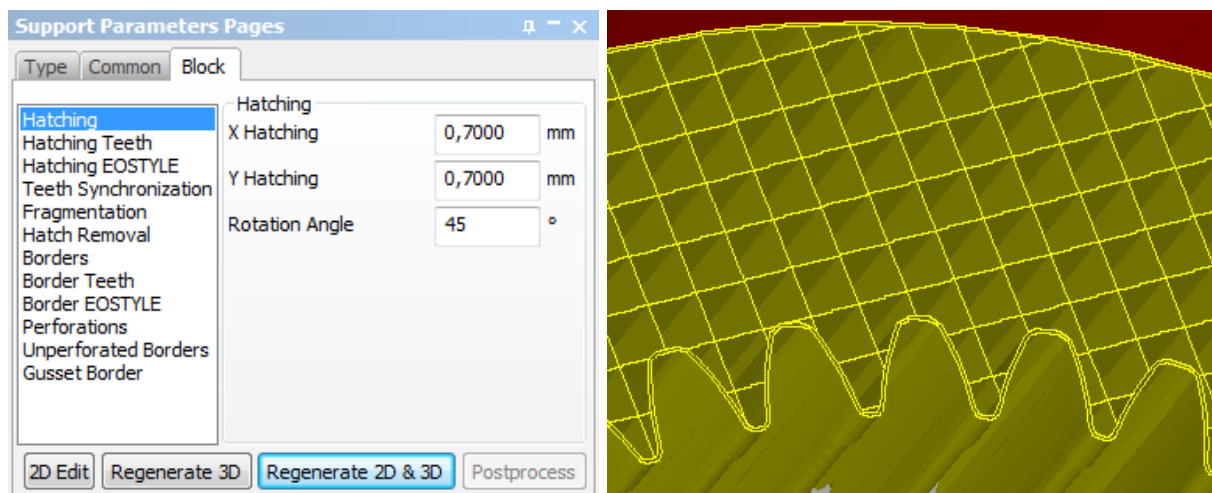


Figura 20 Distanza di hatching nelle strutture di tipo block

Maggiore è tale distanza maggiore sarà lo svuotamento della struttura e minore sarà la sua capacità di dissipare il calore. Anche la sgretolabilità in fase di rimozione è direttamente affetta da tale parametro.

Naturalmente si tratta di fattori contrastanti ma molto spesso non può essere fatto un bilanciamento: infatti, come mostrato al precedente paragrafo le strutture di supporto hanno come primo compito lo smaltimento del calore; pertanto, la distanza di hatching deve essere stabilita in merito a tale scopo. Ovviamente, durante la rimozione di possono creare delle situazioni poco agevoli, spesso dovute alla scarsa accessibilità di alcune zone. In tali condizioni ci si deve rivolgere alla tecnica della frammentazione in cui le strutture vengono separate in sottostrutture così come mostrato in Figura 21. In fase di rimozione dei supporti sarà possibile agire su ogni sottostruttura singolarmente agendo con sollecitazioni concentrate e, di fatto, molto più piccole. Inoltre, lo stato di sollecitazione indotto non sarà trasferito fino al modello data la separazione fisica tra le sottostrutture. Ciò ridurrà enormemente la possibilità di lesionare il prodotto finale durante le operazioni di distruzione delle strutture di supporto.

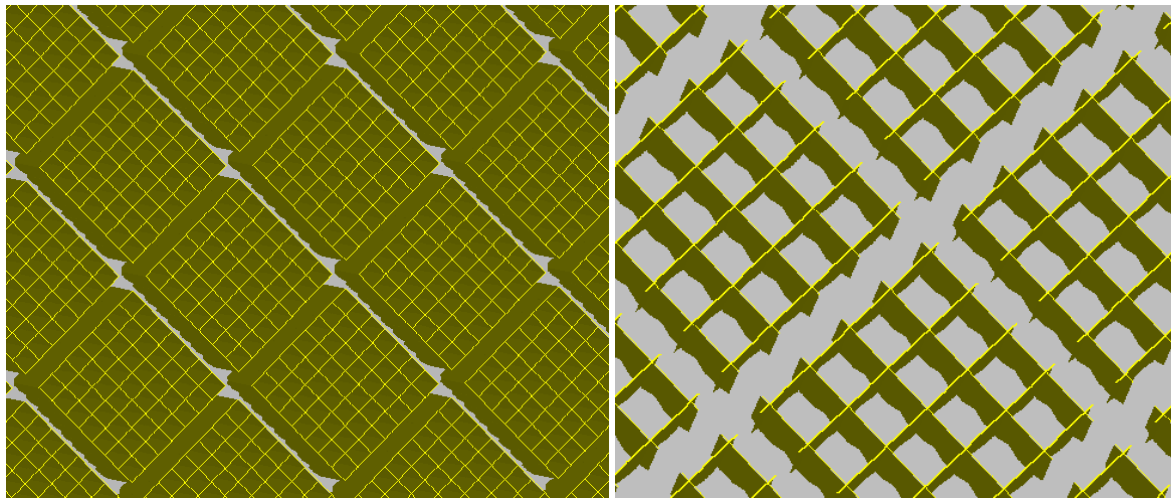


Figura 21 Tecnica della frammetazione delle strutture di supporto di tipo block

Un'importante caratteristica della zona di interfaccia e la superficie della parte da sostenere è la facilità di rompersi sotto l'azione di sollecitazione. Ciò è ottenibile conferendo nella sommità della struttura una geometria a punta: la riduzione di sezione risultante permetterà di concentrare la tensione massima proprio vicino all'interfaccia così da limitare il danneggiamento risultante sulla zona interessata. La definizione di tale geometria è riportata in Figura 22.

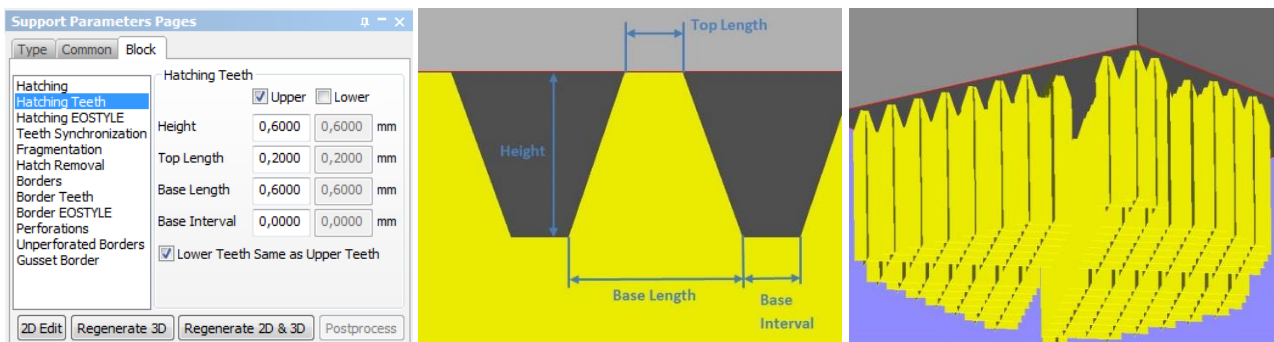


Figura 22 Denti di supporto nella tipologia block

Per alcune parti in cui esistano delle cavità è possibile che con una certa orientazione la generazione automatica richieda dei supporti tra superfici del pezzo piuttosto che tra la superficie aggettante e la piattaforma di fabbricazione. In questi casi le superfici affette dai supporti sono circa il doppio con conseguente aumento delle attenzioni da porre in fase di rimozione. Inoltre, nel caso di cavità difficilmente accessibile, la possibilità di danneggiare le superfici interne aumenta. È consigliabile effettuare delle modifiche manuali in questo caso: si tratta di spostare la superficie di proiezione del supporto all'esterno

del pezzo in modo che ricada su una zona libera della piattaforma. La Figura 23 mostra la finestra di dialogo di tale operazione, lo schema di un supporto spostato e un oggetto fisico prodotto con tali strutture.

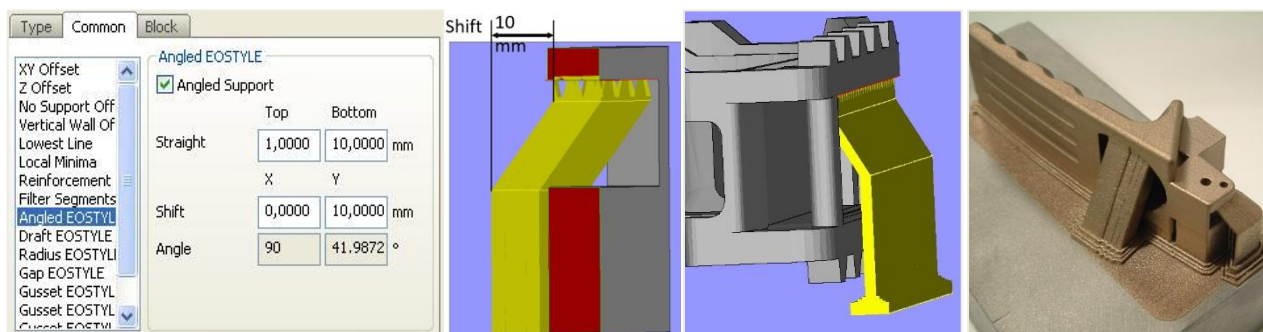


Figura 23 Spostamento delle strutture di supporto

2.4.3 Consigli e attenzioni pratiche

In questa sezione si vogliono dare delle indicazioni e consigli pratici da seguire in particolari casi in cui le strutture di supporto possono essere caratterizzate da criticità indotte dalla geometria del componente e dal suo posizionamento rispetto alla tavola di fabbricazione.

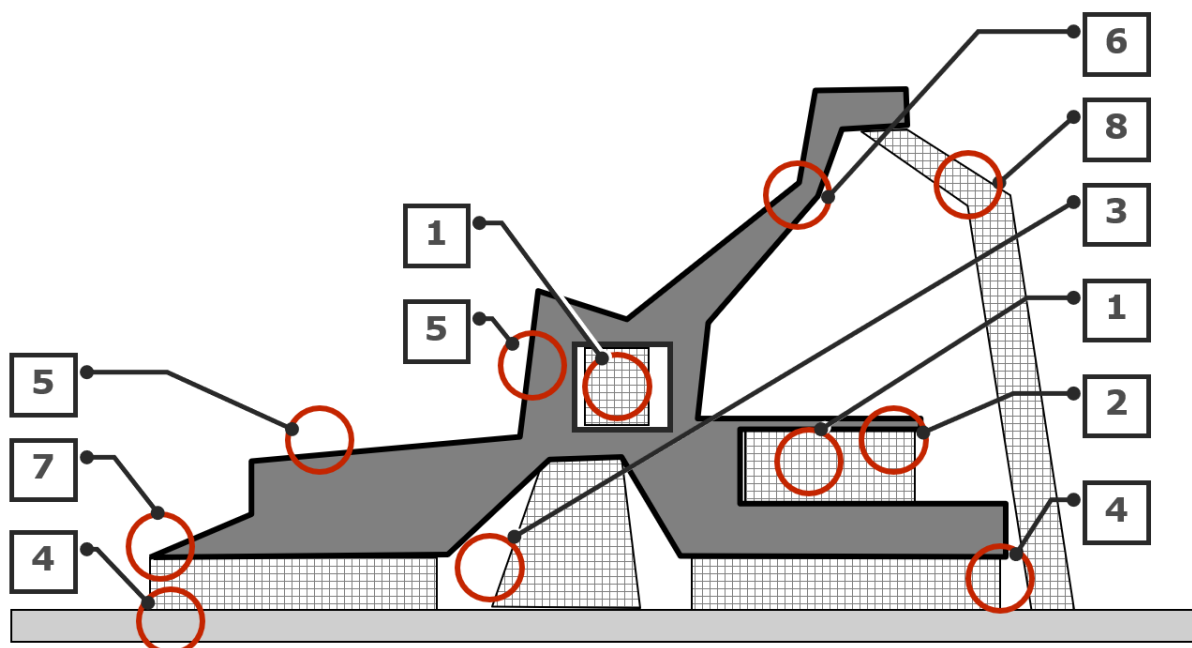


Figura 24 Schema illustrativo di possibili situazioni critiche delle strutture di supporto

Con riferimento alla Figura 24 si consideri la seguente casistica:

1. Problemi di rimozione dei supporti. Le zone indicate sono di difficile accesso pertanto è opportuno operare con supporti frammentati.
2. Come precedentemente evidenziato tali zone soffriranno di deformazioni indotte dalla scarsa capacità di drenare il calore generato. Si suggerisce un infittimento delle struttura operando con più bassi valori della spaziatura di hatch.
3. L'uso di strutture di supporto cave è caratterizzato dal fatto che esse si riempiono di polveri che non possono essere estratte se non durante la fase di separazione dalla tavola. Pertanto, occorre tenere presente nella scelta del dispositivo di taglio che tali quantità possono incendiarsi se assoggettate a taglio senza raffreddamento.

4. In queste zone le tensioni residue sono maggiori e, di conseguenza, è qui che possono crearsi delle situazioni di distacco. È opportuno aumentare le sezioni modificando i parametri o aggiungendo strutture in modo da contrastare tali tensioni.
5. Queste zone sono prive di supporti tuttavia lo stair-case è piuttosto marcato e, di conseguenza vanno considerate eventuali alternative se si tratta di superfici funzionali.
6. Tale parte della geometria ha la forma di un gancio. Nel posizionamento in tavola va considerata la direzione del recoater che potrebbe agganciare la parte se movimentata in verso opposto. In tal caso l'oggetto va ruotato rispetto all'asse Z fino ad ovviare a questa situazione.
7. I dettagli che si trovano in posizioni di estremità possono essere piuttosto delicati poiché assoggettati a gradienti termici elevati.
8. Lo spostamento delle strutture di supporto precedentemente descritto permette di ridurre le zone affette; tuttavia, l'allontanamento dalla zona di proiezione produce un allungamento delle strutture e conseguentemente uno snellimento delle stesse che potrebbero non essere più sufficienti a soddisfare il requisito di stabilità.

2.5 Il nesting con le strutture di supporto

Come accennato in precedenza l'operazione di nesting deve poter posizionare le parti comprensive delle strutture di supporto senza perderne l'allineamento. L'esempio considerato nella sezione 2.3 viene ora considerato per la generazione di adeguati supporti. Ciascuna geometria è analizzata singolarmente così come riportato in Figura 25.

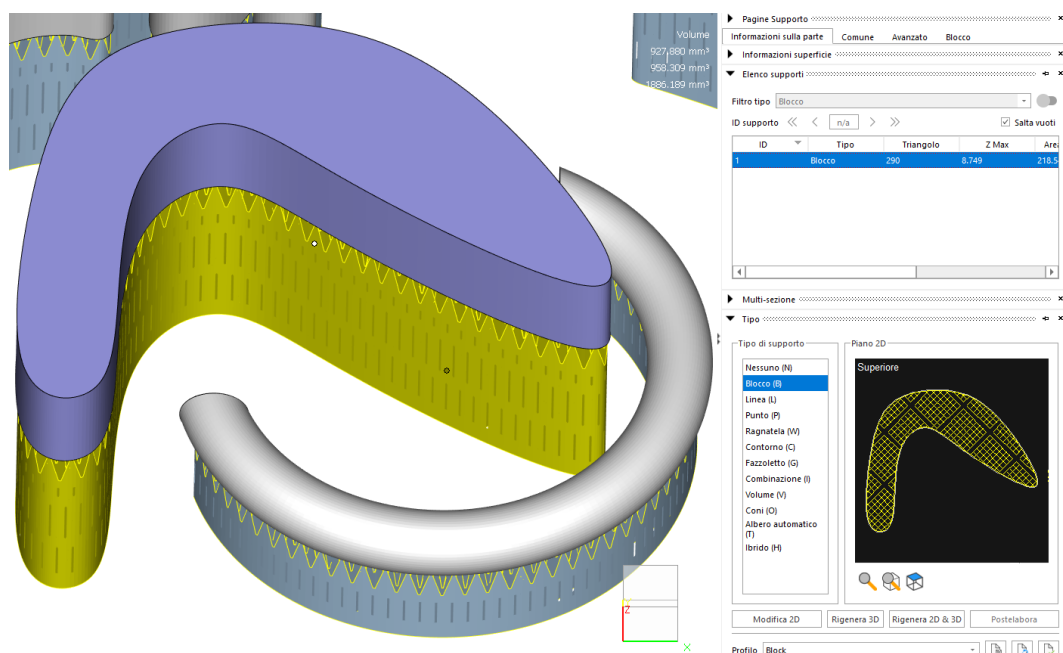


Figura 25 Generazione delle strutture di supporto per uno degli oggetti dell'esempio considerato nella sezione 2.3

Dopo la generazione dei supporti l'attivazione dell'algoritmo di nesting in grado di considerare le geometrie con possibilità di rotazione e con accentramento dei pezzi in tavola porta al risultato mostrato in Figura 26. Come si può notare le strutture di supporto hanno fedelmente seguito le rispettive parti senza perderne l'allineamento. Anche modificando i parametri dell'algoritmo tale capacità non viene persa. In Figura 27 è mostrato il risultato dell'applicazione dello stesso algoritmo con minimo asse Y.

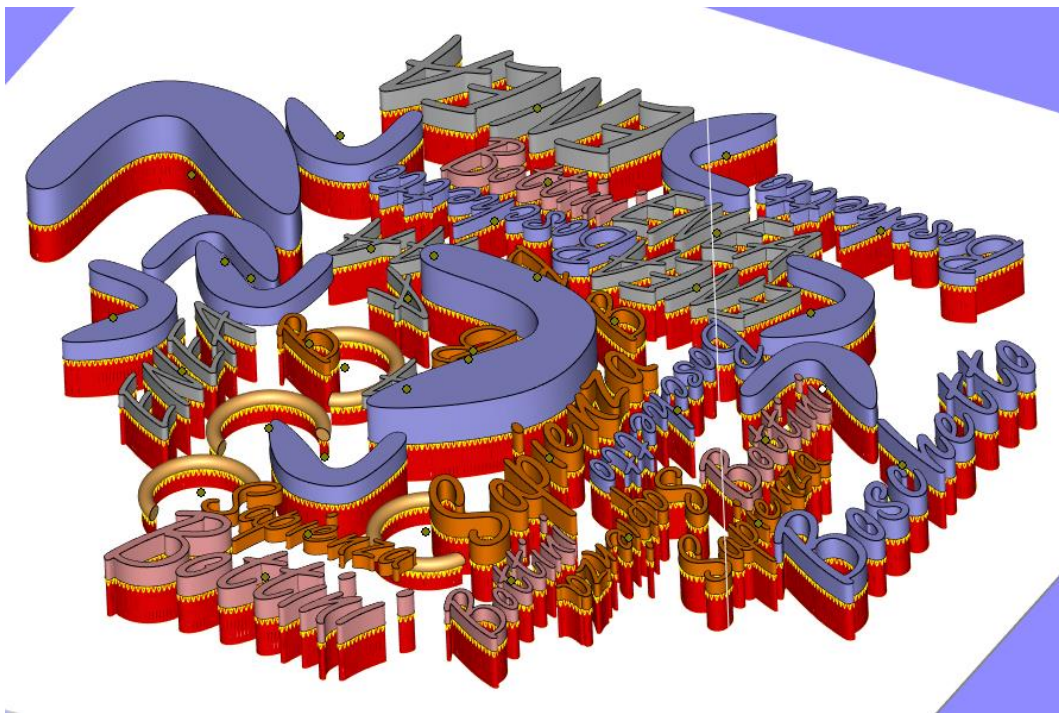


Figura 26 Applicazione del nesting al gruppo di oggetti con i relativi supporti

Come si può notare l'addensamento di strutture è considerevole. È opportuno effettuare la verifica di collisioni poiché portare in macchina oggetti compenetranti costituisce un criticismo in grado di portare danneggiamenti alle parti o anche bloccare la lavorazione poiché una stessa zona sarà assoggettata ad una doppia scansione creando distorsioni, surriscaldamenti o anche collassi.

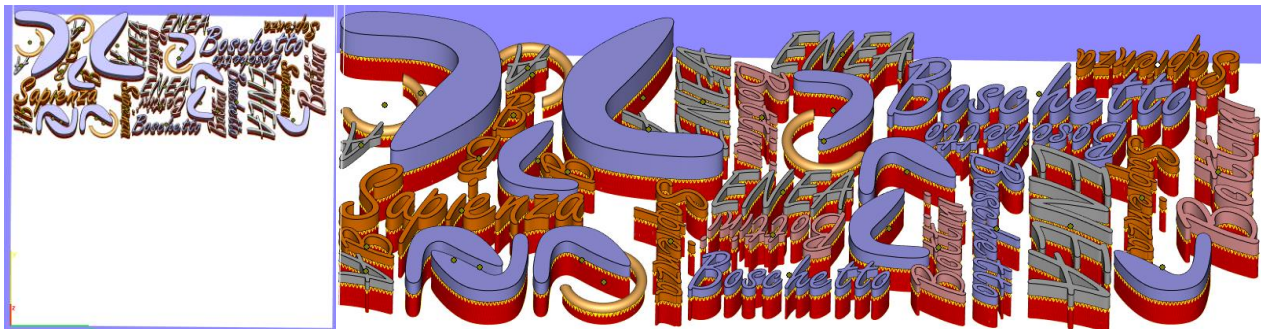


Figura 27 Applicazione del nesting con minimo asse Y

La Figura 28 mostra l'analisi di collisione per la piattaforma di produzione dell'esempio precedente. Le parti non hanno sovrapposizione così come le strutture di supporto. Ciò significa che il procedimento finora descritto risulta affidabile e può essere vantaggiosamente utilizzato nel processo di Selective Laser Melting. Va inoltre considerato che la piattaforma consente il salvataggio degli oggetti ora creati in file di tipo CLI e SLI utili nel caricamento su sistemi EOS. In tali salvataggi i riferimenti assoluti degli oggetti vengono conservati e, pertanto, il nesting così creato viene portato in macchina.

Nella sezione 2.3 è stato considerato il nesting denominato 2.5 ovvero un annidamento in cui si consente all'algoritmo di ruotare gli oggetti rispetto agli assi X e Y oltre che Z. Si sono già espresse le osservazioni negative in merito all'automazione dell'orientazione del pezzo che è preferibile da effettuarsi prima del nesting in modo da gestire gli effetti sulla qualità del pezzo.

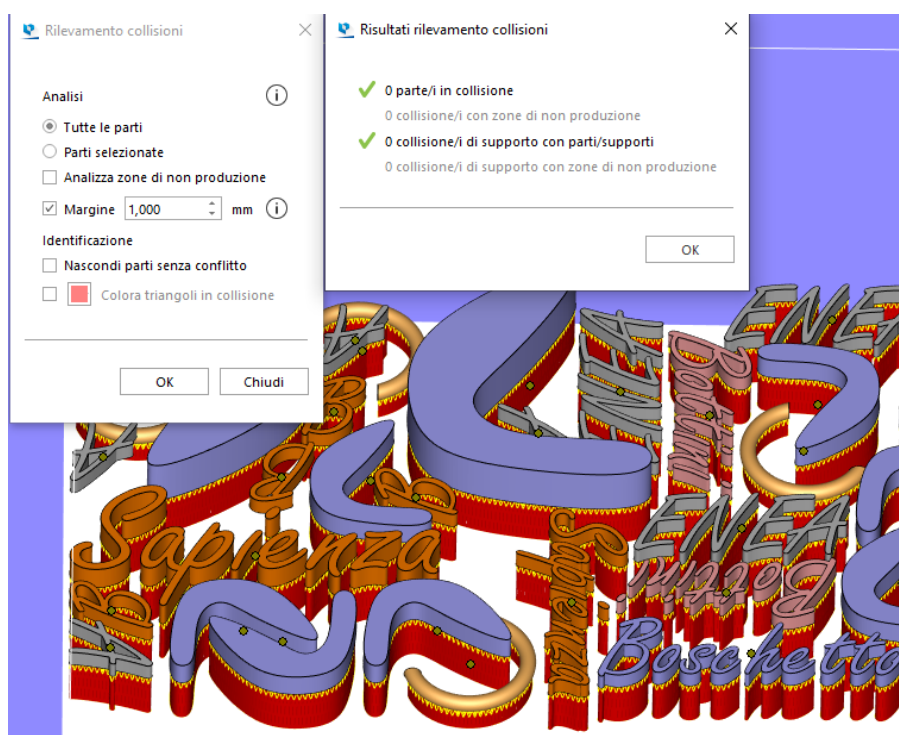


Figura 28 Verifica delle collisioni dopo il nesting con spostamenti e rotazioni

In Figura 29 è mostrato il risultato dell'applicazione del metodo euristico e solo successivamente sono state generate le strutture di supporto. Verosimilmente non è possibile effettuare le operazioni in ordine inverso poiché l'algoritmo modifica l'orientazione delle parti.

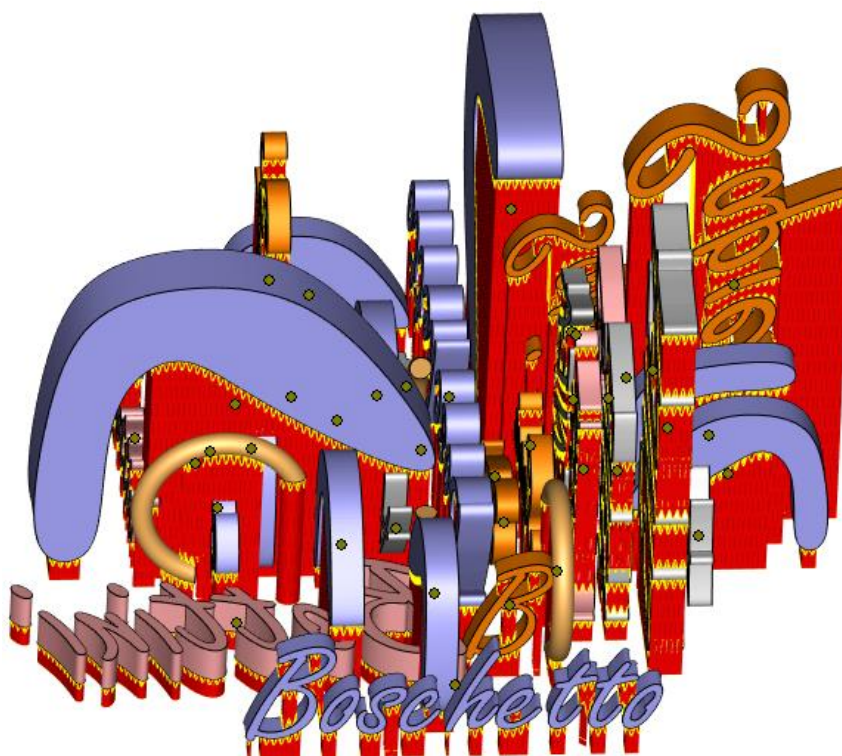


Figura 29 Applicazione del nesting multi-rotazione alle parti con le relative strutture di supporto

Sfortunatamente la sequenza descritta non è scevra di problemi. In questo caso l'analisi delle collisioni porta a ben 28 compenetrazioni tra le strutture di supporto. Ciò costituisce un criticismo che, aggiunto alle precedenti osservazioni, fa scartare questo metodo tra quelli preferibili per il nesting.

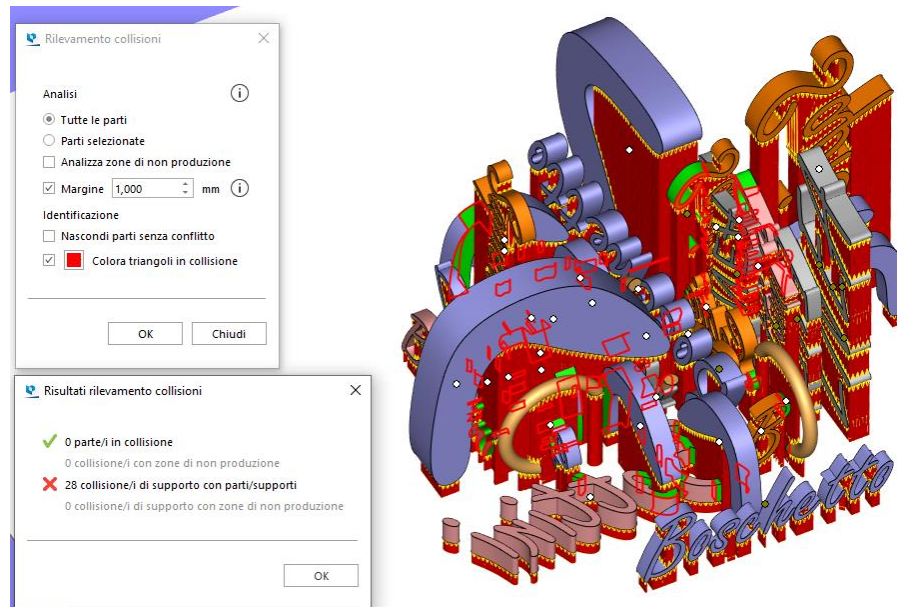


Figura 30 Verifica delle collisioni per il nesting multi-rotazione

2.6 Calcolo dei tempi di produzione con lotti annidati

Il modello di II livello sviluppato nel precedente anno si è rivelato piuttosto soddisfacente nella predizione dei tempi di produzione. L'esempio di cui ai precedenti paragrafi verrà qui sottoposto a questo tipo di analisi. In Tabella 1.

Tabella 1 Misure della superficie, del volume e delle dimensioni dei componenti dell'esempio trattato

Nr.	Name	Dimensions	View
1	1_Rescaled(0.3)	Size : 25.831x21.435x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
2	1_Rescaled(0.3)	Size : 21.435x25.831x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
3	1_Rescaled(0.3)	Size : 21.435x25.831x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
4	1_Rescaled(0.3)	Size : 25.831x21.435x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
5	1_Rescaled(0.3)	Size : 25.831x21.435x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
6	1_Rescaled(0.3)	Size : 25.831x21.435x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
7	1_Rescaled(0.3)	Size : 25.831x21.435x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
8	1_Rescaled(0.3)	Size : 21.435x25.831x4.246 mm Volume : 927.880 mm ³ Surface : 815.369 mm ²	
9	1_Rescaled(0.3)_Rescaled(2)	Size : 42.870x51.662x8.492 mm Volume : 7423.040 mm ³ Surface : 3261.474 mm ²	

10	1_Rescaled(0.3)_Rescaled(2)	Size : 42.870x51.662x8.492 mm Volume : 7423.040 mm ³ Surface : 3261.474 mm ²	
11	A_Rescaled(0.3)	Size : 11.625x14.563x3.000 mm Volume : 126.340 mm ³ Surface : 308.647 mm ²	
12	A_Rescaled(0.3)	Size : 11.625x14.563x3.000 mm Volume : 126.340 mm ³ Surface : 308.647 mm ²	
13	A_Rescaled(0.3)	Size : 14.563x11.625x3.000 mm Volume : 126.340 mm ³ Surface : 308.647 mm ²	
14	A_Rescaled(0.3)	Size : 14.563x11.625x3.000 mm Volume : 126.340 mm ³ Surface : 308.647 mm ²	
15	B_Rescaled(0.3)	Size : 14.656x11.271x3.000 mm Volume : 141.669 mm ³ Surface : 350.225 mm ²	
16	B_Rescaled(0.3)	Size : 11.271x14.656x3.000 mm Volume : 141.669 mm ³ Surface : 350.225 mm ²	
17	B_Rescaled(0.3)	Size : 11.271x14.656x3.000 mm Volume : 141.669 mm ³ Surface : 350.225 mm ²	
18	B_Rescaled(0.3)	Size : 14.656x11.271x3.000 mm Volume : 141.669 mm ³ Surface : 350.225 mm ²	
19	Bos_Rescaled(0.3)	Size : 53.688x14.656x3.000 mm Volume : 552.378 mm ³ Surface : 1509.982 mm ²	
20	Bos_Rescaled(0.3)	Size : 53.688x14.656x3.000 mm Volume : 552.378 mm ³ Surface : 1509.982 mm ²	
21	Bos_Rescaled(0.3)	Size : 14.656x53.688x3.000 mm Volume : 552.378 mm ³ Surface : 1509.982 mm ²	
22	Bos_Rescaled(0.3)_Rescaled(1.5)	Size : 80.531x21.984x4.500 mm Volume : 1864.277 mm ³ Surface : 3397.461 mm ²	
23	Bot_Rescaled(0.3)	Size : 14.656x38.510x3.000 mm Volume : 396.509 mm ³ Surface : 1066.955 mm ²	
24	Bot_Rescaled(0.3)	Size : 14.656x38.510x3.000 mm Volume : 396.509 mm ³ Surface : 1066.955 mm ²	
25	Bot_Rescaled(0.3)	Size : 38.510x14.656x3.000 mm Volume : 396.509 mm ³ Surface : 1066.955 mm ²	
26	Bot_Rescaled(0.3)_Rescaled(1.5)	Size : 21.985x57.766x4.500 mm Volume : 1338.219 mm ³ Surface : 2400.648 mm ²	
27	C_Rescaled(0.3)	Size : 23.161x22.460x2.849 mm Volume : 256.564 mm ³ Surface : 374.612 mm ²	
28	C_Rescaled(0.3)	Size : 22.460x23.161x2.849 mm Volume : 256.564 mm ³ Surface : 374.612 mm ²	
29	C_Rescaled(0.3)	Size : 22.460x23.161x2.849 mm Volume : 256.564 mm ³ Surface : 374.612 mm ²	
30	C_Rescaled(0.3)	Size : 23.161x22.460x2.849 mm Volume : 256.564 mm ³ Surface : 374.612 mm ²	
31	ENEA_Rescaled(0.3)	Size : 14.896x37.823x3.000 mm Volume : 464.648 mm ³ Surface : 1168.032 mm ²	
32	ENEA_Rescaled(0.3)	Size : 37.823x14.896x3.000 mm Volume : 464.648 mm ³ Surface : 1168.032 mm ²	
33	ENEA_Rescaled(0.3)	Size : 37.823x14.896x3.000 mm Volume : 464.648 mm ³ Surface : 1168.032 mm ²	

		SECRET - EYES ONLY	
--	--	--------------------	--

dur				modello infilli II livello										supporto						re				
yr	t ₀	t ₁	t ₂	Vo	I ₅	nn	SM	V	h	I	I	y	t ₀	t ₁	t ₂	S	nn	I	y	t ₀	t ₁	t ₂	h	t

Considerando il nesting effettuato alla sezione 2.5 Figure 26 e 27 è sufficiente sommare tutti i contributi

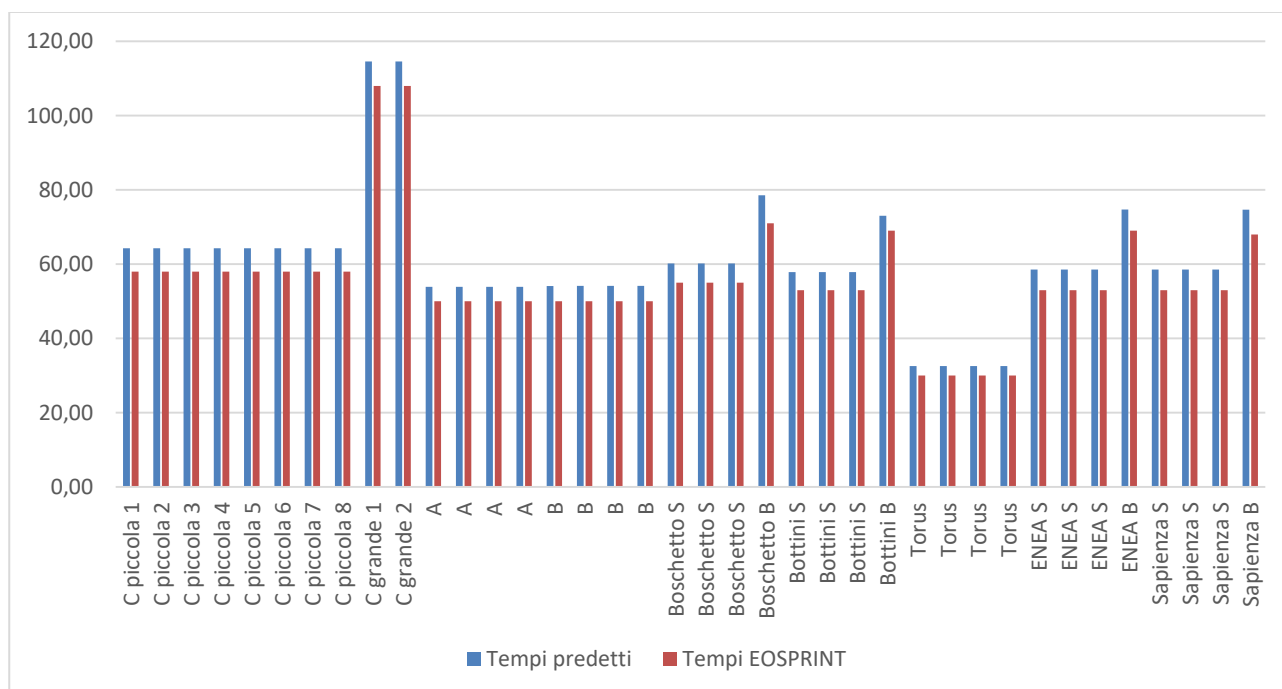


Figura 31 Istogramma dei tempi predetti e quelli simulati da EOSPRINT (in minuti) per ciascun componente

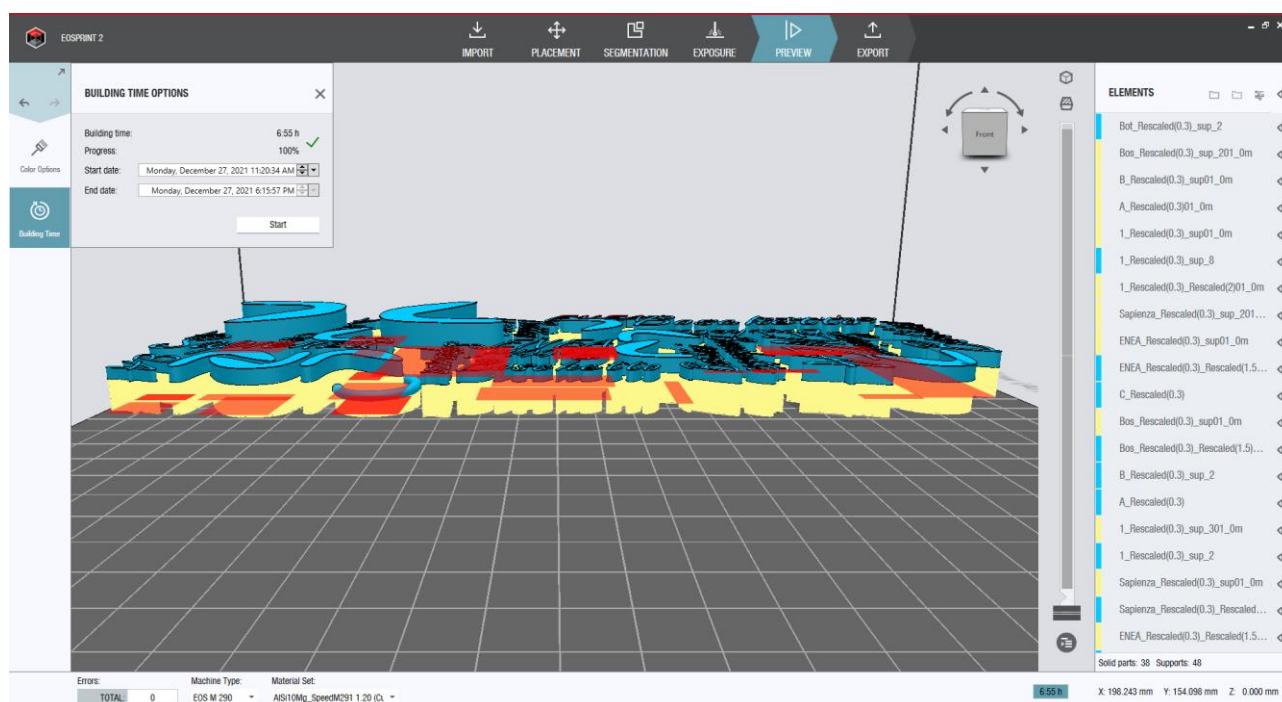


Figura 32 Simulazione sulla piattaforma di EOSPRINT

3 Attività LA2.2 Studio della produzione in Selective Laser Melting della palettatura della girante Pelton

3.1 Premessa

Questa attività prevede la progettazione di una girante in particolare. Nell'ambito del progetto si chiarisce come il sistema nel complesso debba essere flessibile e offrire una soluzione rapida ed economica alla produzione di giranti per specifiche applicazioni. In questo contesto il primo freno alla rapida esecuzione della pianificazione è la generazione del modello solido. In questa attività si fornirà un nuovo metodo per la progettazione parametrica della turbina in modo da poter avere un immediato riscontro del modello solido con la sola richiesta dei parametri di turbina in input. Tra le infinite possibili turbine ci si focalizzerà su una palettatura nello specifico in modo da portare avanti la fase di pianificazione del processo di fabbricazione. Ciascuno step verrà dettagliato: dal modello solido alla riparazione del file di interscambio, dall'orientazione del pezzo in tavola alla generazione delle strutture di supporto. Si applicheranno le tecniche di nesting per offrire la massima economia in una fabbricazione aggregata.

3.2 Progettazione della turbina

3.2.1 Caratteristiche di impianto

Prima di procedere ad esporre la procedura di progettazione standardizzata della turbina Pelton, si vuole introdurre il contesto di applicazione, a livello di impianto.

Per il dimensionamento della palettatura, i parametri fondamentali sono due:

- La portata nominale Q [l/s]
- Il salto H [m] disponibile

Una rappresentazione dettagliata, con le caratteristiche ed i parametri fondamentali, è schematizzata nella Figura 33.

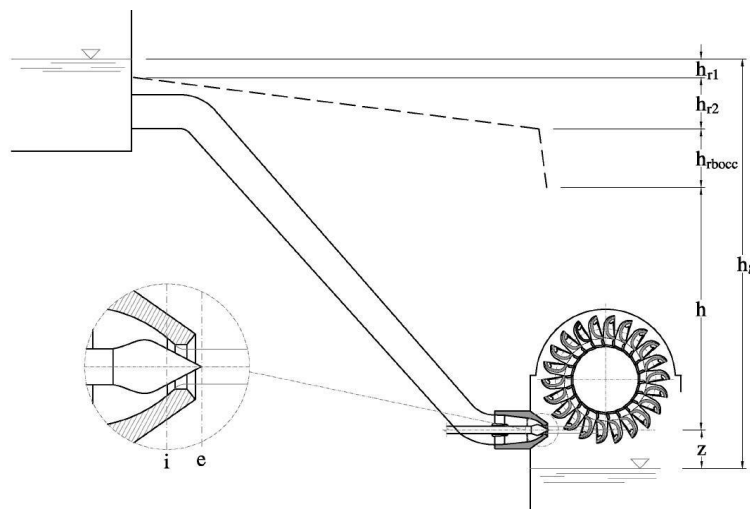


Figura 33 Rappresentazione schematica dell'impianto

I parametri sono:

- h : salto idrico sfruttabile
- h_g : quota geodetica
- h_{r1} : perdite all'imbocco
- h_{r2} : perdite nella condotta forzata
- z : perdite allo scarico
- h_{rbocc} : perdite di carico nell'ugello introduttore

Questi vanno ad interagire tra loro attraverso la seguente espressione che esprime l'uguaglianza tra la caduta idrica e l'energia a monte dell'introduttore:

$$h = \frac{P_i}{\rho \cdot g} + \frac{c_i^2}{2 \cdot g} = h_g - z - h_{ri}$$

Applicando il teorema di Bernoulli tra le sezioni a valle e a monte, la precedente equazione diventa:

$$h = \frac{P_i}{\rho \cdot g} + \frac{c_i^2}{2 \cdot g} = h_g - z - h_{ri} = \frac{c_e^2}{2 \cdot g} - h_{rbocc}$$

Dove la velocità all'uscita vale $c_e = \phi_u \sqrt{2gh}$ e il coefficiente di efflusso ϕ_u si aggira intorno ai valori 0.96 / 0.98.

Nota la portata "Q" e il numero di ugelli "i", si può ricavare l'espressione del diametro del getto d_0 che funge da parametro fondamentale, nella progettazione standardizzata per il dimensionamento del cucchiaio che si andrà ad affrontare nel paragrafo seguente.

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi i c_1}}$$

Per poter fare la scelta più corretta sul tipo di turbina da installare, si procede nel seguente modo:

- l'equazione della portata espressa come in seguito:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} i \phi_u \sqrt{2gh}$$

- e facendo riferimento al numero tipico della macchina K dato da:

$$K = 2,1 k_u \sqrt{2i} \sqrt{\phi_u} \frac{d}{D}$$

Questo valore oscillerà in relazione proprio al rapporto d/D , dove con d viene indicato il diametro del getto e con D quello della girante, seguendo il grafico riportato in Figura 34.

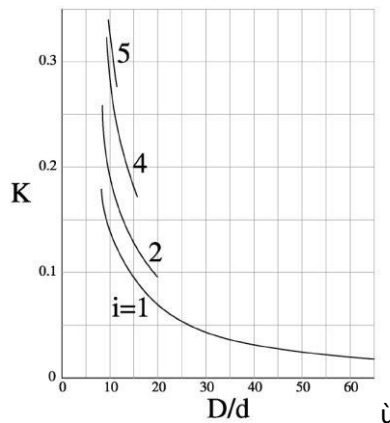


Figura 34 Grafico Rapporto diametri/ K

L'intervallo ottimale di funzionamento delle macchine, che operano con maggior rendimento, si colloca tra il valore del rapporto pari all'intervallo 10÷14, anche se la pratica suggerisce valori inferiori a 7. Si può osservare come un aumento del numero di iniettori vada ad ampliare il campo di interazione più favorevole tra getto e pala. Osservando le relazioni, sopra descritte, possiamo intuire come un aumento di potenza richieda un numero di ugelli maggiore per operare a maggior efficienza e quindi con rapporti geometrici ottimali. Da questa considerazione ne deriva che, per grandi potenze sviluppate, si necessita di una installazione ad asse verticale della macchina motrice in modo da ottenere il funzionamento omogeneo di più getti contemporaneamente.

Come ultimo aspetto, inerente al funzionamento della ruota, si fa riferimento al "triangolo delle velocità", come rappresentato nella Figura 35.

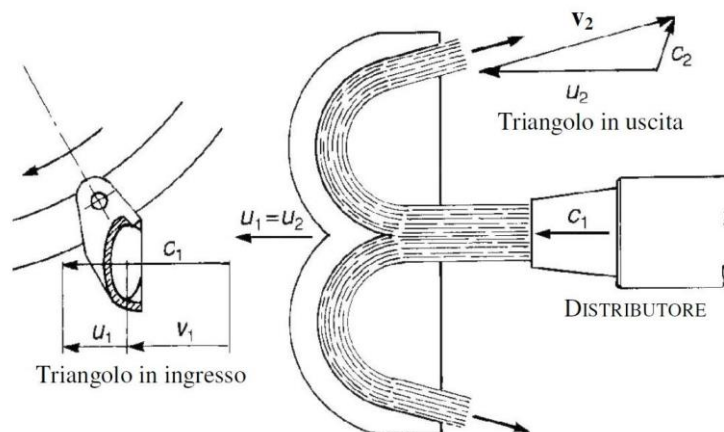


Figura 35 Rappresentazione del triangolo delle velocità per il getto incidente sulla paletta

Il pedice “1” si riferisce alla sezione di ingresso e quello “2” a quella in uscita.

Per effettuare lo studio vengono fatte due semplificazioni: la prima riguarda il comportamento del getto che viene assunto uniforme in tutta la sua sezione e pari proprio al suo filetto liquido centrale; mentre la seconda prevede che la pala intercetti il getto ortogonalmente. Quindi, l’acqua uscente dalla condotta viene considerata con tutta l’energia disponibile data dal salto H , che viene quindi trasformata in energia cinetica. Pertanto, la velocità di uscita del getto dal distributore assume il valore teorico:

$$c_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Nella realtà, quando l’acqua attraversa il distributore, subisce delle piccole perdite di energia. Di tali perdite se ne tiene conto introducendo il coefficiente di efflusso $\varphi = 0,96 \div 0,98$, per cui in definitiva, la velocità reale d’uscita del getto dal distributore assume il valore reale

$$c_1 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Quindi, il getto di sezione circolare con diametro d , colpisce ognuna delle pale disposte lungo la periferica della girante, in modo da ridurre al minimo gli urti in ingresso.

Per quanto riguarda la velocità periferica u , a livello teorico, il massimo valore del rendimento si ottiene ponendola pari alla metà della velocità del getto c_1 . In realtà, nella pratica, si è constatato come il rendimento massimo avvenga per valori di velocità periferica pari a:

$$u = (0,46 \div 0,48) \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Dopo di che si può esprimere l’uguaglianza tra la velocità relativa v e la differenza tra la velocità assoluta c e quella periferica u , poiché, come visibile dalla Figura 36, sono tutte parallele tra loro all’ingresso. In formule ne segue:

$$v_1 = c_1 - u_1$$

Invece, in uscita, entra in gioco un angolo β_2 che si forma tra la velocità periferica e quella relativa. Questo è causato dal fatto che quando il getto arriva, si interfaccia con il tagliente che divide il getto in due e, grazie proprio alla forma ellissoide del cucchiaio, viene curvato e fatto defluire fuori. Questo meccanismo è quindi proprio alla base del funzionamento della Pelton.

Come da quanto spiegato sopra, ciò che accade prevede l’incontro tra il getto, con velocità assoluta c_1 , e la pala I nel punto b_0 . Proprio per mezzo dell’intaglio e della sua funzionalità, le parti di getto uscenti vanno ad intercettare la pala II nel medesimo istante nel punto b_0' , mentre I raggiunge b_1 . Quindi la particella che raggiunge la II compirà un tragitto $b_1 b_0'$.

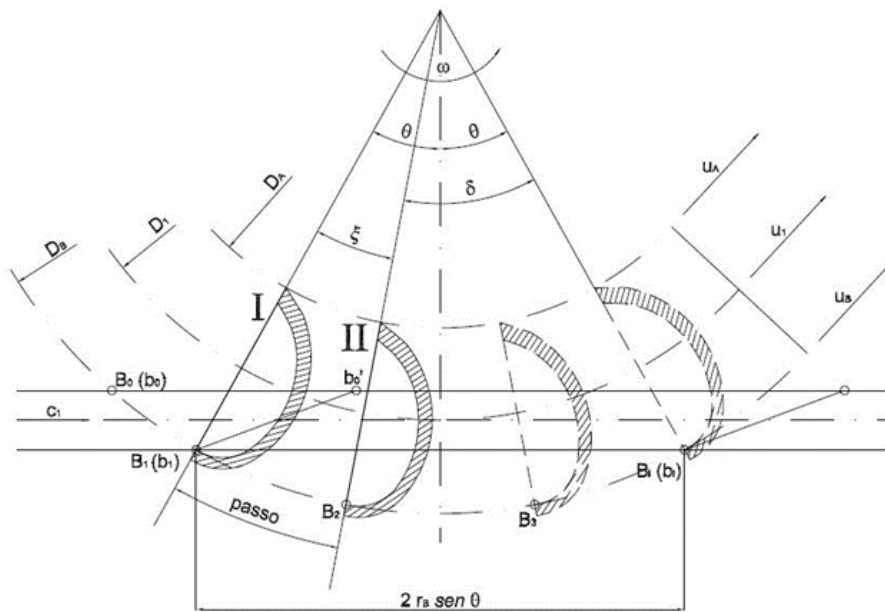


Figura 36 Rappresentazione funzionamento Turbina Pelton

3.2.2 Procedura standardizzata

A La turbina Pelton, tra le varie tipologie di macchine idrauliche, è caratterizzata da un principio di funzionamento piuttosto semplice ed intuitivo, seppur con grandi difficoltà progettuali. Proprio per tali difficoltà si è arrivati ad affidarsi a relazioni empiriche sempre più perfezionate.

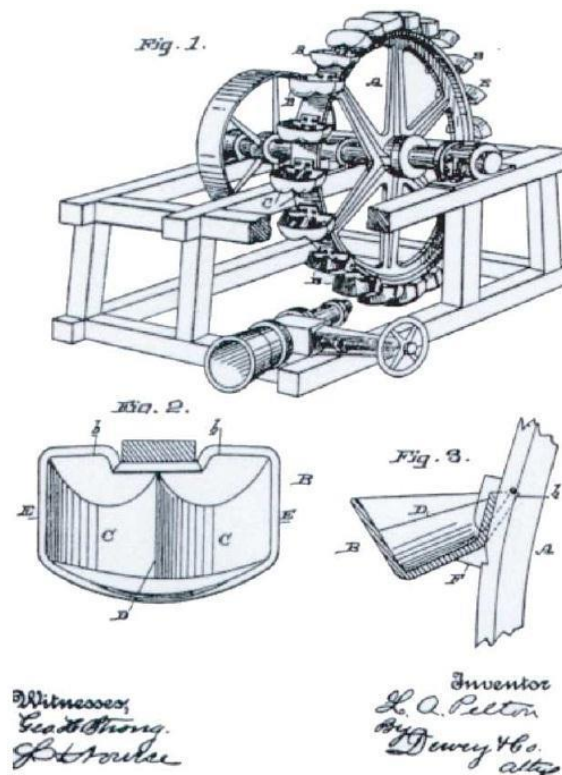


Figura 37 Rappresentazione primo prototipo turbina Pelton

Il principio del funzionamento della turbina Pelton risale ai mulini posizionati su corsi d'acqua per piccole applicazioni meccaniche. Infatti, dal punto di vista progettuale, inizialmente questi "impianti" erano costituiti da una ruota idraulica con delle lastre piane imbullonate su cui veniva convogliata l'acqua per poi andarne a sfruttare la forza. L'inefficienza data da tale forma, spinse Lester A. Pelton, nel 1889, a brevettare una girante con doppi cucchiai rettangolari posizionati sulla circonferenza della ruota idrica.

3.2.3 Dimensioni caratteristiche del cucchiaino

Per quanto riguarda la progettazione del cucchiaino, in letteratura sono disponibili diverse correlazioni geometriche, di natura empirica, fra le principali dimensioni del cucchiaino, tutte in relazione alla dimensione del getto d_0 , la grandezza geometrica di riferimento.

In sede progettuale si deve tenere in considerazione che una pala troppo grande (elevata larghezza B_2) porta ad una eccessiva superficie d'attrito, dato dal getto appiattito. Al contrario, se troppo stretta, l'eccessiva curvatura della vena deviata può portare ad un incrocio dei filetti che rende irregolare l'intersezione getto-pala. Di conseguenza le migliori condizioni si hanno con i rapporti riportati in Tabella 3, stilati da diversi scienziati in diverse epoche.

Tabella 3 Parametri di progettazione della Pelton per diversi scienziati

Vivier [1966]	$B_2 = (2.6 \div 3)d_0$	$L = (2.25 \div 2.8)d_0$	$P_r = (0.8 \div 1)d_0$	$B_1 = (1.2 \div 1.25)d_0$
Nechleba [1957]	$B_2 = (2.8 \div 4)d_0$	$L = (2.5 \div 2.8)d_0$	$P_r = (0.95)d_0$	$B_1 = (1.2)d_0 + 5 \text{ mm}$
Lo Presti [1922]	$B_2 = (3.5 \div 4)d_0$	$L = (2.25 \div 2.8)d_0 \cong 0.7 B_2$	$P_r = (0.9 \div 1.2)d_0$	
Rubbo [1957]	$B_2 = (3.5 \div 4)d_0$	$L = (2.25 \div 3)d_0$	$P_r = (0.9 \div 1.2)d_0$	
Buchi [1957]	$B_2 = (2.8 \div 4)d_0$	$L = (0.8 \div 0.85) B_2$	$P_r = (0.25 \div 0.3) B_2$	$B_1 = d_0 + (5 \div 10) \text{ mm}$
Zacchè [1981]	$\frac{D_1}{B_2} > 2.8$	$L = (2.45 \div 2.8)d_0 \cong 0.7 B_2$	$P_r = (0.9 \div 1.2)d_0$	

La Figura 38 mostra proprio la geometria della paletta della turbina Pelton con le misure determinate secondo la tabella, tenendo in considerazione che:

- a equivale a B_2
- b equivale a L
- d equivale a d_0
- c equivale a B_1

Le migliori condizioni si hanno con un rapporto pari a:

$$\frac{B_2}{d_0} = 3.5 \div 4.0$$

Bisogna tenere in considerazione che nella pratica spesso la turbina lavora parzializzata e, quindi, si andranno a preferire valori di tale rapporto più bassi, circa pari a:

$$\frac{B_2}{d_0} \cong 2.8 \div 3.2$$

Nella Figura 39 è riportato, in un grafico, l'andamento del rendimento rispetto al carico, al variare del valore di tale rapporto.

Per quanto riguarda lo spessore del cucchiaio “S”, nota l’estensione b della lamina e la velocità relativa media, si calcola seguendo la formula:

$$S = \frac{Q_c}{2v_2 b}$$

Dove la portata ricevuta dal cucchiaio vale:

$$Q_c = \pi \frac{d_0^2}{4} v_1$$

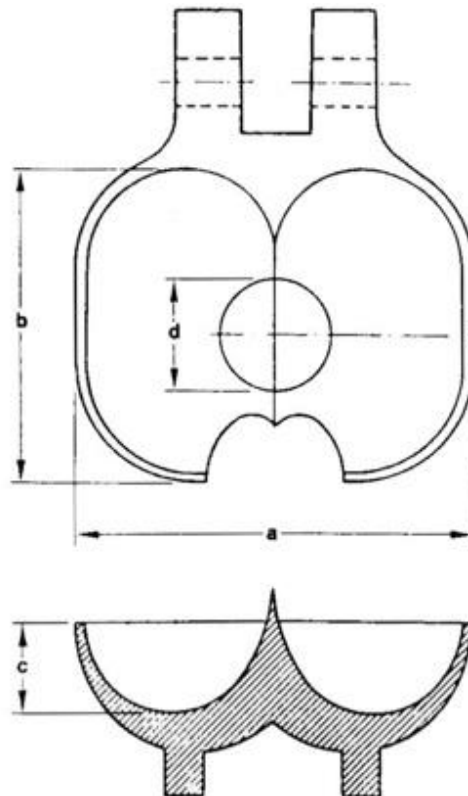


Figura 38 Rappresentazione geometrica della paletta di una Pelton

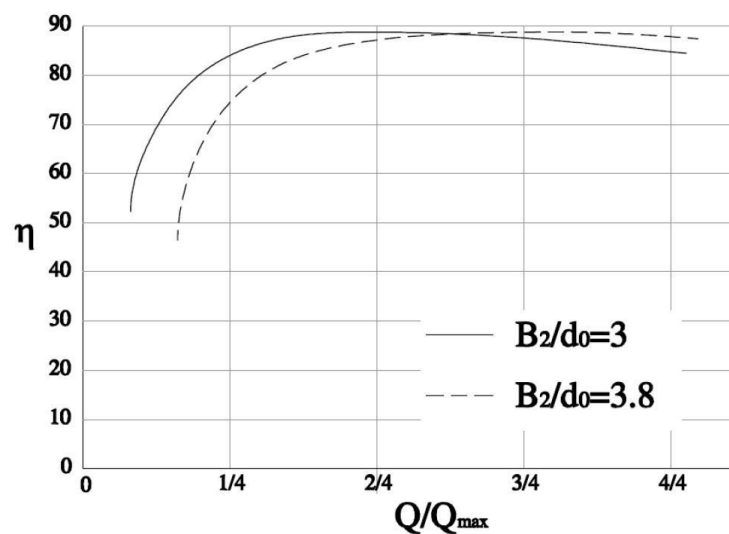


Figura 39 Grafico carico/rendimento

In letteratura, attraverso la relazione di Lo Presti, lo spessore “S” viene espresso proporzionalmente al diametro del getto:

$$S = (0,12 \div 0,15)d_0$$

Come ultima parte, relativa al cucchiaio, si va a definirne il numero di pale che si ripeteranno nella girante. Come nel caso della definizione di S, anche in questo, si possono trovare riscontri semplificativi in letteratura, infatti, N viene espresso da Vinier nel seguente modo:

$$N = \frac{D}{2 d_0} + 15$$

Con D calcolato seguendo la formula:

$$D = \frac{60 \cdot u}{n \cdot \pi}$$

3.2.3.1 Il tagliente

Prima della progettazione dell'intaglio, si vuole accennare all'importanza che ha avuto questa caratteristica propria della turbina Pelton.

La presenza del tagliente posizionato nel mezzo della pala fu una grande innovazione. Infatti, questo permetteva al cucchiaio di dividere il getto alimentante di 180°, producendo una maggior spinta. Allo stesso tempo, un grande problema progettuale era dato dal bordo d'ingresso che, andando a imprimere al fluido una brusca variazione di direzione, ne comportava un'azione frenante con annesse perdite di efficienza.

Un compromesso progettuale fu apportato da Abner W. Doble nel 1895, attuando delle sostanziali modifiche alla girante principale, attraverso l'introduzione di una pala a doppio cucchiaio con bordi curvilinei e superfici ellissoidali con un intaglio sul bordo d'ingresso. Questo fece sì che il getto entrante colpisse direttamente il tagliente andando a spalmarsi uniformemente sulla superficie, consentendo all'acqua di fuoriuscire senza colpire la pala successiva.

Con l'innovazione di Doble, la pala presenta un intaglio che favorisce l'entrata del getto nel cucchiaio. A livello progettuale, l'angolo di attacco del tagliente varia tra 20-24° per conferire al cucchiaio una resistenza e durata accettabile. Per quanto riguarda la forma, inizialmente era stato concepito come l'intersezione del getto con la superficie della pala nella posizione di primo ingresso, presentando un intaglio profondo con il tagliente sporgente anche in pianta. Questo portava ad un indebolimento della struttura e una divisione del getto prima che colpisse le pale precedenti, con conseguenti inefficienze. Quindi, nella pratica attuale, si progetta l'intaglio meno invasivo rispetto al getto cosicché possa colpire la pala precedente senza ostacoli, prima di essere intercettato dalla pala successiva. Ne consegue un aumento di efficienza, oltre che un incremento di solidità strutturale

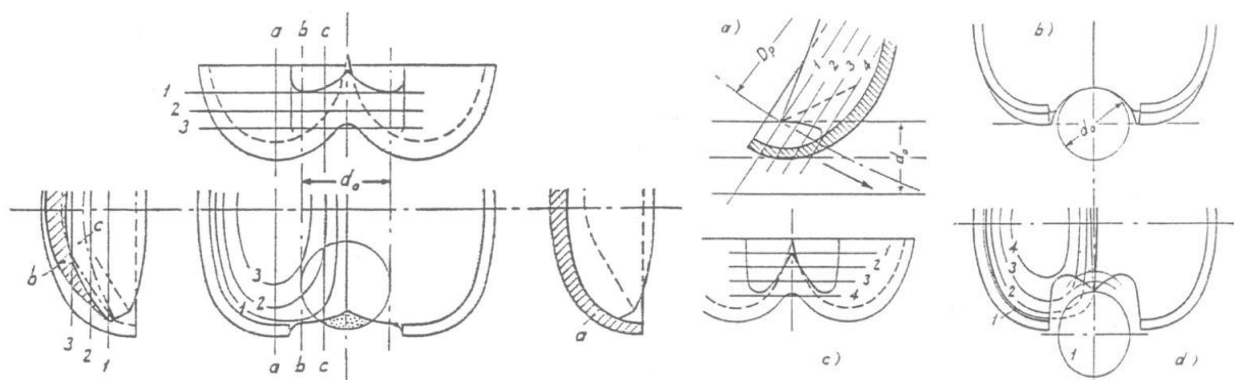


Figura 40 Rappresentazione e sezioni del tagliente e

3.2.3.2 Scelta dei parametri di progettazione

Dopo aver mostrato il percorso per la progettazione di una Turbina Pelton, si vogliono evidenziare i parametri che si sono scelti in questo caso specifico. Per semplicità si è riassunto tutto in un file Excel, rappresentato nella Tabella 4, in quanto utile nella realizzazione parametrica del pezzo.

In grassetto e sulla destra, emergono quindi le dimensioni caratteristiche della turbina Pelton.

Si sono posti più getti per ampliare il campo di interazione più favorevole tra getto e pala, in quanto il rapporto D/d risulta un po' al limite e quindi lo spazio tra le palette risulta poco.

Si ricorda che $D/d = 9/14$.

Tabella 4 Foglio di calcolo Excel per il dimensionamento standard della palette Pelton

		Salto	20	9,81	0,75	4,4145 P	Potenza meccanica all'asse 4,5kW
		Portata	0,03		0,5	2,943	Potenza ai morsetti 3,5 kW
		giri	1000	numero giri		49,67676 nc	numero di giri caratteristico
			0,96			19,016725 c1	velocità d'efflusso
			0,46			9,1121809 u	velocità periferica
			3,14			0,1741181 D	Diametro ruota 0,175
			4	6 getti		0,0183013 d	Ugello da 0,018
Parametri consigliati			Dimensioni pala				
3-4 d	→		3,5			0,0640546 a	Cucchiaio da 0,065°0,05 con incavi da 0,02
2,5-3 d	→		2,75			0,0503286 b	
1-1,2 d	→		1,1			0,0201314 c	
			Rapporto Diametro/ugello				
						9,5139667 D/d	Il rapporto è un po' al limite
			Numero Pale				
						19,756983 N° pale	20 pale

Risulterà un impianto come quello rappresentato nella Figura 41.

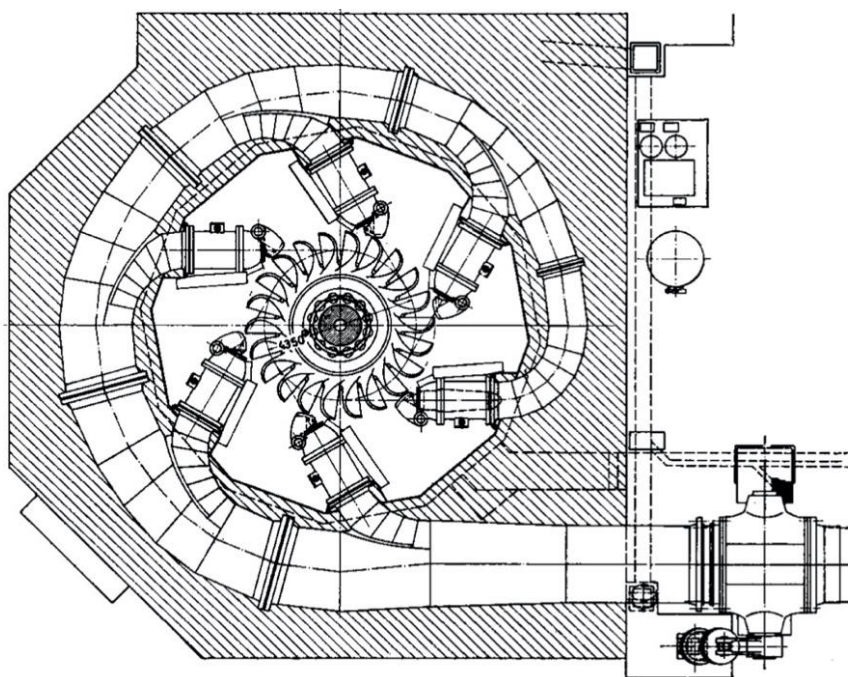


Figura 41 Esempio di impianto con 6 getti

Come controprova per la verifica della corretta scelta della tipologia di turbina e del numero di getti si va a guardare il numero di giri caratteristico:

- Pelton ad un getto <25
- Pelton a più getti 25-70
- Francis lenta 50-100
- Francis normale 100-200
- Francis Rapida 200-400
- Elica a pale fisse 400-700
- Kaplan a pale mobili 400-1300

Dove:

$$n_c = \frac{n \cdot \sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}}$$

e nel caso studiato è uguale a 50.

3.2.4 Modellazione solida

Il sistema CAD fa parte di una famiglia più grande che è quella dei CAX, dove X assume diversi significati, in base alla specifica branca di utilizzo come M (manufacturing), PP (production Planner) e E (engineering).

In linea generale il CAD riguarda un set di applicazioni che sono in grado di progettare componenti o assiemi. Solitamente questi programmi sono divi in tre ambienti:

- Modellazione solida di componenti (estensione .par)
- Assemblaggio (estensione .asm)
- Drafting (estensione .dft)

Tra i software più diffusi di tipo orizzontale (general purpose) si menzionano: SolidEdge, SolidWorks, Autodesk Inventor. Quest'ultimo è in dotazione completa al personale della Sapienza Università di Roma e pertanto viene scelto per il progetto in esame. Tuttavia, anche le altre piattaforme che consentono un disegno parametrico dei modelli solidi sono valide allo scopo.

3.2.4.1 Modellazione in ambiente Autodesk Inventor

Autodesk Inventor è un software di modellazione 3D per la progettazione meccanica, prodotto da Autodesk la software house produttrice di Autocad. Inventor è un software di progettazione meccanica 3D, o modellatore, che incorpora un modulo per la creazione di parti, un modulo per la creazione di assemblaggi delle stesse e il modulo per la messa in tavola, ovvero la realizzazione di un disegno con viste e tutte le quote necessarie per la realizzazione del pezzo. Per la realizzazione della turbina, si sceglie di lavorare in ambiente "parte" e si inizia la vera e propria progettazione del pezzo. Come prima cosa si realizza lo schizzo 2D, definendo il piano su cui verrà posizionato. In questo caso si procede con il disegno, sul piano yz, di una forma ellissoide dove le due grandezze principali sono note da progetto. Si vanno quindi a realizzare le curve base come mostrato in Figura 42.

Infatti, attraverso la quotatura si impongono le due grandezze fondamentali:

- b=25 mm
- c=20 mm

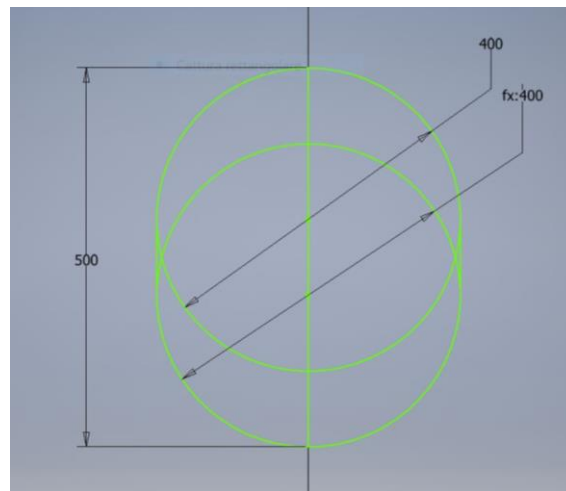


Figura 42 Schizzo 2D della paletta

A questo punto si procede con la funzione “dividi”, che va a spezzare la curva e ricollegarla con dei punti di giunzione. In questo modo si vanno a eliminare le parti che non servono con la funzione “taglia” e si crea una curva chiusa.

Concluso lo schizzo si procede, attraverso la funzione “rivoluzione”, alla formazione del cucchiaio dopo aver definito il profilo e l’asse intorno al quale avviene la rotazione (Figura 43).

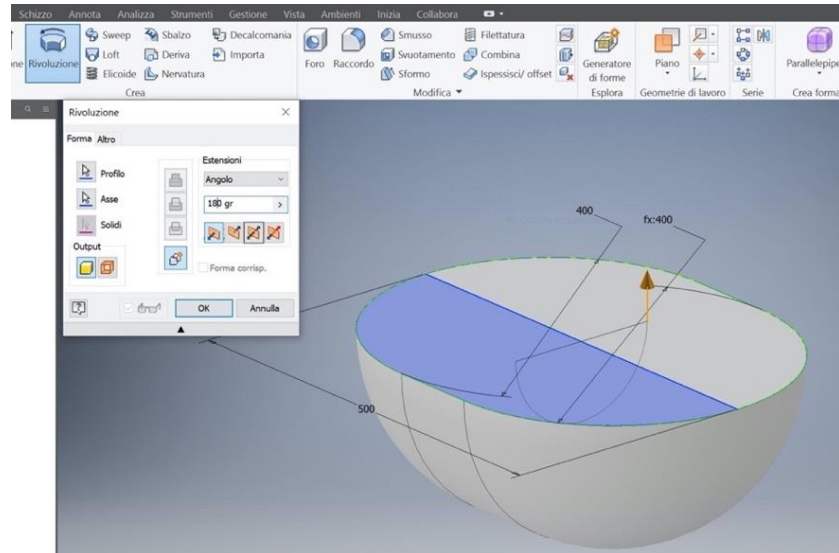


Figura 43 Esecuzione della rivoluzione dello schizzo 2D.

Attraverso la funzione “svuotamento” si va a creare un guscio. Infatti, dopo aver detto al programma quale catena prendere, si va a imporre uno spessore (Figura 44). Per facilitare il procedere della progettazione, si vanno a creare dei piani ausiliari, che si utilizzeranno nelle lavorazioni successive, ed anche un “sistema di coordinate dell’utente” (UCS). Infatti, è proprio grazie a quest’ultimo che si può definire il piano che andrà a creare la “duplicazione a specchio” del primo cucchiaio e che sarà posizionato ad una distanza:

$$e = \frac{a}{2} - c$$

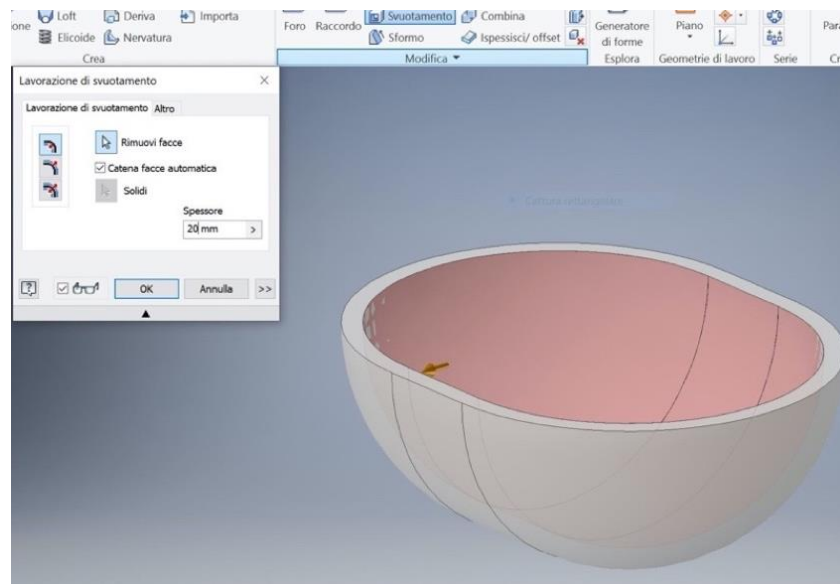


Figura 44 Creazione guscio attraverso lo svuotamento.

Andando a scegliere proprio questo piano e, attraverso l'ausilio della funzione "divisione", si procede con il taglio solido che porta all'esportazione della parte a destra del piano stesso, come mostrato nella Figura 45.

Per semplicità, la duplicazione si farà solo come ultimo step, in modo da avere viste più chiare e maggiore facilità di lavorazione, questo grazie alla simmetria della palette Pelton.

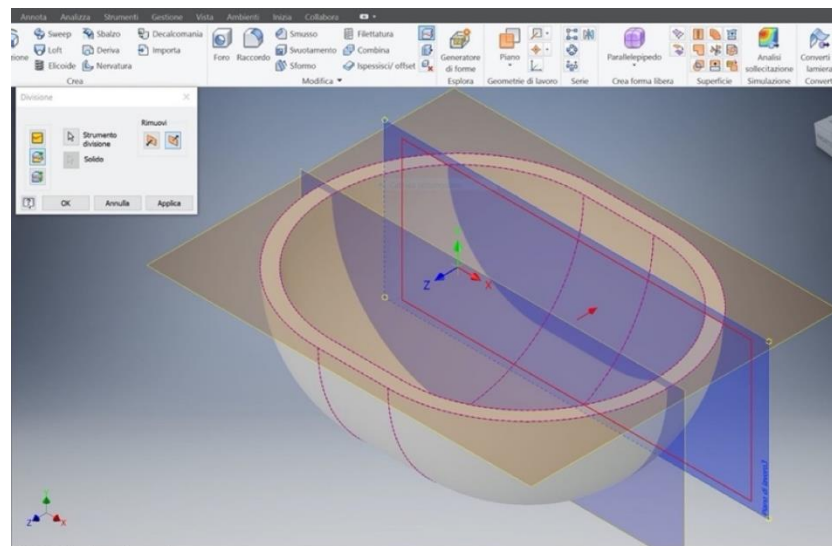


Figura 45 Creazione del piano di simmetria

A questo punto si deve andare a creare una giunzione, proprio dove si avrà simmetria, che poi verrà modificata con lavorazioni successive in quanto andrà a definire il tagliante (Figura 46).

Per riempire tale spazio si procede con uno schizzo, proprio sul piano di lavorazione 3 (quello dove avverrà la simmetria), che prevede la duplicazione del profilo del guscio. Dopodiché si procede con l'estrusione, come mostrato nella Figura 47.

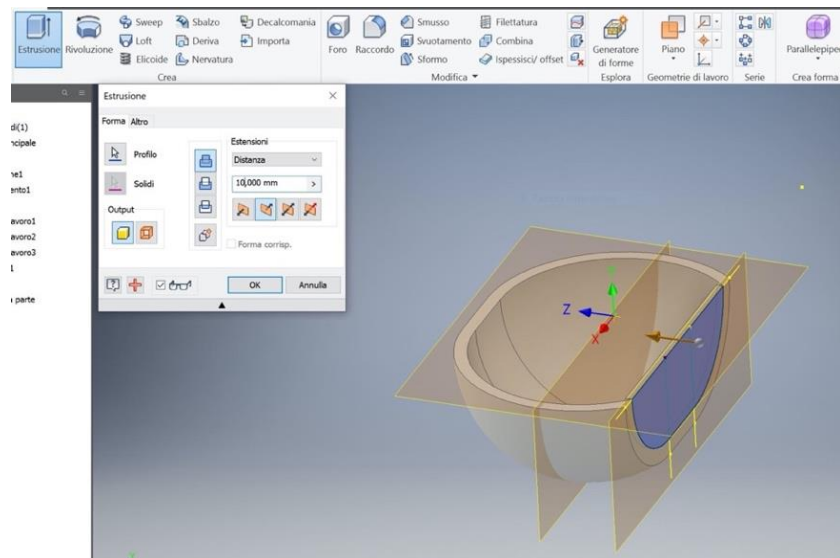


Figura 46 Creazione della giunzione

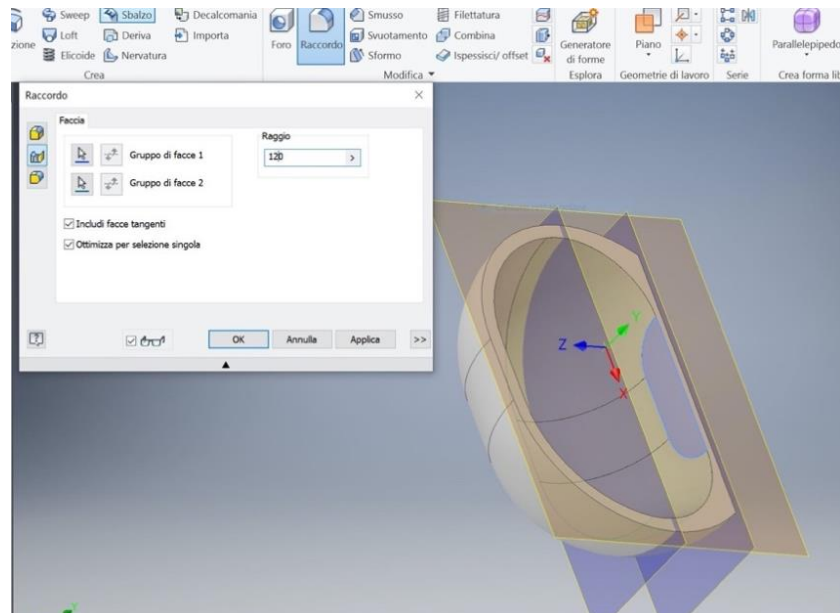


Figura 47 Creazione del raccordo con la giunzione

Per risolvere il problema dello scalino, formato con l'estrusione, si va ad attuare un raccordo con un raggio pari alla distanza del piano stesso dall'UCS.

Come espresso sopra, si procede con la realizzazione dell'intaglio solo su questa metà e poi verrà duplicato insieme al resto delle lavorazioni. Essendo un elemento fondamentale per il buon funzionamento della Pelton, è importante che sia fatto nel miglior modo possibile e tenendo in considerazione tutti gli angoli. Infatti, come prima cosa, si realizza il coltello" attraverso uno schizzo proprio sul piano 3. Si realizza un triangolo con vertice sulla punta della giunzione che poi viene tagliato, attraverso un'estrusione e selezionando il comando "taglia" (Figura 48). Dopo aver effettuato il taglio a circa 20°, si procede con la seconda parte dell'intaglio, utilizzando per lo schizzo il "piano di lavorazione 2" e seguendo i criteri della progettazione. Una volta definita la curva, vado a tagliarlo utilizzando la medesima lavorazione dell'intaglio precedente (Figura 49).

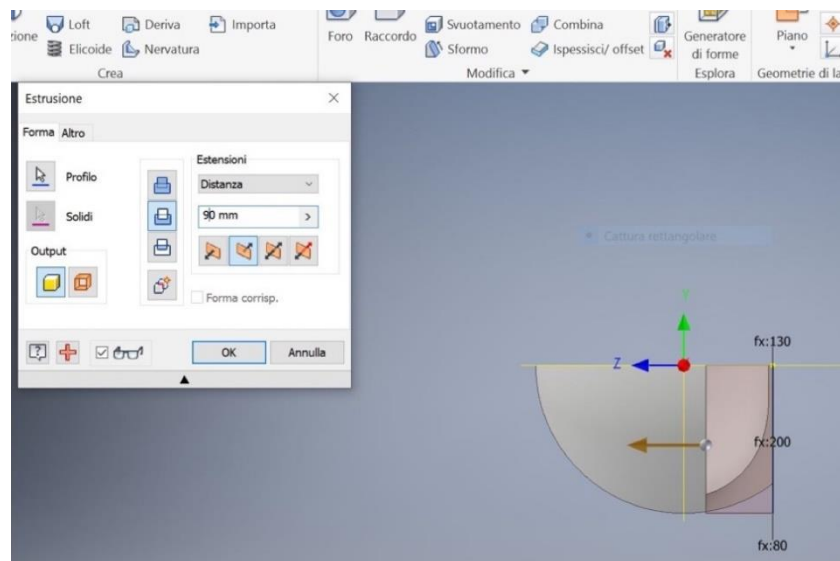


Figura 48 Primo taglio per creazione del tagliente sul piano 3

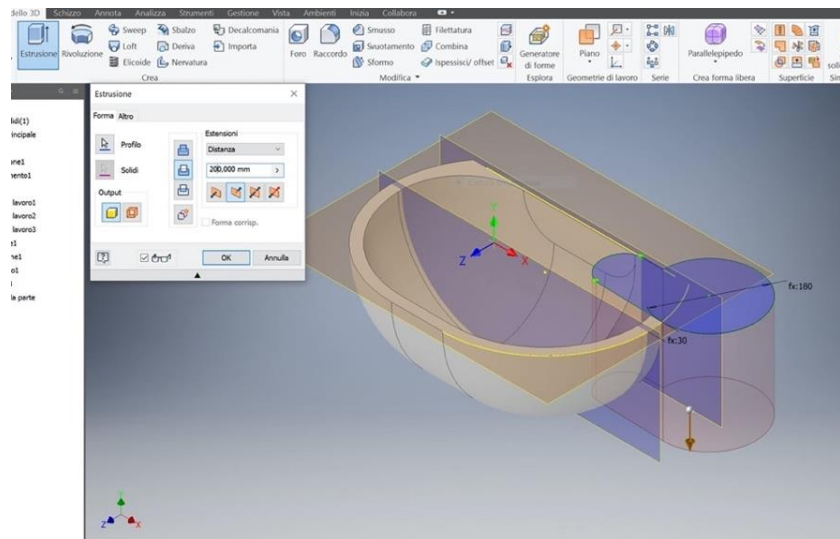


Figura 49 Secondo taglio per creazione del tagliente sul piano 2

Si realizzerà ora il supporto per la girante. Si seleziona il “piano di lavorazione 2” che si trova nella mezzeria del cucchiaino, e si cambia la vista in “wireframe” per vedere gli spigoli nascosti del modello (Figura 50).

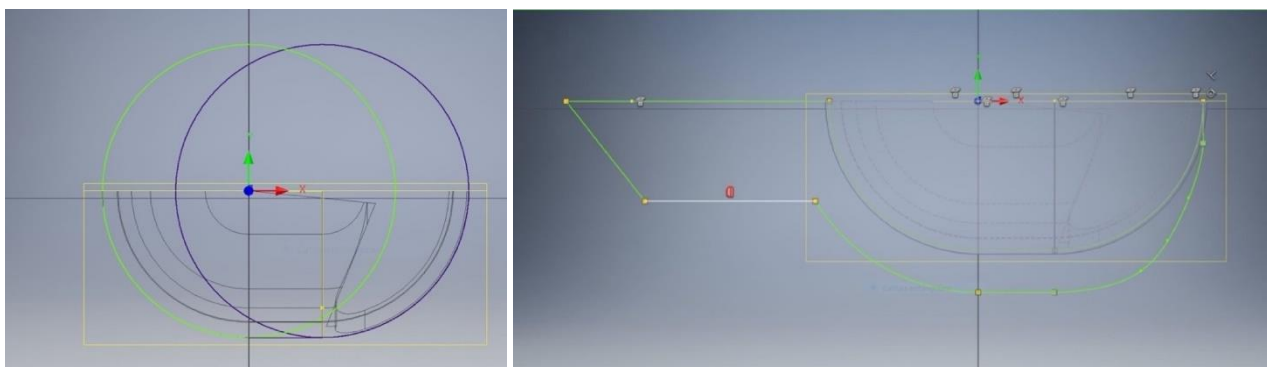


Figura 50 Viste wireframe del modello

In questo modo si può ricreare il profilo del cucchiaio che poi, con l'opzione "offset", si va a duplicare e a porre a una distanza fissata dalla curva originale. Quindi si va a procedere con il seguente schizzo, con anche i vincoli in evidenza.

A questo punto si seleziona la lavorazione "estrusione" e si pone con avanzamento simmetrico rispetto al piano dello schizzo come mostrato in Figura 51.

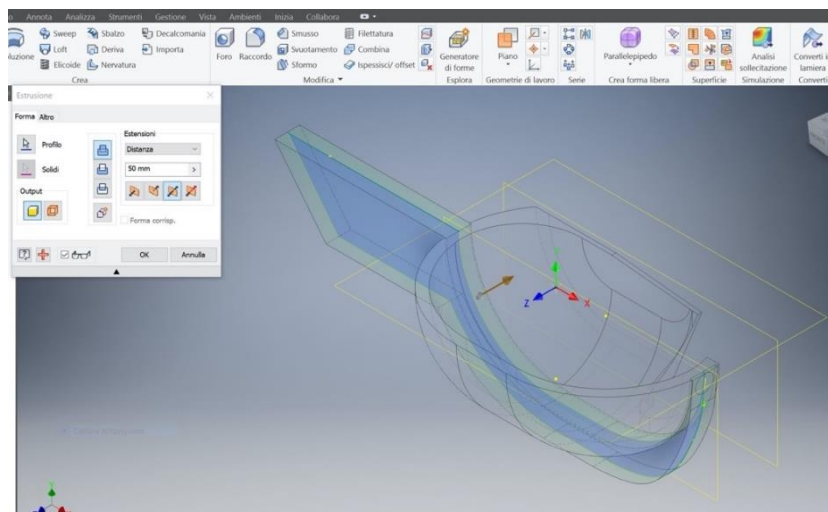


Figura 51 Estrusione del supporto

Con questa costruzione si conclude la realizzazione della costruzione del singolo cucchiaio e quindi si va ad effettuare l'ultimo passaggio, la duplicazione, che va a concludere il design della Pelton. La paletta riportata in Figura 52 è ora conclusa.

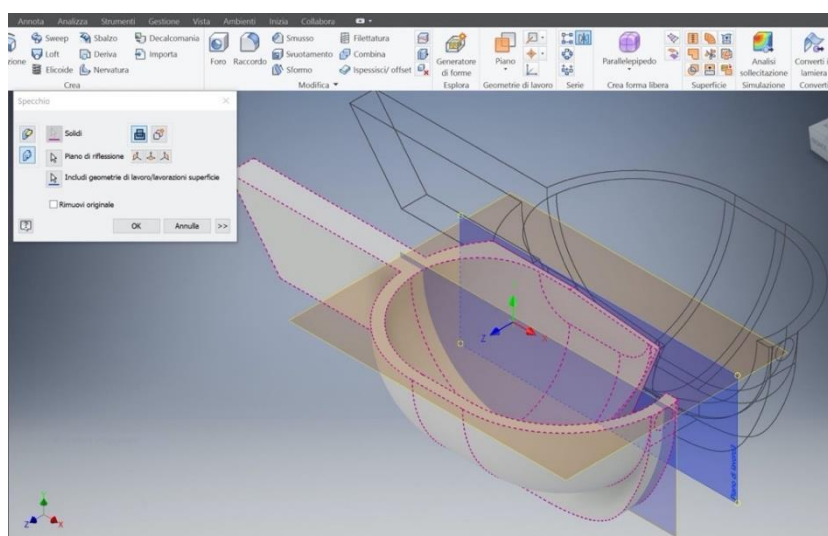


Figura 52 Duplicazione rispetto al piano di simmetria

Una volta formata la paletta completa, si procede con la costruzione della girante. Per la realizzazione si utilizza il "piano di lavorazione 3" e si crea una circonferenza di diametro D , dato da progetto, che poi viene estrusa in maniera simmetrica rispetto alla mezzeria come mostrato in Figura 53.

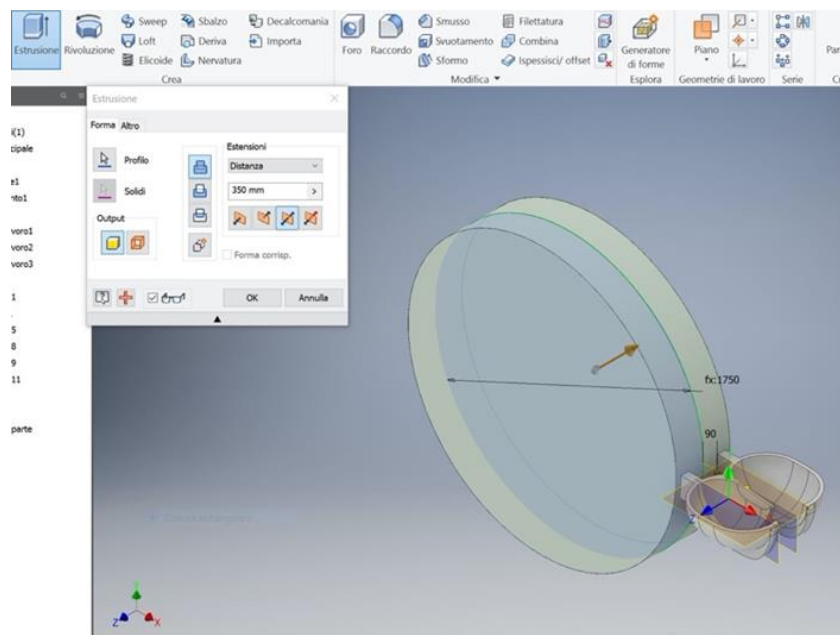


Figura 53 Realizzazione della base del tamburo

Una volta realizzata la base della girante si procede con le lavorazioni sulla superficie. Si seleziona una delle due facce e si realizza lo schizzo, che poi viene duplicata nella faccia opposta con il comando duplica come mostrato in Figura 54.

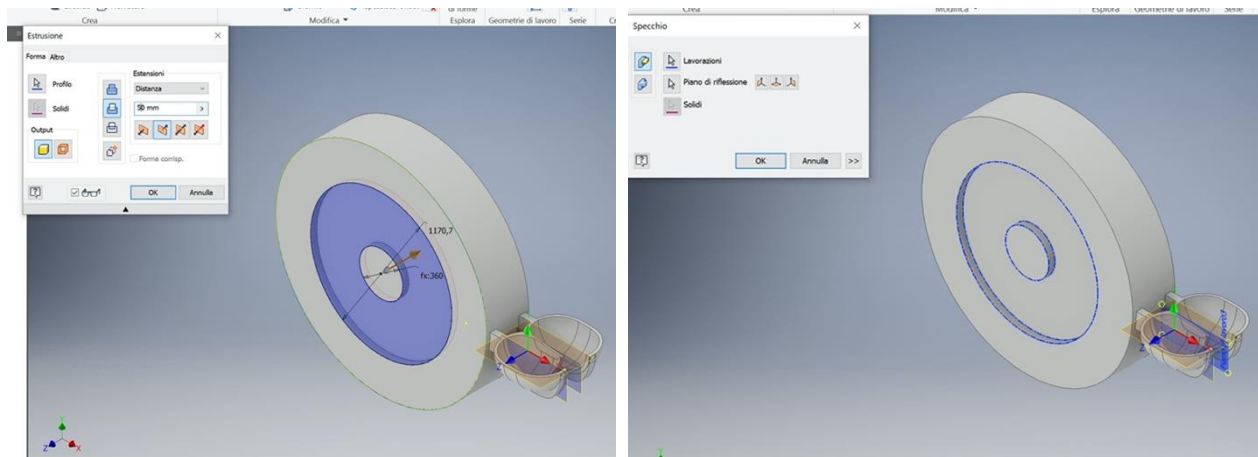


Figura 54 Creazioni della geometria del tamburo

Come ultima lavorazione, si va a creare al centro della girante la sede per l'albero motore attraverso la realizzazione di una circonferenza che poi viene estruso per creare un foro passante.

A questo punto si procede con l'ultima, e fondamentale al fine del funzionamento della turbina, parte della realizzazione: la duplicazione della paletta per N volte sulla superficie laterale della girante. Per farlo si utilizza la funzione "serie circolare", dopo di che si seleziona il solido che si vuole andare a ripetere, imponendo che tale duplicazione debba avvenire sulla circonferenza della girante (Figura 55)

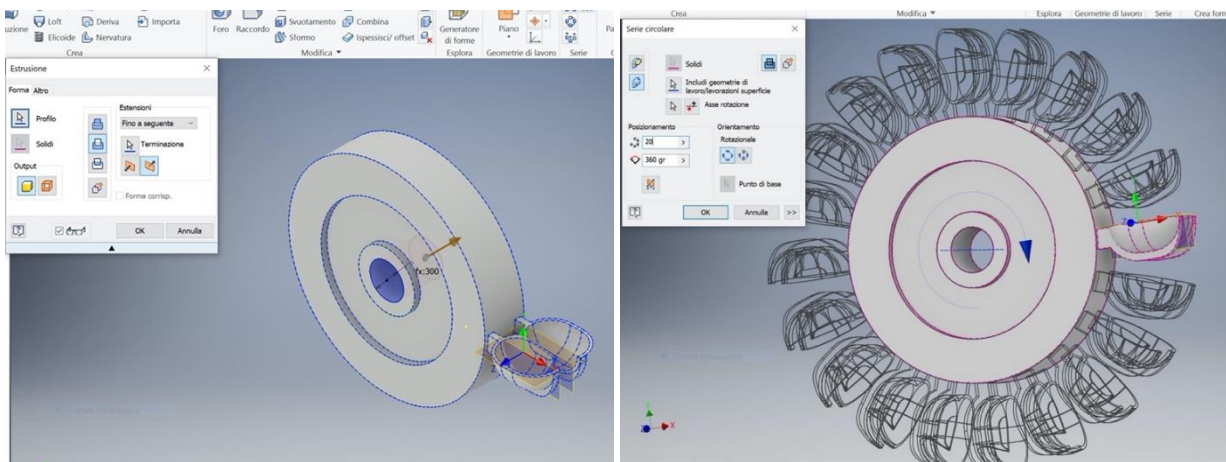


Figura 55 Operazioni di foratura e duplicazione polare delle palette

Con questo step la progettazione è conclusa e si è ottenuta la girante completa mostrata in Figura 56

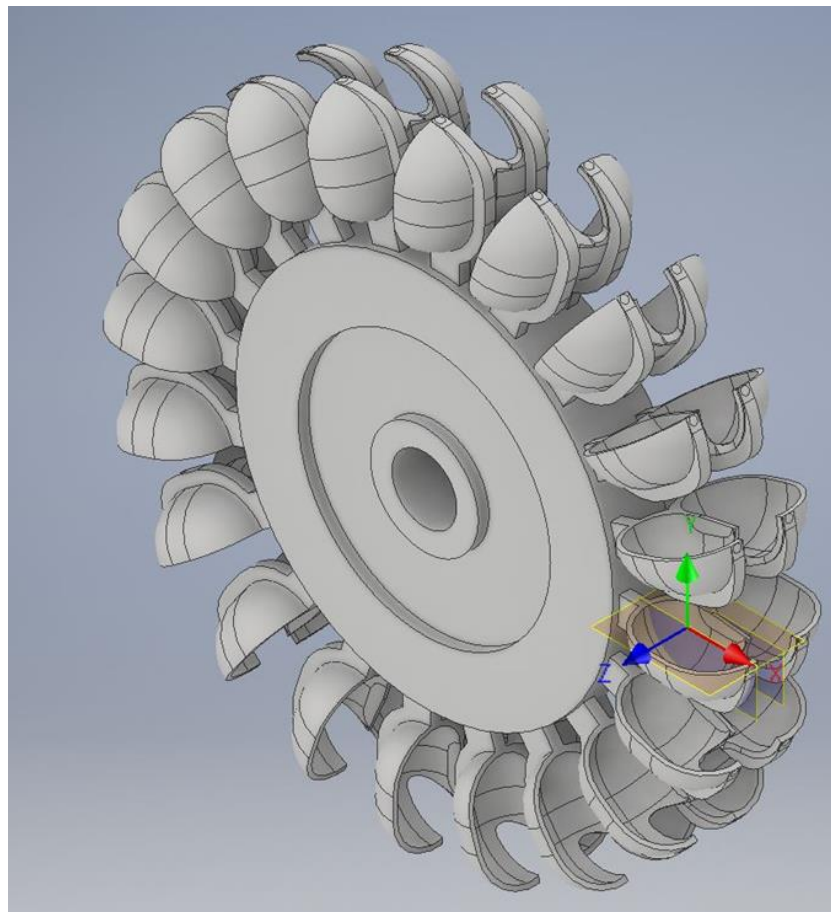


Figura 56 Turbina Pelton completa

3.2.4.2 Modellazione parametrica

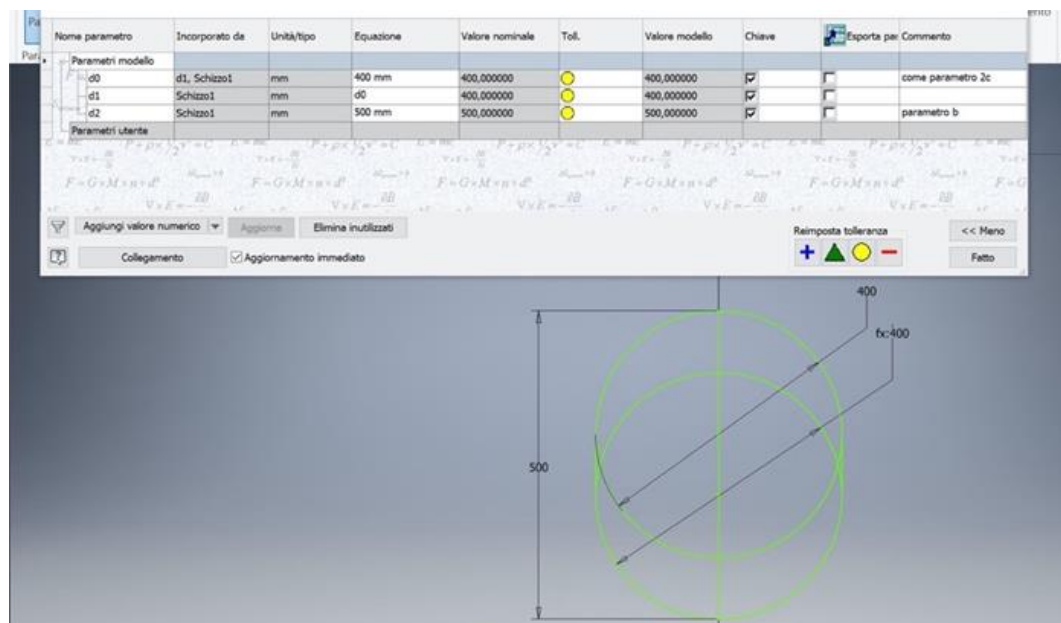
Un modello solido può essere definito in accordo con tre differenti approcci:

- Feature-based design
- Modellazione esplicita
- Surface design

Nel caso che si sta trattando, quindi la progettazione di una turbina Pelton, si andrà ad utilizzare il primo approccio. Infatti, il secondo si basa su modellazione focalizzata sulla forma da ottenere, come se si andasse a scolpire l'oggetto; mentre l'ultimo approccio viene utilizzato in caso di forme complesse e che nei progetti ingegneristici non sono basate su funzionalità specifiche.

Per quanto concerne il feature-based design, si distinguono due modalità di utilizzo differenti: il design parametrico e la definizione della famiglia dei componenti. Nel caso preso in esame si utilizzerà la prima modalità in quanto, attraverso le formule, permette di definire variazioni automatiche di forme e sezioni; mentre la seconda modalità determina un set di differenti variabili basate su funzionalità locali, che possono essere attivate o soppresse.

A questo punto si procede con la descrizione di come si è sviluppata la parametrizzazione del progetto che si è realizzato. Infatti, procedendo parallelamente a quanto riportato nel paragrafo precedente, la parametrizzazione parte dal primo schizzo attraverso la realizzazione delle quote. Dopo averle definite, si seleziona l'opzione "gestione" e, cliccando su parametri, si apre la tabella con definiti i valori riguardanti le quote stesse. Per semplicità si vanno a contrassegnare, selezionando l'opzione "chiave", poiché in questo modo, successivamente, si possono filtrare tutti i dati per tenere solo quelli selezionati. Per ulteriori agevolazioni si vanno a porre anche dei commenti, così da rendere identificativo ciascun parametro. In Figura 57 è mostrata l'inizializzazione della tabella di partenza.



Nome parametro	Incorporato da	Unità/tipo	Equazione	Valore nominale	Toll.	Valore modello	Chiave	Esporta per	Commento
d0	d1, Schizzo1	mm	400 mm	400,000000		400,000000	☒		come parametro 2c
d1	Schizzo1	mm	d0	400,000000		400,000000	☒		
d2	Schizzo1	mm	500 mm	500,000000		500,000000	☒		parametro b

Figura 57 Tavola di partenza della progettazione parametrica

Bisogna tenere bene in considerazione che, in questo modo, se si cambiano i valori direttamente dalla tabella, vengono automaticamente cambiati anche nello schizzo.

Un altro elemento che si va a parametrizzare è la posizione del "piano di lavorazione 3" in quanto diventerà il piano di simmetria della paletta.

Come già detto tale distanza è pari a:

$$e = \frac{a}{2} - c$$

Essendo questa la formula, per effettuare la parametrizzazione si va ad "aggiungere valore numerico", così da poter avere il parametro "a", in quanto c risulta essere $d_0/2$. La Figura 58 mostra i piani parametrizzati.

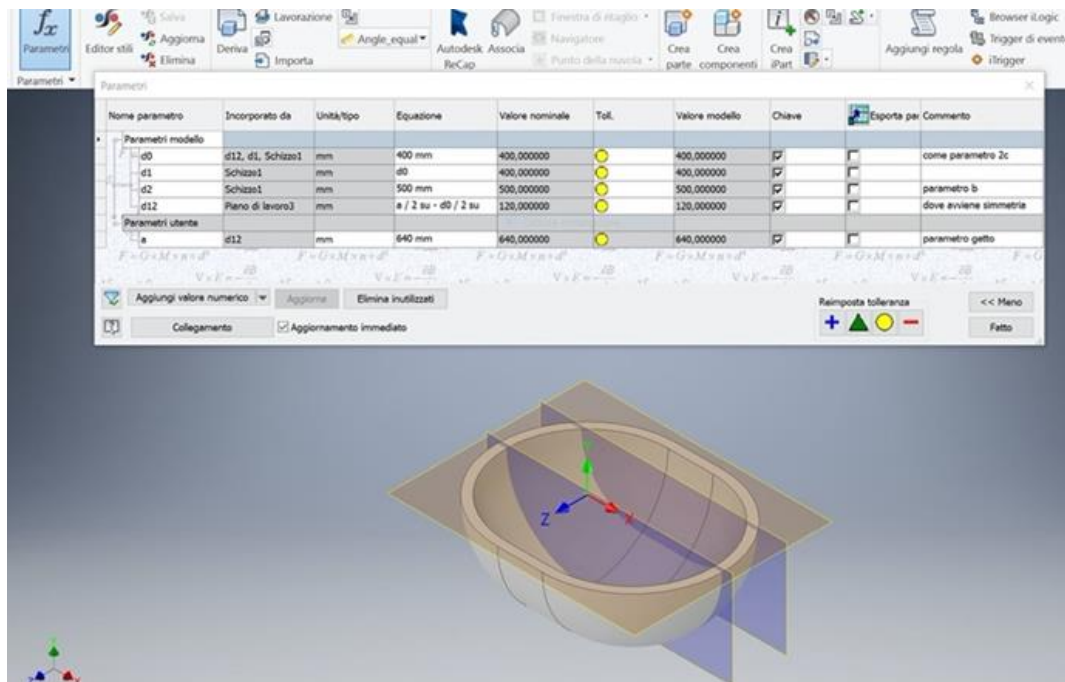


Figura 58 Parametrizzazione dei piani ausiliari

A questo punto si procede con la parametrizzazione della giunzione centrale, in quanto importante per il funzionamento della turbina stessa. Come evidente dalla Figura 59, un elemento importante è la parametrizzazione dello spessore di estrusione, in quanto crea uno scalino che, poi essere raccordato con un raggio pari proprio alla distanza tra il piano di lavoro3 e UCS, andrà a creare una giunzione più sottile possibile. Allo stesso modo, risulta essenziale la corretta parametrizzazione dell'intaglio.

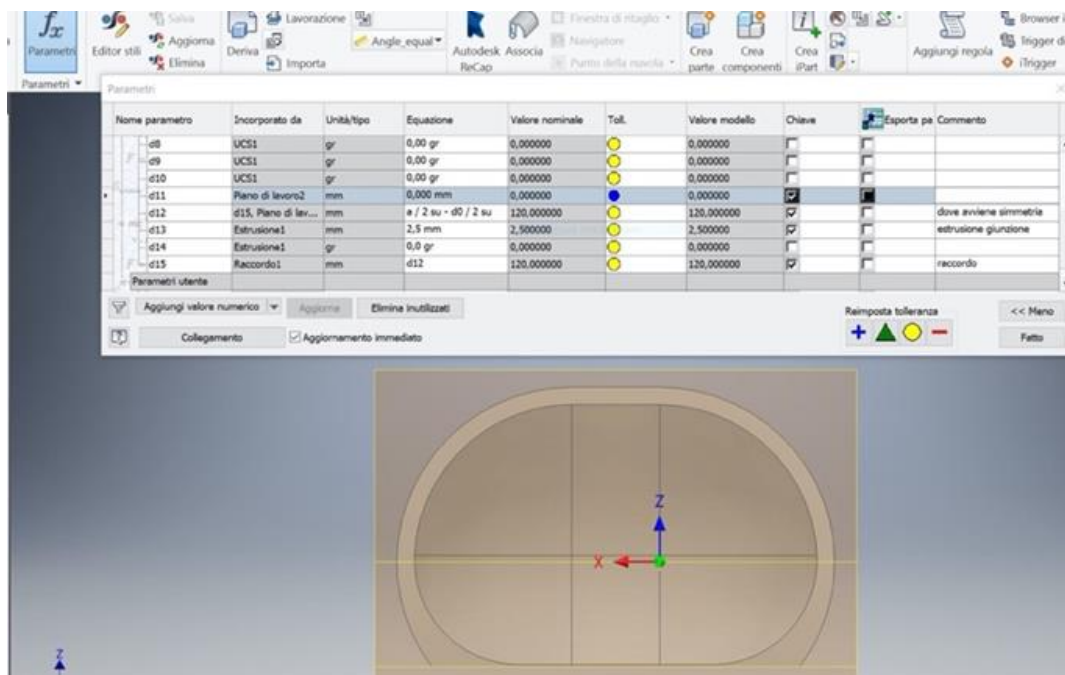


Figura 59 Parametrizzazione del tagliente

Questo inizia con la realizzazione del coltello il cui angolo è noto da progettazione e deve quindi valere circa (20-24)°. Per effettuare la parametrizzazione si vanno a legare tra loro i cateti del triangolo, così da renderli proporzionali e con un angolo costante come nello schizzo mostrato in Figura 60.

Quindi il cateto che fa da base viene preso, per semplicità, pari proprio al parametro fondamentale “c” e in questo modo, per avere il cateto altezza, basta moltiplicare il primo con un coefficiente 0,4. Le loro dimensioni portano ad un angolo di circa 22°.

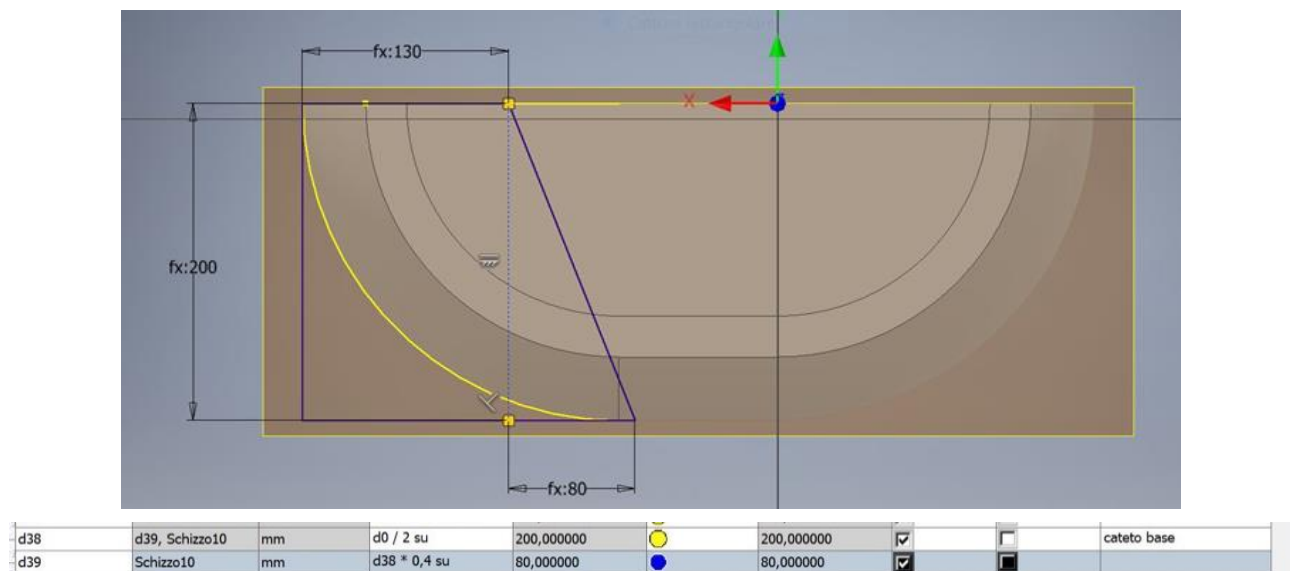


Figura 60 Schizzo per la realizzazione del tagliente e relativa parametrizzazione

A questo punto si procede con la restante parte del tagliente, parametrizzando rispetto al piano di lavorazione 1 (Figura 61) e al piano di lavorazione 3 (Figura 62).

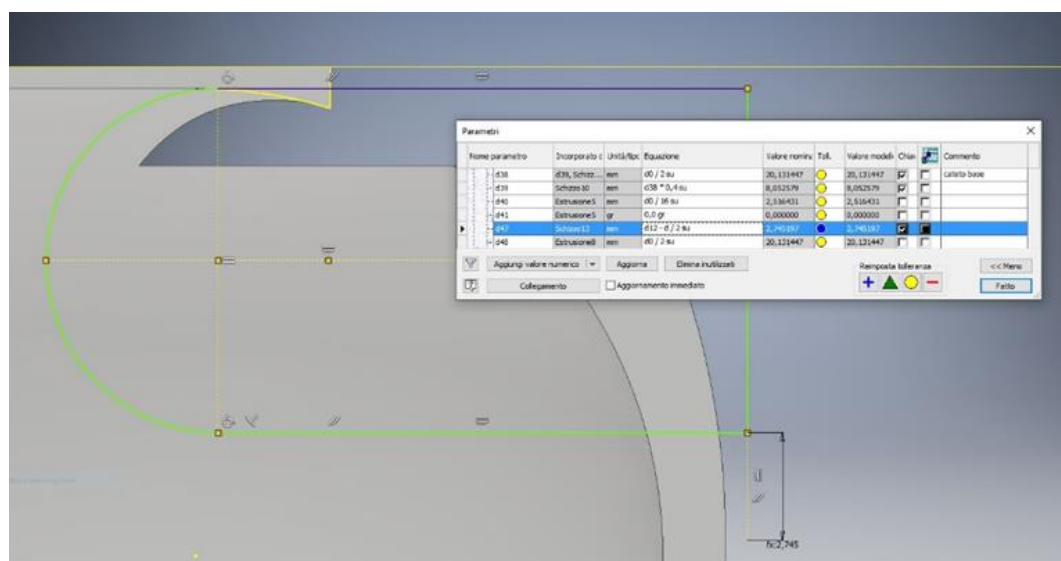


Figura 61 Parametrizzazione taglio superiore

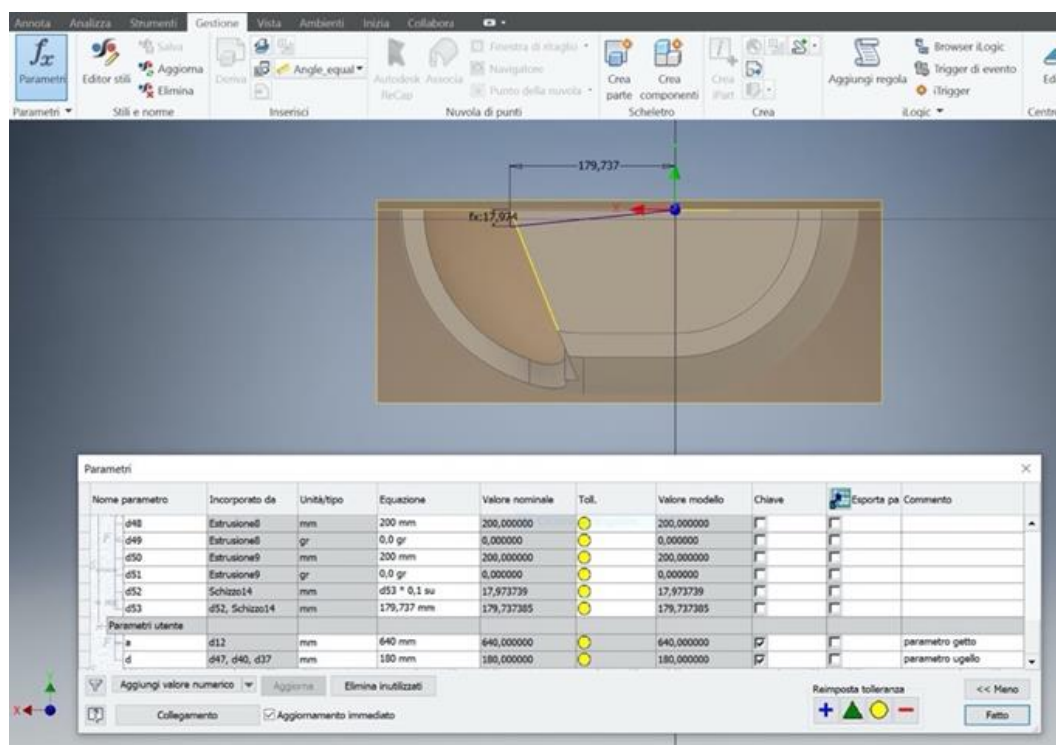


Figura 62 Parametrizzazione del taglio nel piano 3

Per quanto concerne il supporto, si sono imposte alcune distanze ponendole uguali ad alcuni parametri fondamentali, così da mantenere una geometria costante al variare delle dimensioni del cucchiaio. La parametrizzazione è riportata in Figura 63.

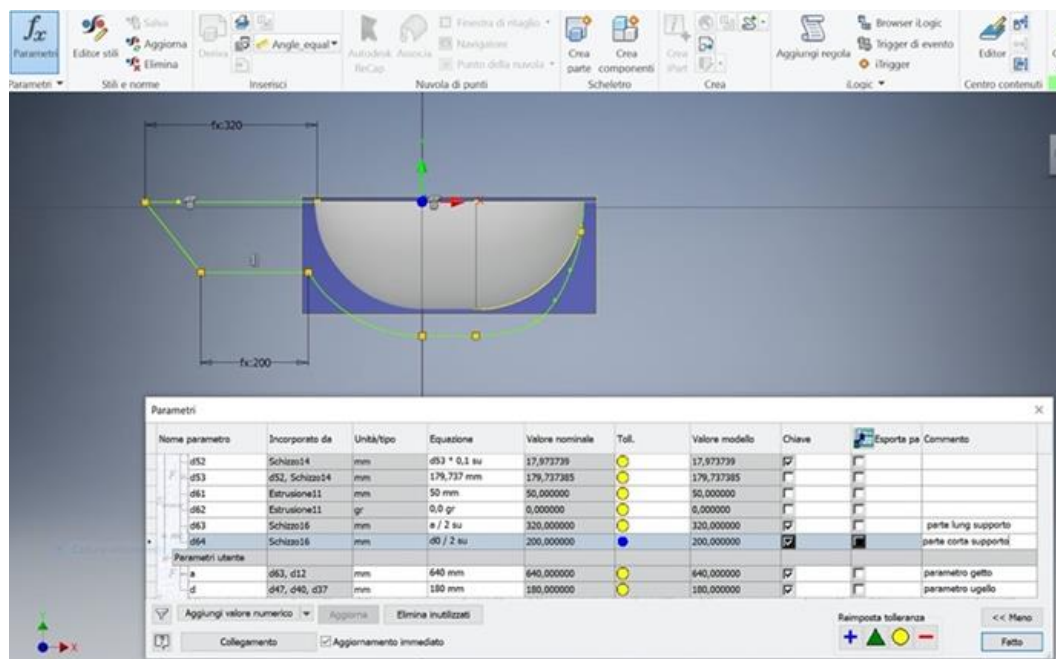


Figura 63 Parametrizzazione dell'aggancio della palette al tamburo

A questo punto, dopo aver effettuato la duplicazione rispetto al piano di simmetria, si procede con la parametrizzazione della girante. Dopo aver quotato il cerchio, attraverso l'opzione "aggiunta di un valore

numerico” si crea un parametro “D”, dato da progetto. Successivamente si realizza una linea di costruzione che permette di parametrizzare la distanza tra il cucchiaio e la girante (Figura 64).

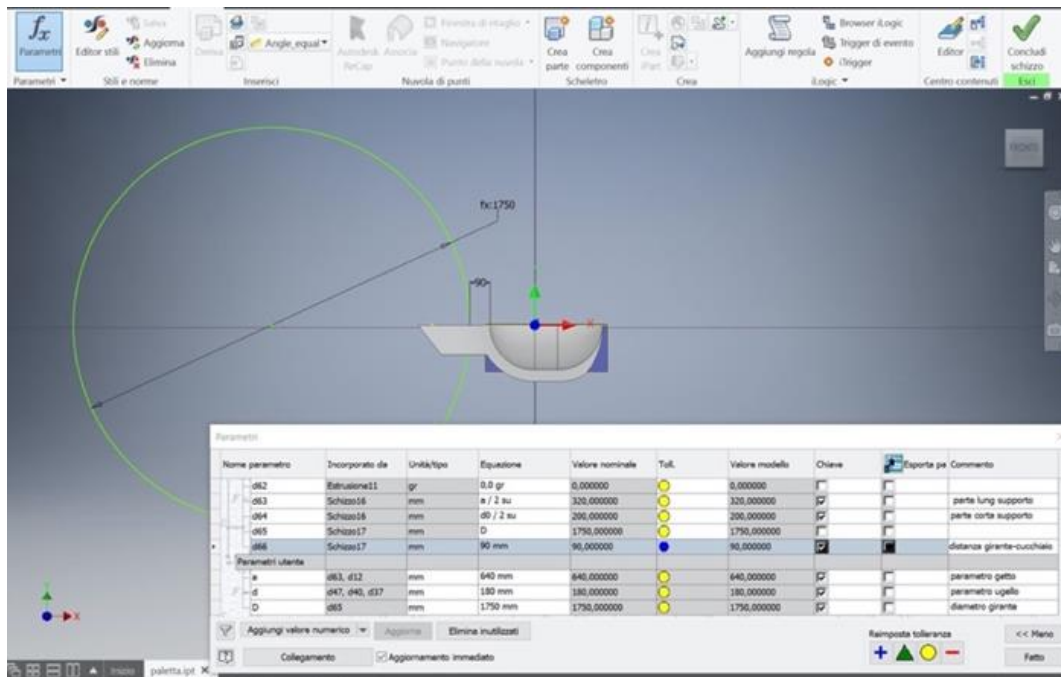


Figura 64 Parametrizzazione per corretto aggancio e dimensione del tamburo

Per quanto riguarda le lavorazioni sulla girante stessa, si procede con la parametrizzazione della circonferenza che funge da sede dell'albero motore aggiungendo, come per la grandezza D, un valore numerico “da”, pari proprio al diametro dell'albero (Figura 65).

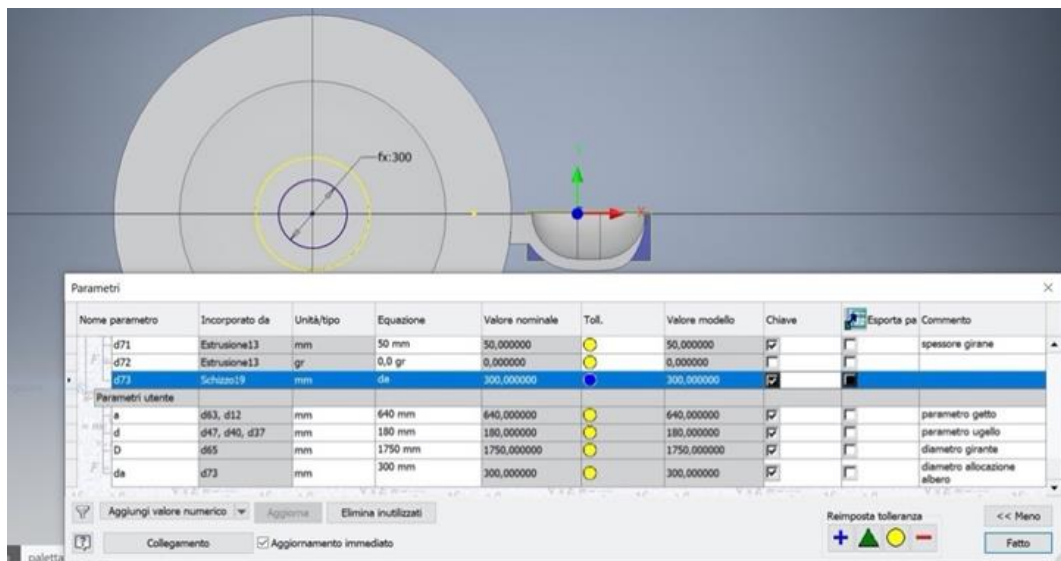


Figura 65 Parametrizzazione per dimensione della sede dell'albero

Per concludere si parametrizza il numero di palette che devono giacere sulla girante svolgendo il medesimo meccanismo del passo precedente (Figura 66). Al momento si imposta n=20.

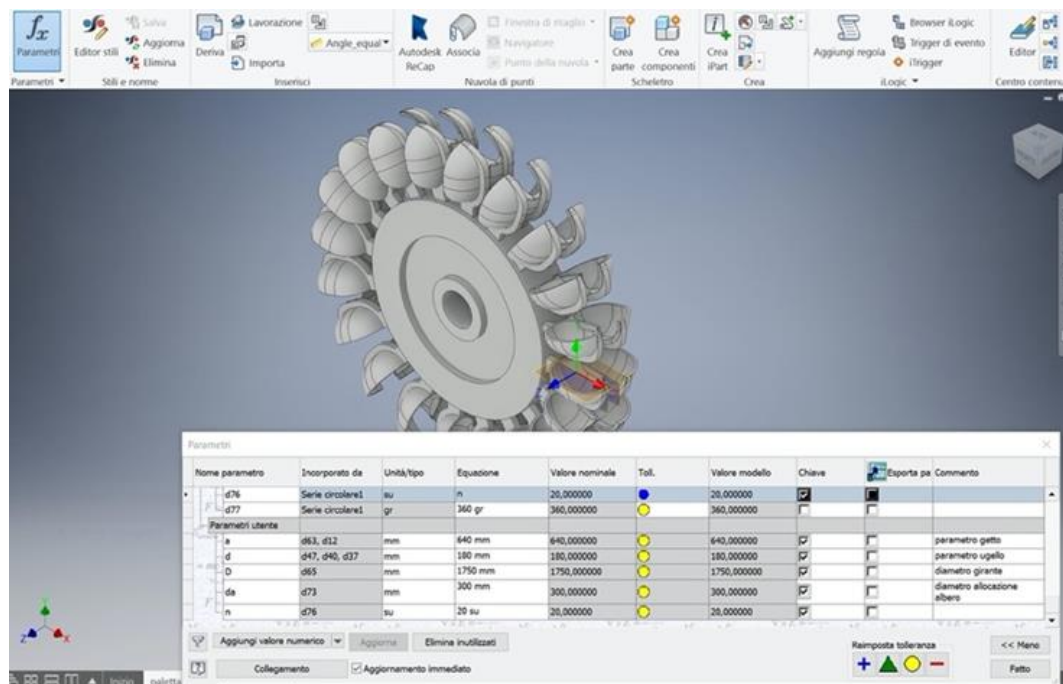


Figura 66 Parametrizzazione del numero di palette

Si è conclusa la fase di design parametrico. Quanto descritto esprime la possibilità di parametrizzare le dimensioni della turbina direttamente cambiando i valori nel box dei parametri. In maniera coerente con lo scopo della tesi, si può effettuare un ulteriore passo che renda ancor più flessibile il progetto stesso. Infatti, con l'ausilio del programma Excel, si può andare a realizzare un foglio dove vengono espressi tutti i parametri di progettazione in relazioni alle grandezze fondamentali che, come ampiamente espresso nel capitolo della progettazione, sono quelle che variano in base alla situazione di utilizzo. La Tabella 5 è relativa alla matrice sorgente della parametrizzazione fin qui descritta.

Tabella 5 File Excel con parametri caratteristici

		Salto	20	9.81	0.75	4.4145 P	Potenza meccanica all'asse 4.5kW
		Portata	0.03		0.6	3.5316	Potenza ai morsetti 3.5 kW
		giri	1000	numero giri		49.67676 nc	numero di giri caratteristico
			0.96			19.01673 c1	velocità d'efflusso
			0.46			9.112181 u	velocità periferica
			3.14			0.174118 D	Diametro ruota
			4	6 getti		0.018301 d	Ugello
Parametri consigliati				Dimensioni pala			
3-4 d	→		3.5			0.064055 a	Cucchiaio da 0,065*0,05 con incavi da 0,02
2.5-3 d	→		2.75			0.050329 b	
1-1.2 d	→		1.1			0.020131 c	
				Rapporto Diametro/ugello			
12-18 (8-20)						9.513967 D/d	
				Numero Pale			
						19.75639 N° pale	
Nome parametro	Equazione	Unità/valore	Commento				
a	64.055 mm		parametri getto				
d	18.301 mm		parametro ugello				
D	174.118 mm		diametro girante				
da	30.000 mm		diametro allocazione albero				
n	20		numero pale				
b	50.329 mm		asse lungo dell'ellisse				
e	20.13145 mm		asse corto dell'ellisse				
spessore	1.567258 mm		spessore				

A titolo di esempio si eseguono delle variazioni rispetto ai valori precedentemente immessi. Se si volesse variare la portata Q da $0.03\text{m}^3/\text{s}$ a $0.015\text{m}^3/\text{s}$ si otterrebbe in modo quasi istantaneo il risultato di Figura 67.

Nel caso si avesse un salto diverso ovvero 30 m invece che 20 m si otterrebbe la turbina di Figura 68.

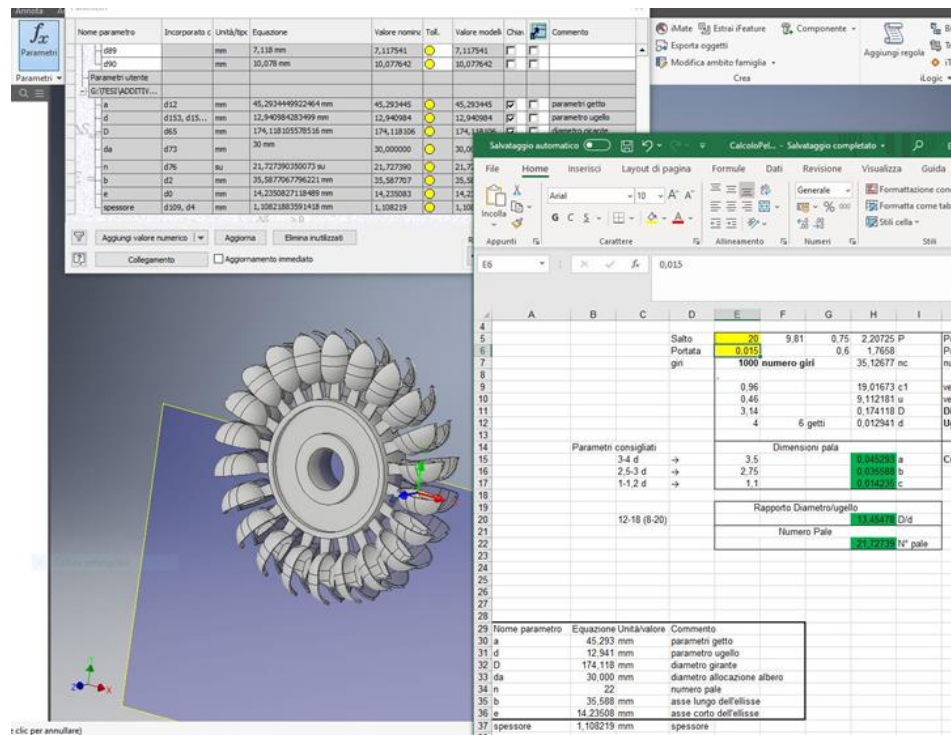


Figura 67 Esempio di variazione della geometria al variare della portata

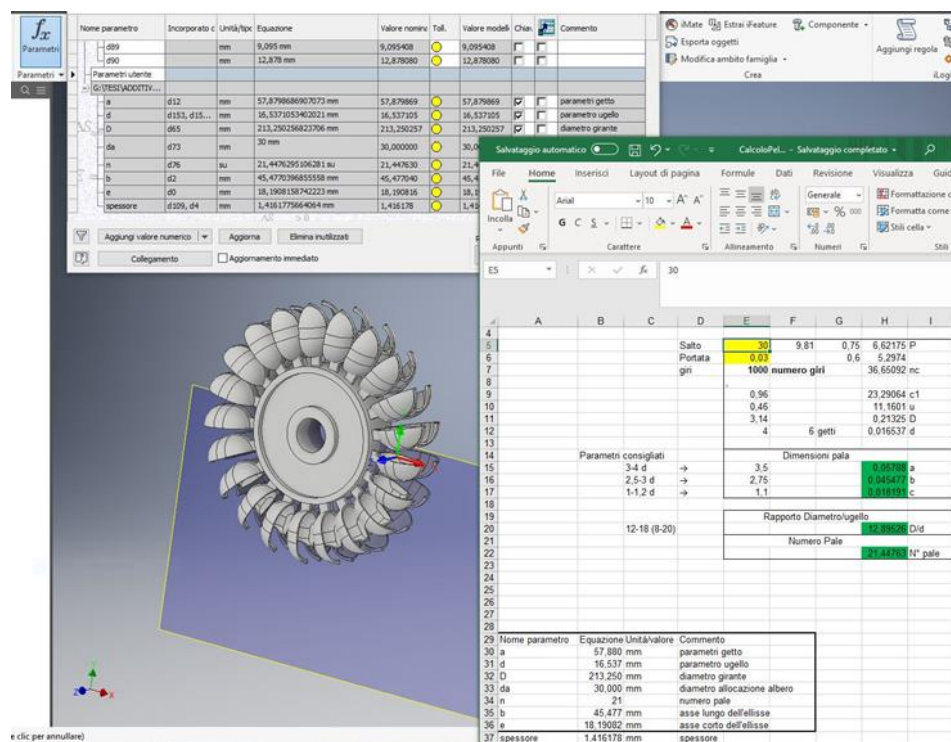


Figura 68 Esempio di variazione della geometria al variare del salto

3.3 Linee guida per la fabbricazione in Selective Laser melting di leghe di alluminio

Nel Selective Laser Melting attualmente, nonostante gli sviluppi tecnologici, esistono delle limitazioni geometriche nelle parti che si possono produrre. A seguire una guida a quelle grandezze e tipologie note al fine di evitare che la progettazione parametrica generi in taluni casi oggetti impossibili da produrre. Si tratta di limitazioni che sono state considerate nella scelta effettuata al primo anno ma un riassunto organico è di certo di ausilio nel contesto del progetto.

3.3.1 Spessore minimo della parete

Lo spessore della parete minimo per la lega di alluminio AlSi10Mg dipende da diversi fattori come la geometria e le dimensioni della parete. Anche la base gioca un ruolo importante. In genere, se la feature è piccola uno spessore di 0.5 mm è praticabile ma variando i parametri di processo come è stato effettuato nel corso delle investigazioni del primo anno è consigliabile considerare 1 mm.

3.3.2 Dimensione del dettaglio

Il dettaglio minimo fabbricabile si aggira attorno ai 0.5 mm. Generalmente si intende dettaglio la distanza fra la superficie del modello e quella dell'elemento che si intende fabbricare in alto o basso rilievo. L'esempio più pratico sono le scritte la cui leggibilità dipende dall'orientazione della superficie su cui sono posizionate. A livello generale per scritte posizionate su una superficie diversamente inclinata si consiglia un font ad alta leggibilità come l'Arial di dimensione non inferiore a 20 pt con spessore di 0.4 mm. Per tale configurazione e tale font lo spessore delle linee è di circa 0.7 mm e l'altezza è di 5 mm. La Figura 69 è un esempio pratico dell'applicazione di detti livelli su un componente fabbricato in Selective Laser Melting in alluminio AlSi10Mg.



Figura 69 Scritta in altorilievo (sinistra) e bassorilievo (destra) su un componente in AlSi10Mg

3.3.3 Accuratezza

La tolleranza ottenibile per una parte fabbricata in Selective Laser Melting oscilla tra la classe IT12 e la IT13 per pezzi di dimensioni nominali comprese tra 3 e 400 mm. Per fare un esempio su oggetti relativamente molto piccoli la tolleranza attesa è di 0.2 mm mentre per una parte di 100 mm la deviazione dalla quota nominale è di 0.5 mm. Ovviamente si tratta di valori che non considerano gli effetti derivanti dalle tensioni termiche di ritiro, distorsioni causate dall'azione del recoater, etc.

3.3.4 Rimozione della polvere nelle strutture chiuse

Nel creare un modello cavo, è importante includere almeno un foro nel design per consentire di rimuovere la polvere inutilizzata intrappolata all'interno della cavità. Per cavità relativamente piccole è consigliabile creare un'apertura con un diametro minimo di 3 mm. Questa apertura servirà come uscita per la polvere inutilizzata intrappolata dentro il pezzo stampato. Le cavità più grandi e complesse potrebbero necessitare di più fori con diametri maggiori, anche di 7 mm. I fori al centro del modello sono in genere la soluzione migliore, in quanto permettono la rimozione della maggior parte della polvere. È necessario evitare che la polvere resti intrappolata nelle sezioni cave del pezzo.

3.3.5 Fabbricazione di fori

Il diametro minimo per un foro è di 2 mm. Un foro di diametro inferiore non consentirebbe la rimozione della polvere all'interno; se il foro è più piccolo la polvere rimarrà bloccata all'interno della geometria. Fori o spazi interni complessi e di forma irregolare rendono impossibile l'ispezione o la rimozione completa della polvere. Fanno eccezione i fori ad asse rettilineo parallelo alla direzione di stratificazione. Tali fori possono essere creati con un diametro minimo di 1 mm. Contrariamente più i canali interni sono lunghi e complessi, più è grande il diametro minimo che si deve mantenere. Per fori le cui tolleranze non sono soddisfatte dal processo additivo è opportuno predisporre dei sovrametalli, ad esempio, impostando offset o direttamente chiudendo i fori rettilinei. Il pezzo può in seguito essere sottoposto a post-lavorazione per assicurare che vengano praticati i fori in conformità con i suoi requisiti specifici.

3.4 Managing del file di interscambio

3.4.1 Trasformazione del modello solido in STL

Nella piattaforma di modellazione solida è possibile salvare il componente come file di tassellazione STL. In Autodesk Inventor l'algoritmo di generazione è piuttosto scarno in quanto a parametri di processo. Il risultato di questo trasferimento può essere visionato attraverso il software free 3D tool viewer come riportato in Figura 70.

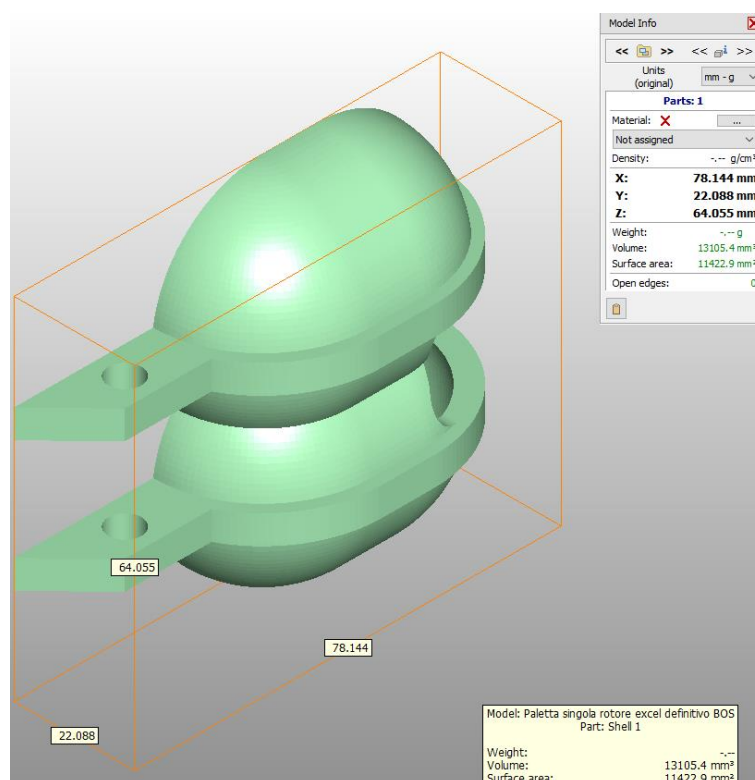


Figura 70 File di interscambio STL visualizzato in 3D-tool viewer

È opportuno verificare l'integrità del file attraverso piattaforme dedicate. Tra i software più diffusi vi è senz'altro l'Autodesk Netfabb. L'apertura del file precedente può essere seguita dal comando di analisi e riparazione che restituisce la finestra mostrata in Figura 71. Il risultato è il seguente:

- La tassellazione è chiusa
- I triangoli della mesh sono orientati correttamente
- Esiste un unico involucro
- Non sono presenti fori nella tassellazione

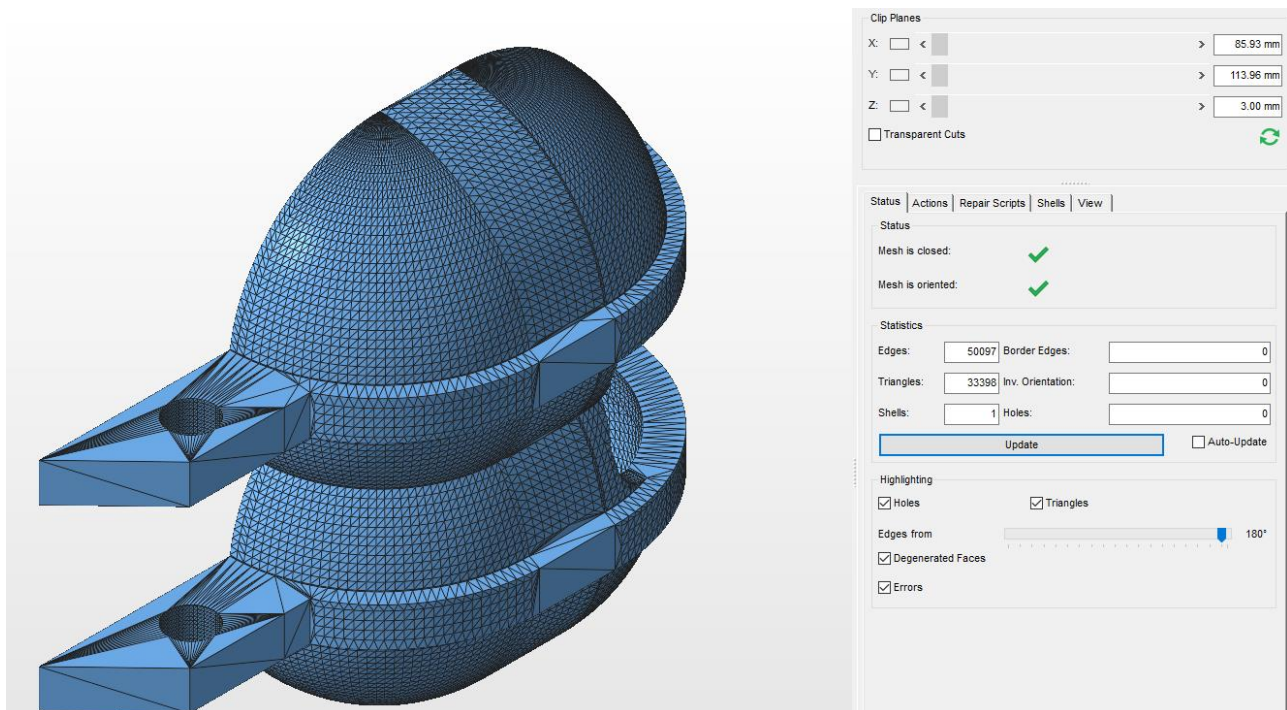


Figura 71 Tool di verifica e riparazione in Autodesk Netfabb

Ulteriori osservazioni da addurre sono le seguenti:

- La tassellazione è disuniforme nella zona degli agganci
- La mesh è uniforme nelle zone curve

Apparentemente la mesh è in condizioni tali da consentire la fabbricazione. Tuttavia, la seguente indagine approfondirà che sussistono dei difetti che non sono bloccanti ma possono generare delle difficoltà nelle operazioni successive come lo slicing e la generazione delle strutture di supporto. Per questo motivo, dato che tali operazioni verranno svolti in Magics, si effettuerà un'ulteriore analisi della mesh in questa piattaforma.

La Figura 72 mostra l'esito della verifica. I risultati precedenti vengono qui confermati. Magics però rileva anche 76 triangoli sovrapposti. Effettuando l'analisi delle sovrapposizioni è possibile marcare i triangoli colpevoli degli errori. La visualizzazione è riportata in Figura 73. Poiché un triangolo sovrapposto è un'entità che si aggiunge alla normale pelle della tassellazione, l'unica operazione possibile è l'eliminazione. Purtroppo, generalmente questa operazione porta all'apertura della shell causando innumerevoli altri problemi.

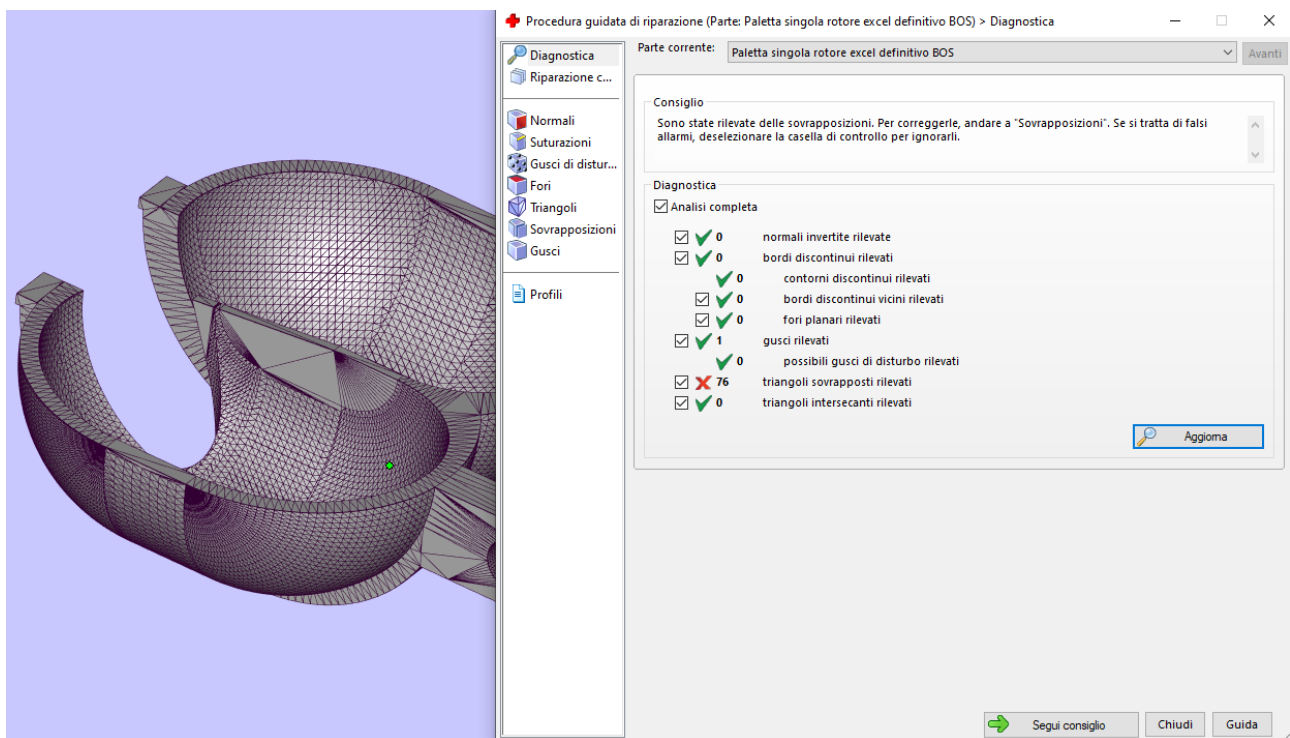


Figura 72 Verifica di fabbricabilità in Materialise Magics

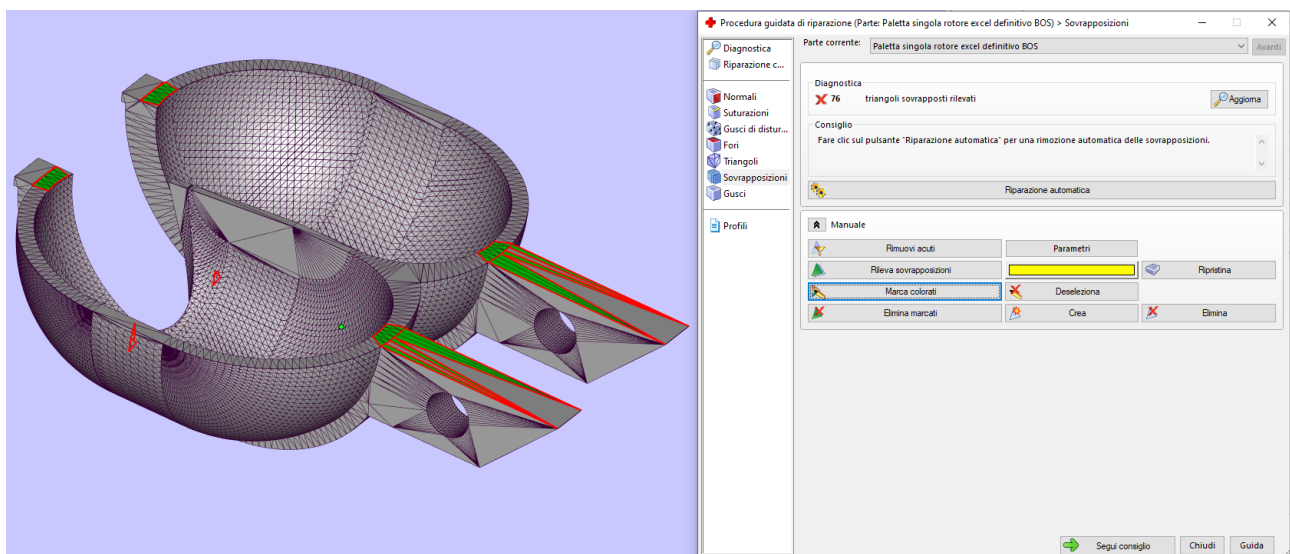


Figura 73 Analisi e marcatura delle sovrapposizioni

È esattamente ciò che si verifica: come dimostra la Figura 74 sono adesso presenti 196 problemi di svariate tipologie: bordi e contorni discontinui, fori. Con questa configurazione di errori conviene operare con routine di suturazione con cui è possibile cucire i bordi discontinui. Il risultato di questa operazione porta a una riduzione dei bordi discontinui, la completa eliminazione dei triangoli sovrapposti ma anche all'introduzione di nuovi errori come nuovi gusci e triangoli intersecanti. In questo caso occorre concentrarsi sui nuovi gusci. È supponibile, infatti, che nell'operazione di eliminazione delle sovrapposizioni alcuni elementi si siano distaccati dal guscio principale. È anche supponibile che tali elementi siano molto piccoli. Con questa premessa è possibile selezionare automaticamente i gusci piccoli denominati gusci di disturbo ed eliminarli.

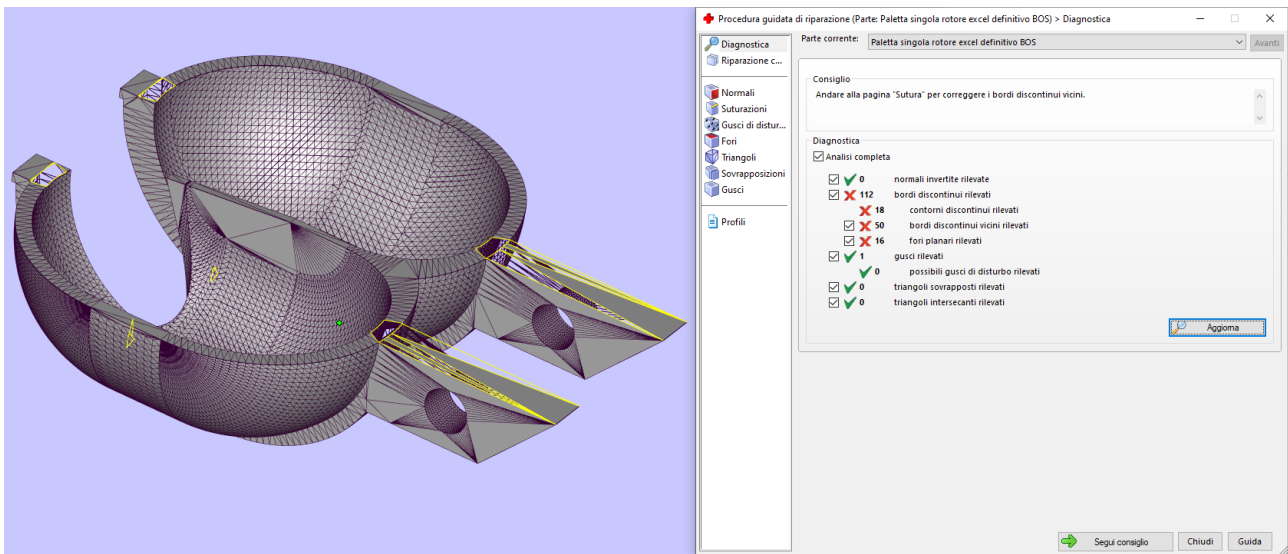


Figura 74 Verifica di fabbricabilità dopo l'eliminazione dei triangoli sovrapposti

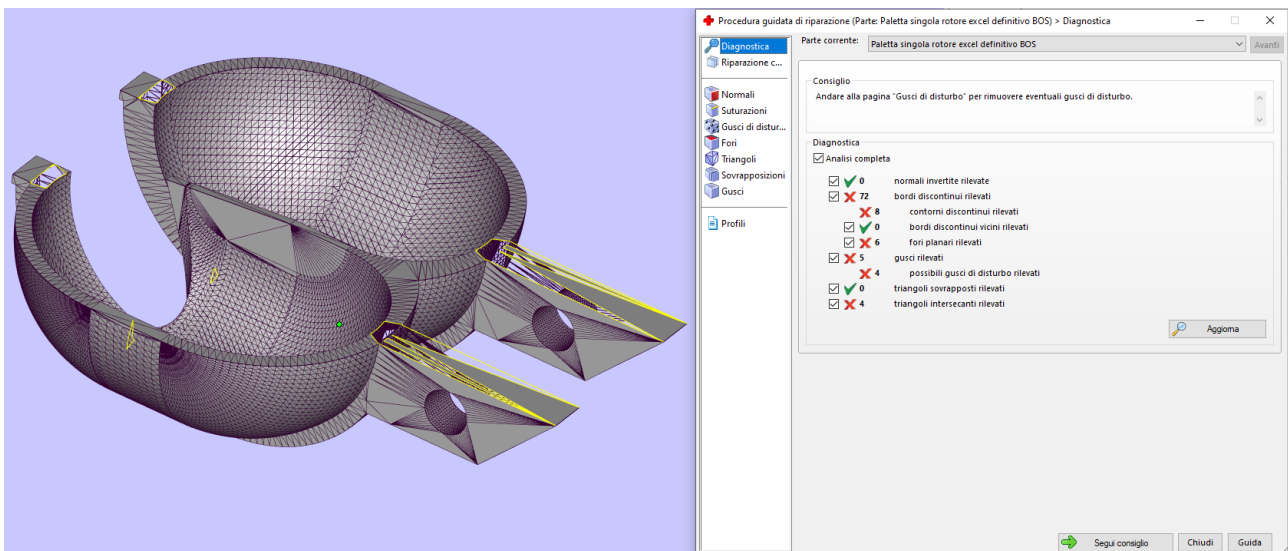


Figura 75 Verifica di fabbricabilità dopo l'impiego dell'algoritmo di suturazione

Conseguentemente a tale operazione il computo dei gusci è tornato all'unità come mostrato in Figura 76. Adesso permangono i problemi dei bordi discontinui e dei fori. I suggerimenti finora adottati hanno dato come priorità le sovrapposizioni, i gusci e non i bordi discontinui. Il ragionamento alla base è quello che nei bordi discontinui si enumerano una moltitudine di errori provenienti da errori di varia natura. È quindi opportuno valutare la configurazione complessiva prima di concentrare gli algoritmi all'emendamento di una tipologia di errori. A questo punto la situazione fa emergere che esistono 6 fori. È molto probabile che molti degli errori attribuiti ai bordi discontinui trovino la causa in detti fori. Pertanto, è opportuno provvedere alla riparazione degli strappi nella tassellazione attraverso algoritmo apposito. Il risultato dell'applicazione porta alla completa riparazione della mesh: come mostrato in Figura 77 non vi è più traccia di errori di alcun tipo e, di conseguenza, la geometria può essere sottoposta agli step successivi.

Non sempre le mesh create in ambienti di modellazione comportano questi tipi di errori. Va però sottolineato che il check della geometria è uno strumento essenziale poiché operare con una geometria errata può comportare errori nell'esecuzione delle operazioni di slicing e nella generazione dei supporti. Nei casi peggiori si può verificare che il processo vada avanti e si generi il file da mandare in macchina. È chiaro che questo caso è il peggiore poiché non si ha contezza di cosa si stia fabbricando e, molto spesso,

deviazioni dell'oggetto fabbricato dalla forma modellata vengono attribuite alla tecnologia quando è il comando ad essere sbagliato.

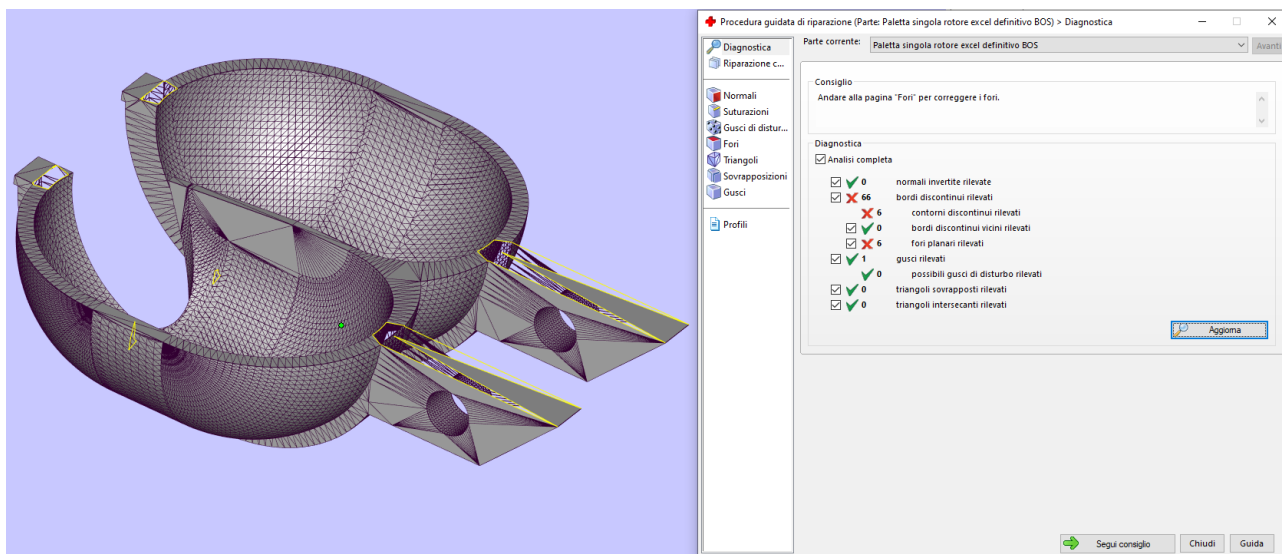


Figura 76 Verifica di fabbricabilità dopo l'eliminazione dei gusci di piccola dimensione

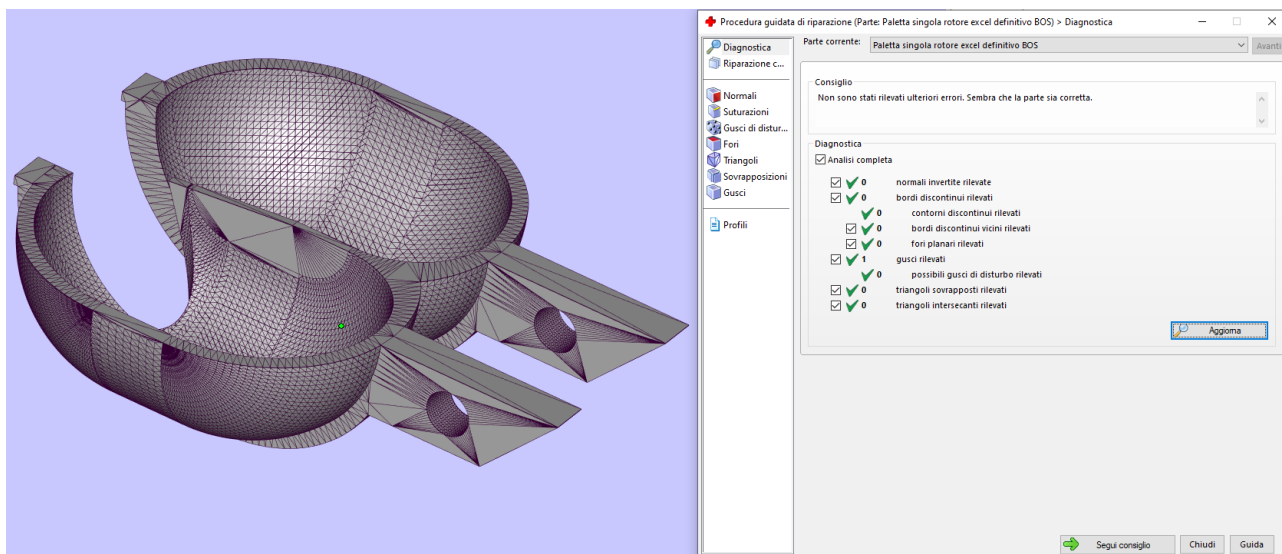


Figura 77 Verifica di fabbricabilità dopo la chiusura dei fori

A completamento dell'operazione di riparazione è possibile ricalibrare la tassellazione. Come osservato in precedenza la geometria creata soffre di mancanza di uniformità. Questo è causato dagli algoritmi di trasformazione tra il mondo vettoriale in cui la geometria è stata creata e quello discretizzato di un mondo composto da triangoli. Dato che nella maggior parte delle piattaforme non è possibile intervenire in questa generazione, i triangoli seguono strategie che possono fornire risultati deludenti. Le zone degli attacchi sono caratterizzate da triangoli di elongazione maggiore che non nelle parti curve. In maniera elementare si può comprendere che, ad esempio nell'operazione di slicing, la probabilità che un triangolo molto allungato dia problemi computazionali è molto alta se tagliato con un piano quasi parallelo al piano di giacitura del triangolo stesso. Per questo motivo è da preferire il triangolo equilatero o comunque con una elongazione molto contenuta. Attraverso algoritmi specifici è possibile ricalibrare una tassellazione non proprio fortunata selezionando adeguatamente i parametri di remeshing. Nel caso specifico si sono impostati una tolleranza di 0.01 mm, una dimensione massima del bordo pari a 2 mm e una dimensione minima di 0.1

mm. Il risultato è mostrato in Figura 78: è evidente una maggiore uniformità anche in quelle zone ove la caratteristica di planarità ha permesso all'algoritmo delle esemplificazioni dei triangoli con elongazioni elevate.

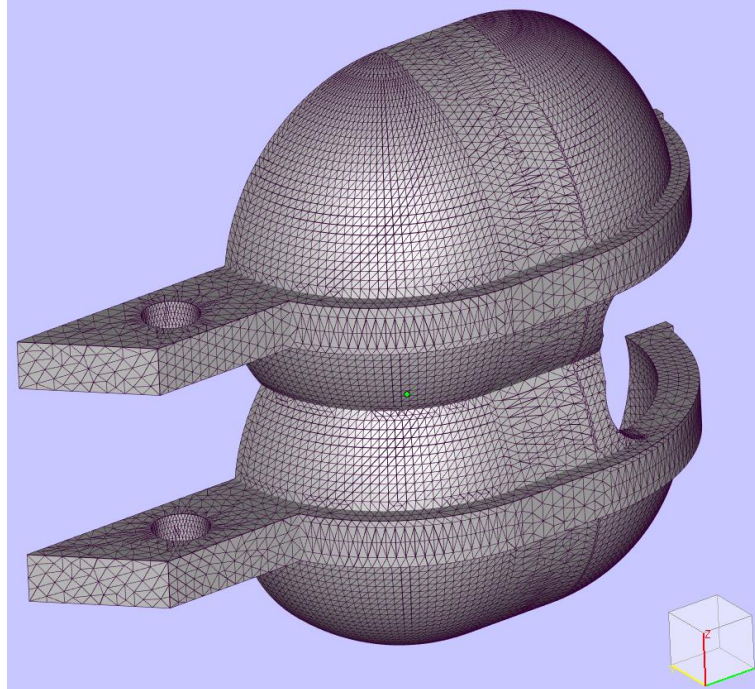


Figura 78 Applicazione del remeshing alla geometria riparata

3.4.2 *Generazione dei supporti*

3.4.2.1 *Configurazione del macchinario*

Si eseguiranno ora le operazioni per la generazione delle strutture di supporto. È necessario configurare la piattaforma Magics in modo appropriato alla macchina che si intende utilizzare. Il presente progetto impiega la EOS M290 una delle macchine più diffuse nel Selective Laser Melting. La configurazione dovrà necessariamente considerare il materiale da processare. In questo caso l'AlSi10Mg. A seguire i livelli dei fattori:

- Dimensione della piattaforma: 252 x 252 x 325 mm³
- Potenza del laser: 400W
- Diametro dello spot del laser: 0.1 mm
- Denominazione dei file per supporti pieni: s_*.ex.ext
- Denominazione dei file per supporti pieni: s_*.ext
- Tipo di supporti: block
- Angolo critico di auto-supporto: 40°. Questo valore indica quali superfici verranno selezionate per la generazione. Questo angolo corrisponde all'angolo di locale stratificazione meno 90°. Superfici con angolo superiore non verranno supportate
- Area minima supportata: 1 mm². Superfici con area inferiore non richiedono supporto.
- Bordo minimo considerato per il supporto: 1 mm. Bordi con lunghezza inferiore a tale valore non verranno supportati

- Sottigliezza minima: 25. Si tratta di un particolare modo di valutare quanto la superficie considerata sia stretta. È calcolata come il rapporto tra il perimetro del contorno al quadrato diviso l'area
- Denominazione file slice SLI per supporti non pieni: *01_0m.ext
- Denominazione file slice SLI per supporti pieni: *01_0m_ex.ext

Selezionare le sopraindicate denominazioni per i file delle strutture di supporto consente una importante semplificazione nel processo di caricamento dei dati nei software di preelaborazione bordo macchina, nello specifico l'EOSPRINT. Infatti, con tali denominazioni il software effettua una identificazione dei modelli e delle strutture relative associandoli nel momento in cui vengono posizionati sulla piattaforma. I sopraindicati settaggi si inseriscono in una apposita area così come riportato in Figura 79.

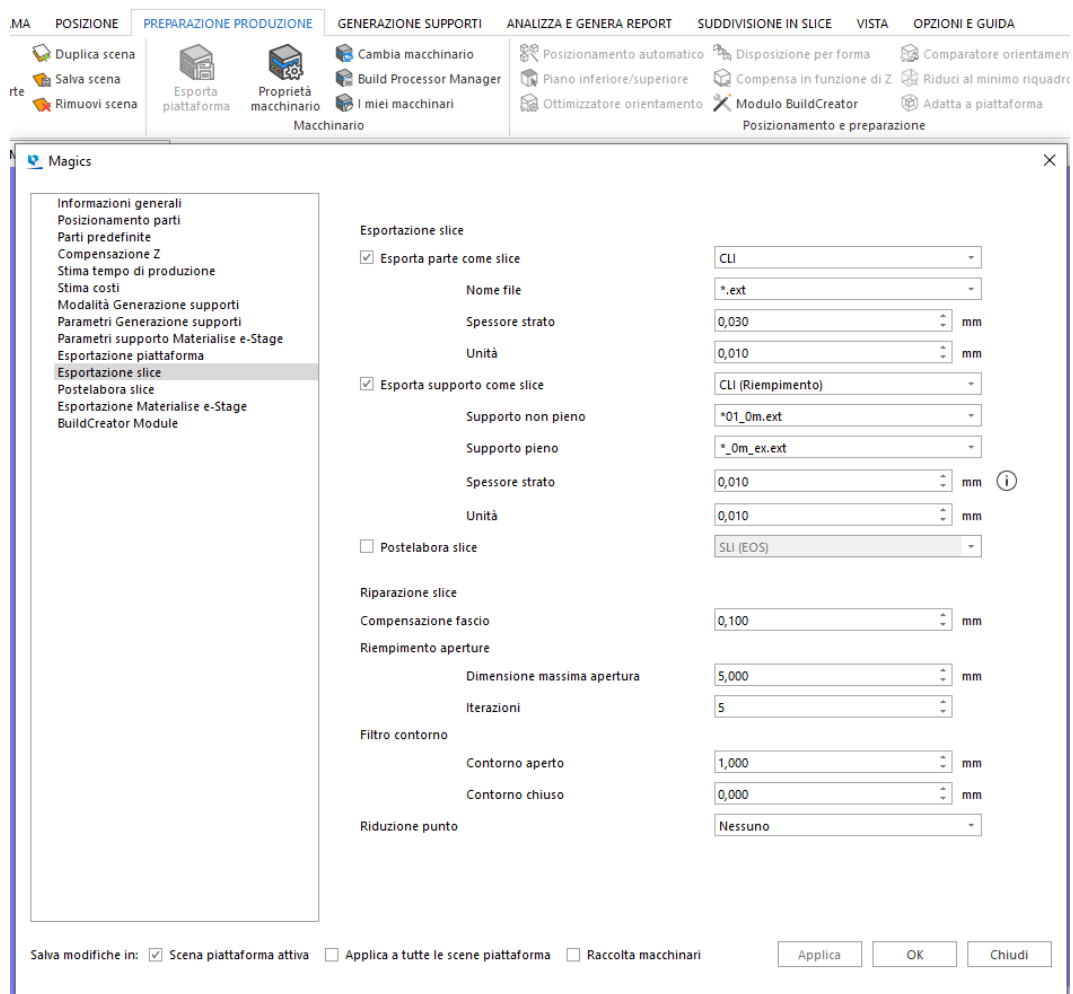


Figura 79 Menù di configurazione macchinario in Magics

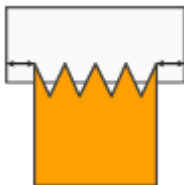
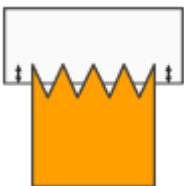
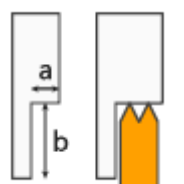
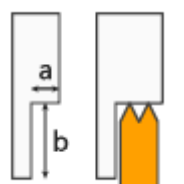
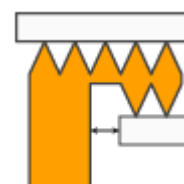
La piattaforma è ora configurata per la produzione di componenti in AlSi10Mg con il sistema EOS M290. Configurazioni simili possono essere effettuate con altri macchinari considerando le voci sopraindicate.

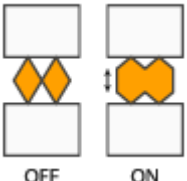
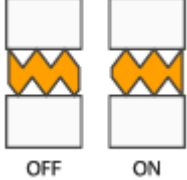
3.4.2.2 Configurazione delle strategie per la generazione delle strutture di supporto

Con le precedenti impostazioni si passa ora al modulo di generazione dei supporti. Per la tipologia block è opportuno selezionare adeguati valori dei parametri di generazione per l'AlSi10Mg.

I parametri delle strutture di supporto sono divisi in parametri generali comuni a tutte le tipologie e quelli dedicati alle strutture di tipo block. I primi sono riportati in Tabella 6.

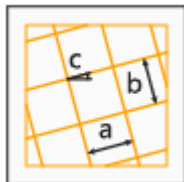
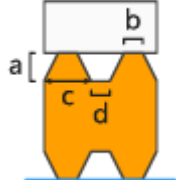
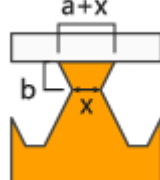
Tabella 6 Parametri e valori per le strutture di supporto per la lega AlSi10Mg

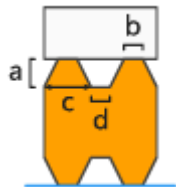
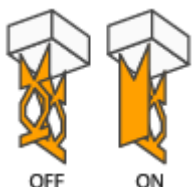
Parametro	Definizione	Schema	Valore
Offset XY	Definisce la distanza tra lo spigolo della parte la cui superficie deve essere supportata e la struttura di supporto		0.1 mm
Offset Z	Definisce la distanza tra la parte superiore del supporto e la sua rispettiva superficie		0.03 mm
Offset nessun supporto	Una parete verticale può essere di supporto ad un'altra superficie adiacente se le sporgenze sono molto piccole		0.8 mm
Altezza minima parete di supporto	Altezza minima per una parete per essere considerata di supporto		0.5 mm
Offset parete verticale	Nel caso che il supporto venga generato affianco ad una parete verticale si assegna una distanza tale da consentire una facilitazione nella successiva rimozione		0.4 mm
Regola strategia di supporto	Modifica la posizione delle intersezioni tra le linee di riempimento in modo da supportare i minimi locali		Attiva
Aggiungi supporto a punto	Aggiunge un supporto a punto per supportare minimi locali		Attiva
Altezza massima per la linea di rinforzo	Aggiunge una linea di rinforzo per punti troppo fragili per sostenersi da soli poiché caratterizzati da un'altezza eccessiva		4 mm

Bordo pieno	Aggiunge un bordo pieno per rendere le connessioni sufficientemente resistenti		Attivo
Sincronizzazione dei denti	Sincronizza i denti superiori con quelli inferiori		Attivo
Collega alla piattaforma	Adatta automaticamente la lunghezza del supporto in modo da raggiungere la piattaforma		Attivo

Nel caso di strutture block occorre definire dei parametri dedicati a questa specifica tipologia. Le definizioni, gli schemi descrittivi e i valori consigliati sono riportati in Tabella 7.

Tabella 7 Parametri valori utili alla generazione dei supporti di tipo Block per la lega AlSi10Mg

Parametro	Definizione	Schema	Valore
Strategia di riempimento	Il supporto block è costituito da una griglia di linee X e Y, chiamate riempimento.		Distanza X: 0.7 mm Distanza Y: 0.7 mm Angolo C: 45°
Denti di riempimento	Per agevolare la rimozione pur rimanendo adeguatamente resistente il profilo dentato deve avere una specifica geometria		Altezza a: 1 mm
			Lunghezza b: 0.2 mm
			Base c: 0.6 mm
			Intervallo d: 0.1 mm
Punto di rottura del dente	Posizione del punto di rottura		Aggiunta a: 0 mm Altezza b: 0 mm
Sincronizzazione dei denti	Occorre vincolare la strategia in modo che i denti non si intersechino mai		Attiva
Frammentazione	Per agevolare la rimozione le strutture block vengono frammentate		Intervallo X: 5.6 mm
			Intervallo Y: 5.6 mm

			Distanza c: 0.7 mm
Disegna bordi	Il bordo del supporto viene rinforzato da bordi lungo tutto il perimetro della superficie da supportare		Attivo
Denti del bordo	Anche il profilo del bordo di rafforzamento possiede denti ma con regole geometriche differenti		Altezza a: 1.5 mm Lunghezza b: 0.1 mm Larghezza c: 0.9 mm Intervallo d: 0.1 mm
Perforazioni	Le strutture di supporto vengono perforate per ridurre le azioni necessarie alla loro successiva rimozione. La tipologia a diamante trova beneficio in una migliore fabbricabilità poiché costituita da superfici autosupportanti		Tipo a diamante Traversa a: 0.6 mm Angolo b: 60° Altezza c: 2 mm Altezza d: 0.5 mm
Bordi non perforati	La perforazione sui bordi aiuta l'inserimento di utensili in fase di rimozione		Attivo

3.4.2.3 Generazione delle strutture di supporto per la paletta Pelton

La geometria può essere ora caricata nell'ambiente. Occorre selezionare una scena in cui si indica proprio la configurazione da adottare. La geometria va posizionata in tavola in X e Y mentre per ciò che concerne Z va osservato che occorre lasciare spazio per le successive operazioni di distacco. Poiché si impiegherà una troncatrice abrasiva a controllo numerico bisogna valutare lo spazio necessario. Poiché il disco di taglio è di 3 mm si posizionerà l'oggetto a 4 mm di altezza in modo da rendere semplici le operazioni di azzeramento in fase di taglio abrasivo. Detto posizionamento è raffigurato in Figura 80 insieme alla finestra di comando delle traslazioni oggetto.

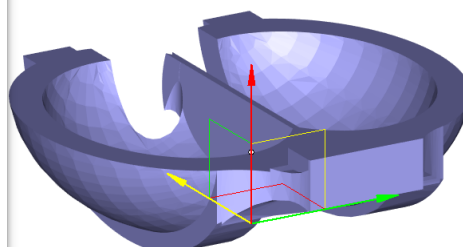
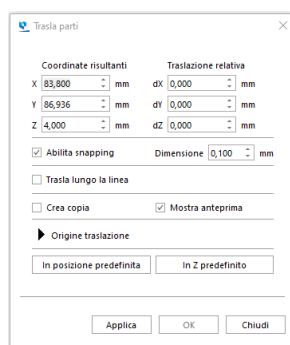


Figura 80 Oggetto caricato in Magics e posizionato sulla piattaforma di fabbricazione

Con la precedente configurazione, che naturalmente va effettuata una sola volta nella piattaforma, è possibile ora eseguire una generazione automatica dei supporti.

Solo a titolo di indagine è possibile evidenziare le superfici caratterizzate da un angolo locale di stratificazione superiore al limite ovvero quelle superfici che saranno interessate dalla generazione dei supporti. In Figura 81 tali superfici sono evidenziate in giallo, arancione e rosso con valori crescenti dell'angolo locale di stratificazione.

Attivando la procedura automatica si ottengono 10 strutture di supporto separate. In Figura 82 sono mostrate le prime due. Si possono notare le zone di frammentazione e la struttura scatolare.

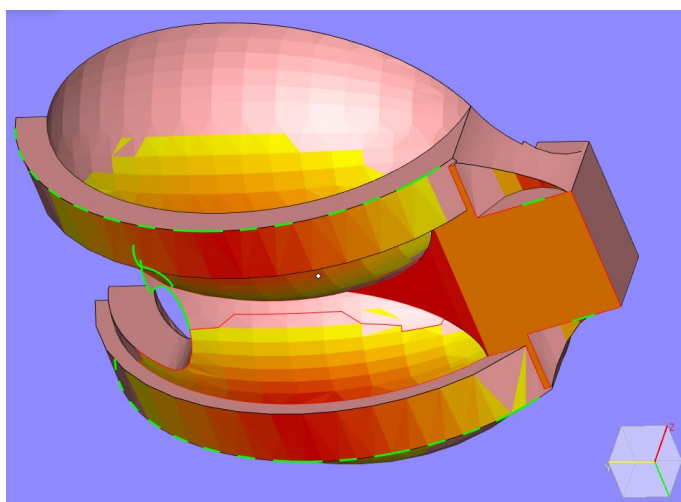


Figura 81 Superfici (con gradazione tra il giallo e il rosso) con angolo di inclinazione inferiore al limite

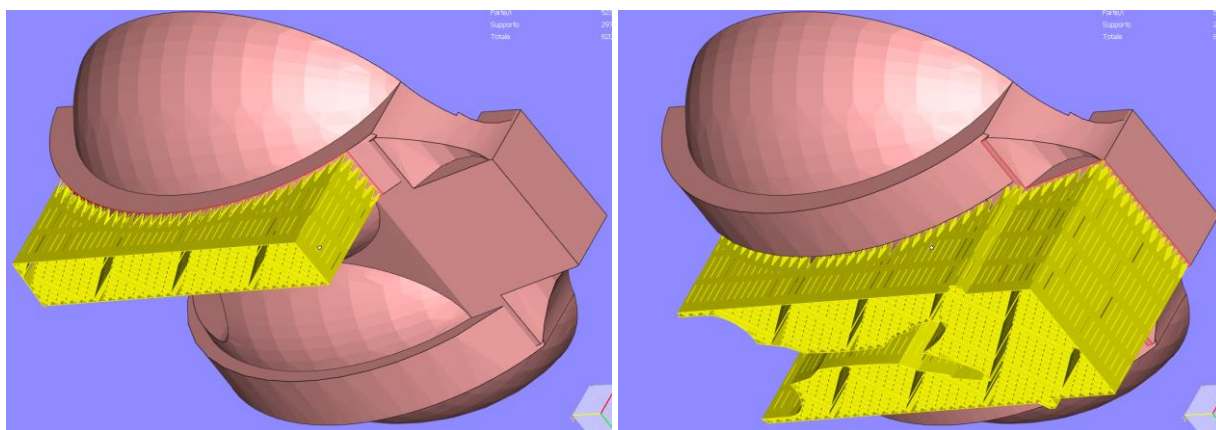


Figura 82 Visualizzazione di alcune strutture di supporto per la paletta Pelton

Uscendo dalla piattaforma di generazione le strutture create divengono un'unica entità rappresentata in rosso in Figura 83.

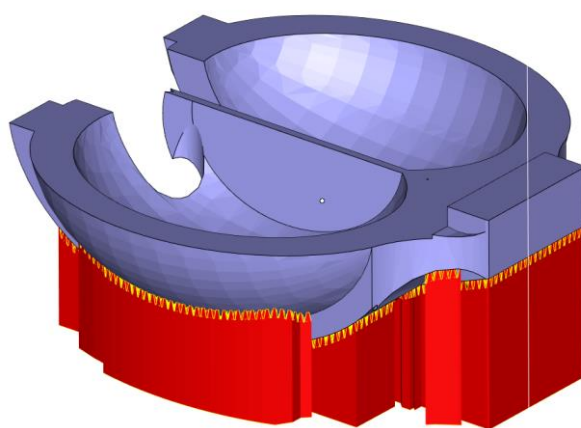


Figura 83 Paletta Pelton e strutture di supporto

4 Attività LA2.3 Fabbricazione dei componenti

In questa ultima fase si procederà alla fase di fabbricazione vera e propria con successiva validazione della qualità ottenuta mediante tecniche rugosimetriche e di reverse engineering. Tale fase sarà però preceduta dall'identificazione dei più appropriati parametri di processo fisici, denominati di esposizione. Essi saranno frutto dell'adozione dei modelli sviluppati al primo anno.

Tuttavia, in questa fase ci si è resi conto come la fase di post-processing che ha un peso nella produzione vera e propria debba costituire un elemento di flessibilità piuttosto che focalizzarsi su un'unica orientazione della paletta. Va anche considerato che il tamburo è un organo molto semplice da costruire in operazioni di tornitura tradizionali. Con questa premessa si è voluto operare come a seguire.

Sono state scelte diverse orientazioni di palette e sono state condotte tutte le fasi di processo Selective Laser Melting fino alla generazione dei file macchina per ciascuna tipologia. È stata eseguita una fabbricazione fisica di ogni paletta caratterizzata dalla specifica orientazione. Ciascuna paletta è stata sottoposta alla misura della rugosità superficiale e della macrogeometria attraverso reverse engineering. Nonostante tale attività abbia necessitato di molti più sforzi, soprattutto in fase di caratterizzazione, i risultati hanno soddisfatto meglio l'obiettivo di flessibilità dando contezza di quali effetti siano connessi con la fabbricazione di una medesima palettatura con diverse orientazioni in tavola dal punto di vista dei tempi di produzione e della qualità ottenuta.

4.1 Parametri di fabbricazione

4.1.1 Parametri di macchina

I parametri di macchina sono quella famiglia di fattori che riguardano la parte termica della piattaforma, la cinematica del recoater, la velocità del sistema di ricircolazione, la configurazione del primo layer. A seguire le indicazioni necessarie ad un corretto funzionamento della M290 con il materiale AlSi10Mg.

- Temperatura della piattaforma: 160°C
- Velocità del recoater in fase di sviluppo del layer di polvere: 150 mm/s
- Velocità del recoater in fase di ritorno: 500 mm/s
- Gas protettivo: argon
- Pressione differenziale del sistema di ricircolo dell'argon: 0.38 bar
- Boost del dosing factor al primo layer: 300%

La temperatura della piattaforma è suggerita al valore indicato per migliorare lo stato di tensioni che si ingenera tra la parte e la piattaforma.

La velocità del recoater è stabilita considerando la lega leggera la cui polvere deve essere stesa senza fenomeni dinamici che ne impoveriscano la capacità di impacchettamento. Il ritorno è effettuata alla velocità limite che non provoca turbolenze capaci di muovere le polveri sottostanti.

La scelta del gas protettivo è dettata dalla reattività dell'alluminio che si ossida in presenza di ossigeno e anche di azoto. La pressione differenziale si esplica nella velocità del gas che deve essere mantenuta bassa per via del processamento di una lega la cui densità è piuttosto bassa.

L'ultimo fattore riguarda la quantità di polvere impiegata per stendere il primo layer. Generalmente la quantità si calcola considerando gli spazi tra le particelle, la contrazione in fase liquida, il materiale perso nelle proiezioni piroclastiche. Tuttavia, il primo layer è caratterizzato da un substrato totalmente diverso rispetto ai successivi layer. Infatti, esso viene disteso sulla superficie liscia della tavola che fa scivolare via le particelle. Per questo motivo l'ammontare di polvere viene triplicato per questa lega di alluminio.

4.1.2 Parametri di esposizione

4.1.2.1 Definizioni dei parametri

I parametri di esposizione in un processo Selective Laser melting hanno avuto un'evoluzione piuttosto articolata nel corso degli anni. Allo stato attuale esistono ben consolidate metodologie e definizioni la cui interpretazione necessita di alcune premesse e descrizioni. Nel seguito verranno illustrati tali informazioni.

Durante l'esposizione occorre definire la zona di cura come quella zona effettivamente trattata dal laser. Questa zona convenzionalmente circolare ha un diametro maggiore del diametro del laser beam indicato dal costruttore (Figura 84 a sinistra). Il diametro di cura è quello considerato per la compensazione del percorso del laser esattamente come si compensa per il raggio della fresa nel percorso utensile di una lavorazione per asportazione (Figura 84 a destra).

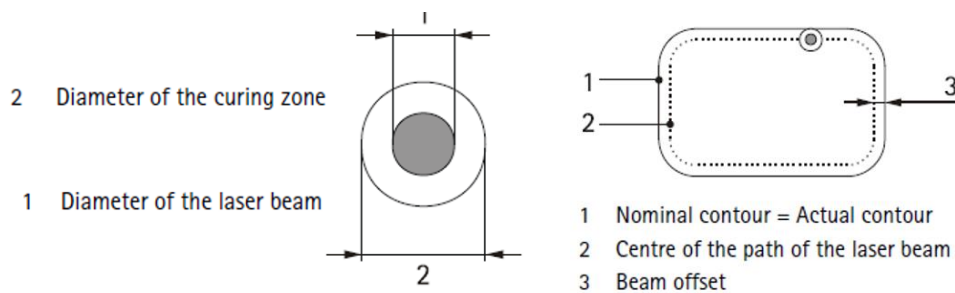


Figura 84 Diametro del laser beam e zona di cura (sinistra) e relativa compensazione nel percorso laser (destra).

La scansione viene distinta in due parti: il contour e l'hatching rispettivamente per la scansione del perimetro e del riempimento della zona considerata nel layer. Per quanto riguarda l'hatching occorre far terminare la scansione prima di arrivare al perimetro compensando per lo spessore dello stesso. Tuttavia, per vari motivi cinematici e termici si considera un addendum a questo offset chiamato hatch offset (Figura 85).

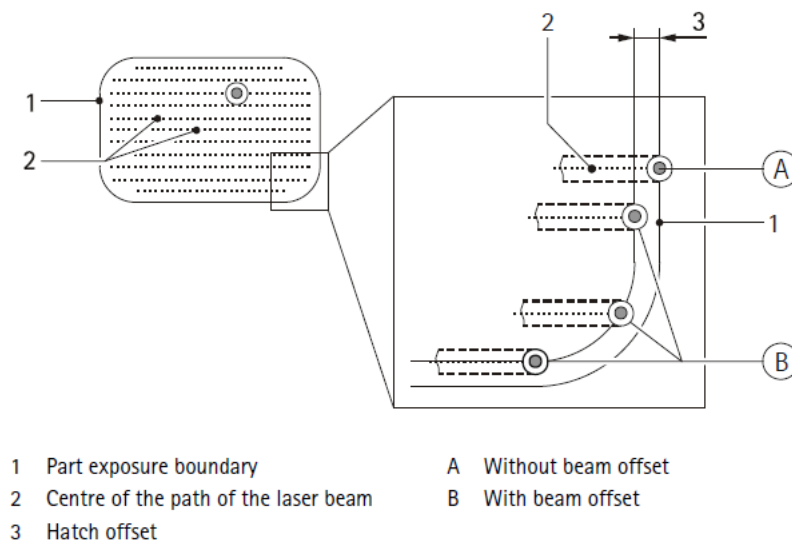


Figura 85 Schematizzazione dell'hatch offset

La zona di scansione dell'hatching può essere caratterizzata da diversi pattern. Per la lega AlSi10Mg è opportuno impiegare il pattern denominato stripes. Si tratta di linee di scansione di lunghezza contenuta scandite parallelamente a se stesse fino a riempire tutta la zona interessata. Per la precisione la lunghezza

della scansione viene denominata larghezza della stripe. La Figura 86 mostra la schematizzazione di questo pattern ove si evidenzia come le stripes vanno sovrapposte l'un l'altra per completare adeguatamente le zone di transizione in accensione e spegnimento del laser. Questa sovrapposizione viene denominata stripe overlap.

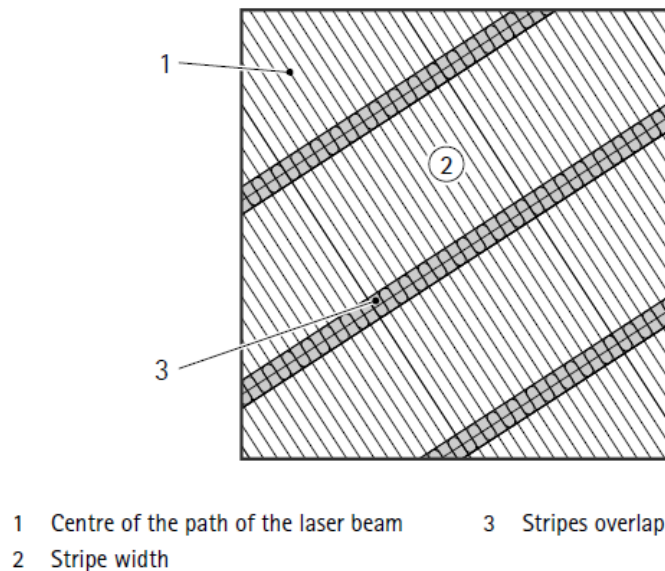


Figura 86 Pattern di scansione a stripes

È importante definire i parametri di scansione considerando la relazione di adiacenza tra i diversi layer. Ciò significa considerare se al di sotto e al di sopra della scansione considerata esista o meno una zona già scansionata o da scansionare. Per questo motivo si identificano convenzionalmente quattro zone differenti considerando lo schema riportato in Figura 87. Esse vengono definite come a seguire:

- UpSkin: area di scansione sopra la quale non viene effettuata un'ulteriore scansione.
- DownSkin: area di scansione sotto la quale precedentemente non è stata effettuata alcuna scansione.
- InFill: area di scansione interna, vale a dire che sopra e sotto sono presenti scansioni.
- Overlap: zona di sovrapposizione tra un UpSkin o un DownSkin e la zona di InFill.

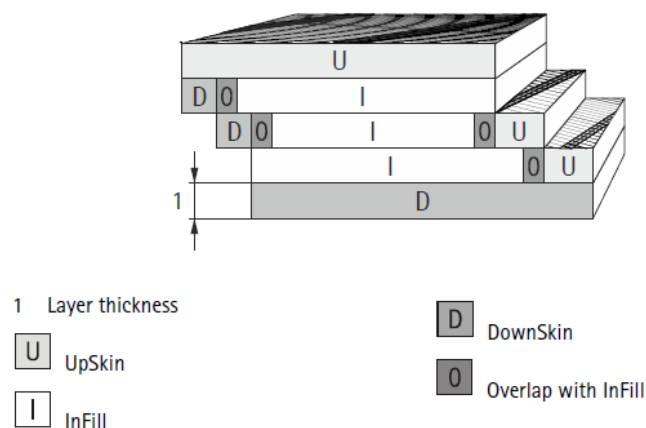


Figura 87 Definizione di UpSkin, DownSkin, Infill e overlap.

Con il termine Skywriting si indica una strategia di accensione e spegnimento del laser nelle zone a forte variazione della direzione del vettore velocità di scansione. Come mostrato nella Figura 88 di sinistra una scansione a zig zag è caratterizzata dalle zone critiche colorate in rosso in cui la direzione dello spostamento cambia di 180°. Tali zone sono critiche e la zona fabbricata sarà caratterizzata da difetti. Se però si sposta questa peculiarità cinematica all'esterno dell'area da scansionare tale difetto non si verificherà più. Naturalmente al di fuori della zona da scansionare il laser verrà spento. La figura di destra mostra la schematizzazione del risultato di scansione quando si impiega questa metodologia.

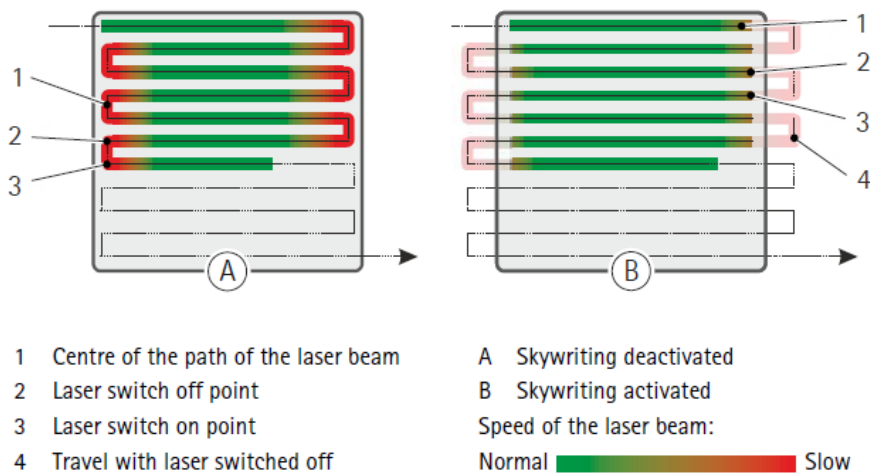


Figura 88 Scansione con metodologia Skywriting disattiva (sinistra) e attiva (destra).

Durante il processo di scansione il flusso di gas protettivo interessa l'intera piattaforma. Va però notato che i gas prodotti dal laser in azione sulle polveri provocano il cosiddetto "smoke" ovvero una scia di materiale e calore. È opportuno che la direzione in cui il laser viaggia e quella del flusso protettivo siano sempre contrastanti in modo da non alterare il letto di polvere che deve essere ancora scansionato. Un'opzione nell'EOSPRINT è quella dell'ottimizzazione del flusso che risulta proprio nello scopo appena descritto. La Figura 89 mostra la schematizzazione di questa metodologia.

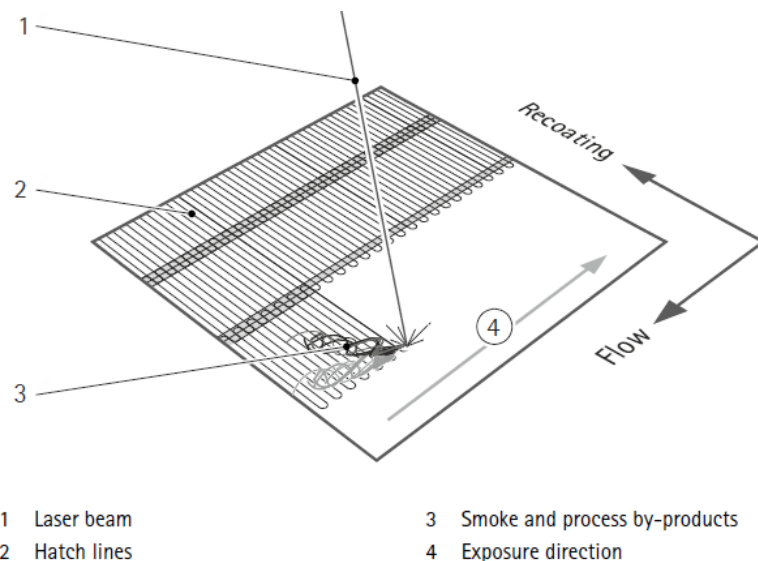


Figura 89 Metodologia dell'ottimizzazione del flusso rispetto alla direzione di scansione

Layer su layer le scansioni si sovrappongono creando una sommazione delle energie coinvolte nel consolidamento. Tale accumulo di energie si esplica in un gradiente termico sovente responsabile di deformazioni indotte dalle tensioni residue nel materiale. Gli studi hanno dimostrato come la sovrapposizione di scansioni con i medesimi pattern coincida con un'esaltazione di tale fenomeno pertanto è opportuno allontanare il più possibile tale occorrenza. Si tratta di ruotare le scansioni in modo da avere una sovrapposizione su layer il più lontano possibile. Il valore dell'angolo di rotazione che permette di ottenere tale scopo è 67° . Tale parametro è chiamato hatch rotation (Figura 90).

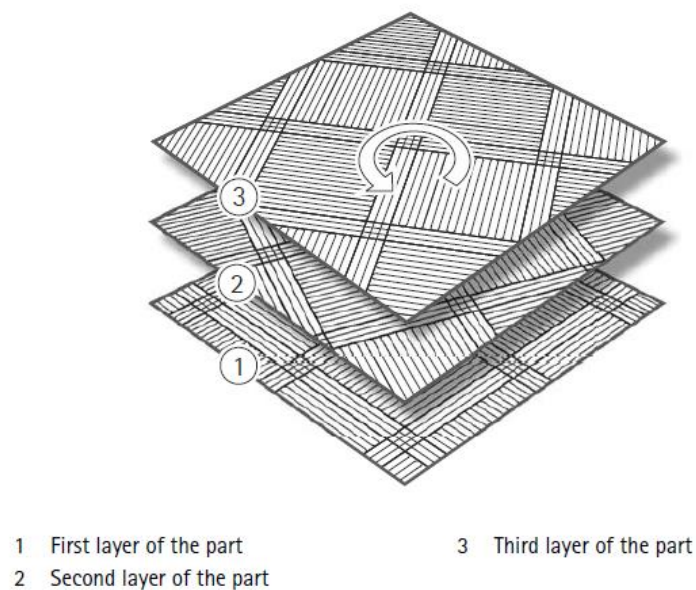


Figura 90 Schematizzazione dell'hatch rotation

Con riferimento alla Figura 91 vengono ora fornite similari definizioni per i parametri del contour.

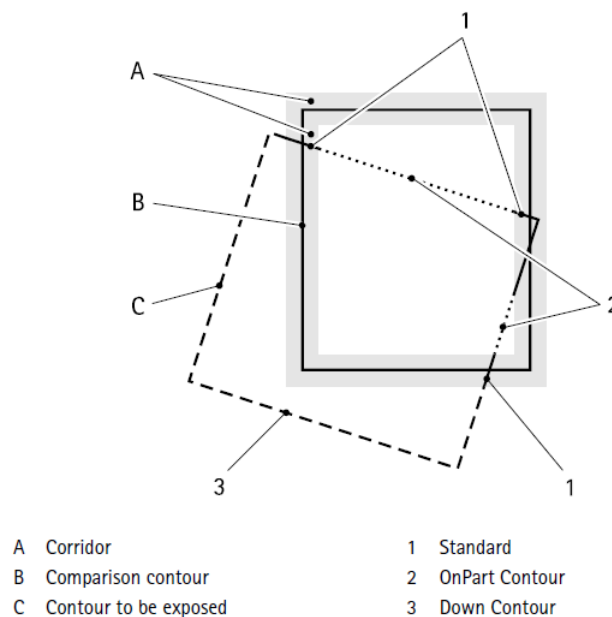


Figura 91 Definizione del corridor e delle tipologie di contour

Si definisce corridor una striscia di superficie intorno alla linea nominale del contour. Sul layer indicato dalla linea continua si avrà pertanto il contorno e, all'interno, l'hatching. I parametri di esposizione del contour del layer successivo si distinguono in tre tipologie in accordo alle seguenti definizioni:

- OnPart contour: se la scansione del contour del nuovo layer si trova fuori del corridor e sopra il pezzo.
- Standard: se la scansione del contour del nuovo layer giace sul corridor.
- DownContour: se la scansione del contour del nuovo layer si esplica su polveri non scansionate e, di conseguenza, è in DownSkin.

Si definisce una edge una feature geometrica molto piccola che si esplica fuori del contorno di un pezzo di dimensioni normali. Un fattore denominato edge factor permette di definire come scansionare feature periferiche che saranno caratterizzate da spigolosità più o meno accentuate. Un esempio dell'implementazione di questo fattore è riportato in Figura 92. In modo simile è possibile definire la penetrazione del percorso nella feature mediante un fattore denominato radius factor che si calcola come il rapporto tra la distanza raggiungibile e il diametro del laser beam (Figura 93).

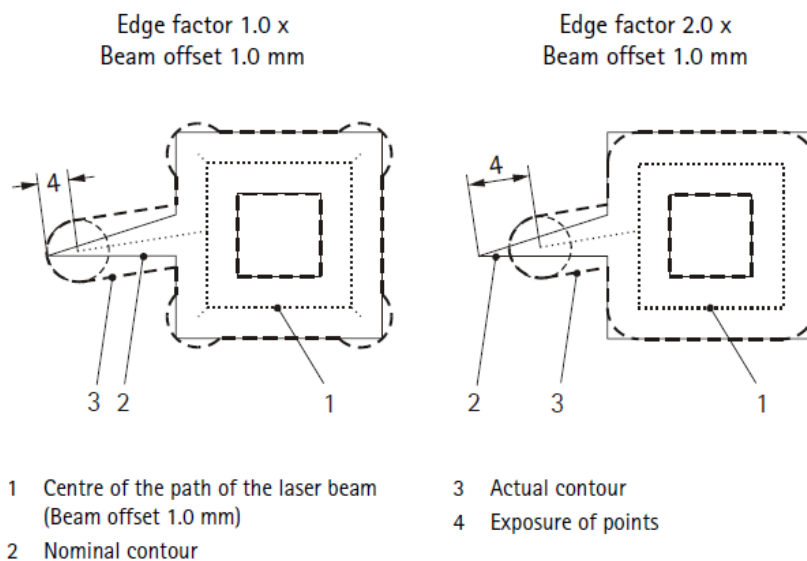


Figura 92 Effetto dell'edge factor

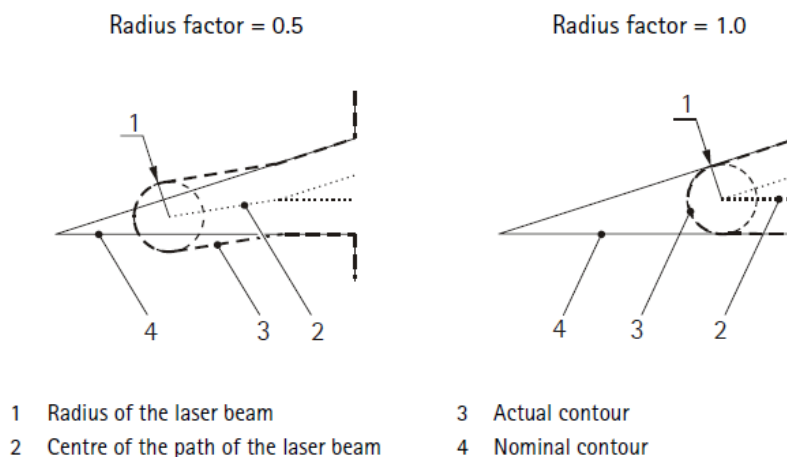


Figura 93 Effetto della modifica del radius factor.

4.1.2.2 Valori dei parametri di esposizione

Con le definizioni appena fornite si darà ora contezza dei parametri di esposizione consigliati per la lega AlSi10Mg. Tali valori sono frutto della sperimentazione e della successiva analisi e sintesi dei dati effettuata nel primo anno.

In EOSPRINT vi è un'area molto vasta ove questi parametri possono essere immessi in modo strutturato. La Figura 94 mostra la schermata relativa.

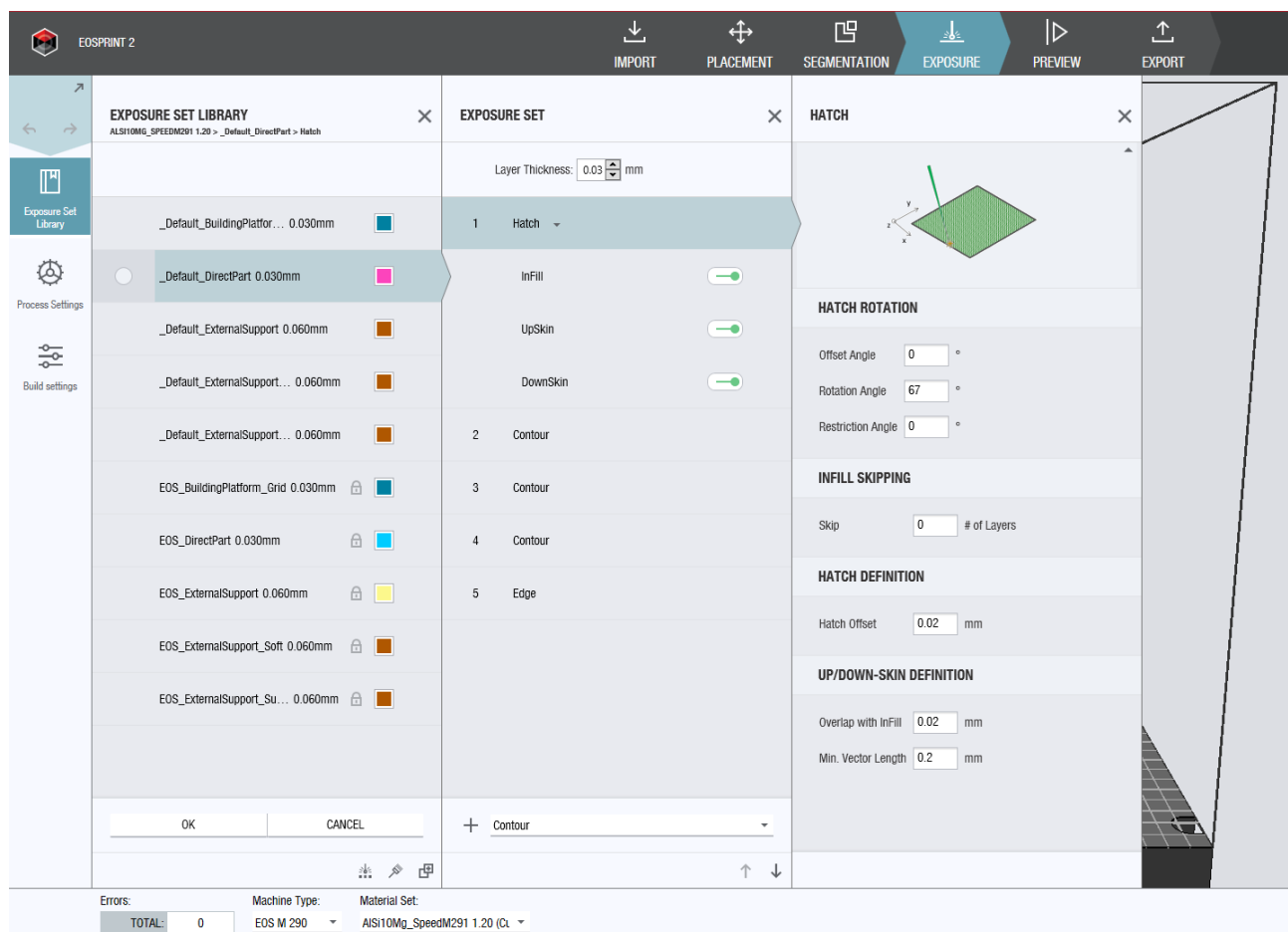


Figura 94 Schermata dell'EOSPRINT inerente il settaggio dei parametri di esposizione.

Come si nota vi è una sequenza in cui le tipologie di scansione sono effettuate. In genere la struttura non viene modificata dall'utente ma, in questo caso, il progetto prevede delle modifiche non solo nei parametri ma anche nelle operazioni da eseguire. La Figura 95 mostra in un diagramma di flusso la sequenza proposta. Si nota come a seguire della scansione di hatching vi sia stata aggiunta un'altra scansione con sono l'UpSkin. Ciò rende possibile il remelting delle superfici orizzontali in accordo a quanto previsto dalle sperimentazioni del primo anno. Le successive scansioni di contour sono di tipo tradizionale ovvero a bassa energia. A queste è stata aggiunta una terza scansione con dei parametri innovativi provenienti dall'ottimizzazione dei modelli ricavati al primo anno. Infine l'edge è di tipo tradizionale.

In base ai modelli ricavati è possibile effettuare un'ottimizzazione per la rugosità minima. Va rilevato che mentre è possibile associare un set di parametri all'UpSkin non è possibile associare diversi parametri ai contour. Per il primo si procede ad una ottimizzazione dell'unica variabile di uscita rispetto ai tre input presi in considerazione dalla modellazione. L'ottimizzazione e i livelli risultanti sono mostrati in Figura 96.

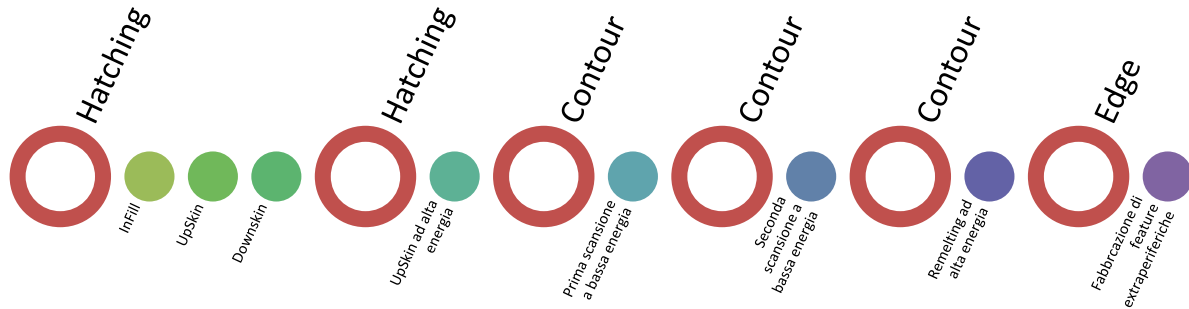


Figura 95 Sequenza delle operazioni di scansione proposta nel progetto

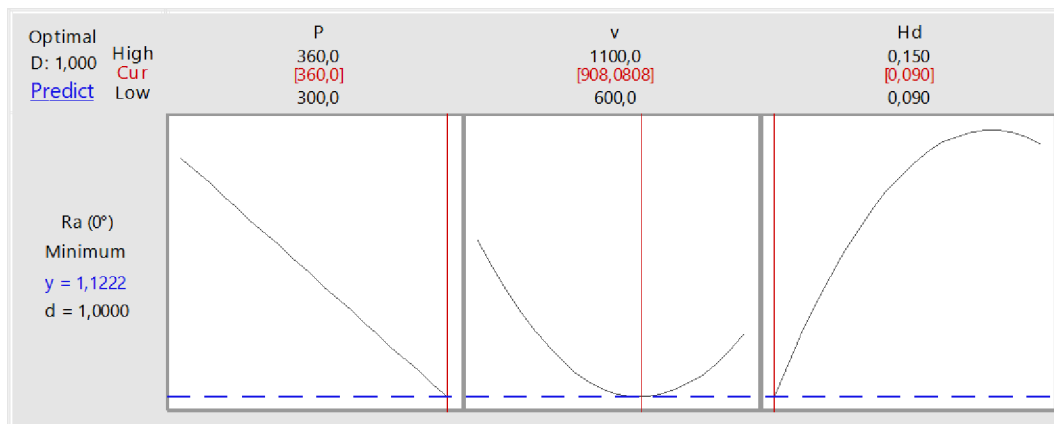


Figura 96 Minimizzazione della rugosità per 0°.

I livelli ottimi sono dunque una potenza di 360 W una velocità di scansione di 908 mm/s e un hatch distance di 0.09 mm.

Per i contour è necessario effettuare una ottimizzazione congiunta. Come noto in tale metodologia si considera una combinazione dei vari output andando a massimizzare una funzione denominata desiderability globale quale media geometrica delle singole desiderability associate ad ogni modello in accordo all'equazione:

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right)^{\frac{1}{\sum r_i}}$$

dove r_i è l'importanza di ogni variabile rispetto alle altre. Per la produzione di palette e per dare massima flessibilità al metodo si scegliere una eguale importanza tra le variabili.

La funzione desirability viene calcolata come:

$$d_i(\hat{y}_i(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{U_i - \hat{y}_i(x)}{U_i - L_i} \right)^t & \text{if } L_i < \hat{y}_i(x) < U_i \\ 0 & \text{if } \hat{y}_i(x) > U_i \end{cases}$$

dove $\hat{y}_i(x)$ è l'i-esima risposta, L_i è un valore piccolo a sufficienza, U_i è il Massimo valore accettabile, t è il peso per determinare quanto sia importante che il fattore $\hat{y}_i$ sia vicino al minimo. In Figura 97 è riportata l'ottimizzazione e i valori che permettono di ottenere una desirability globale di 0.9137.

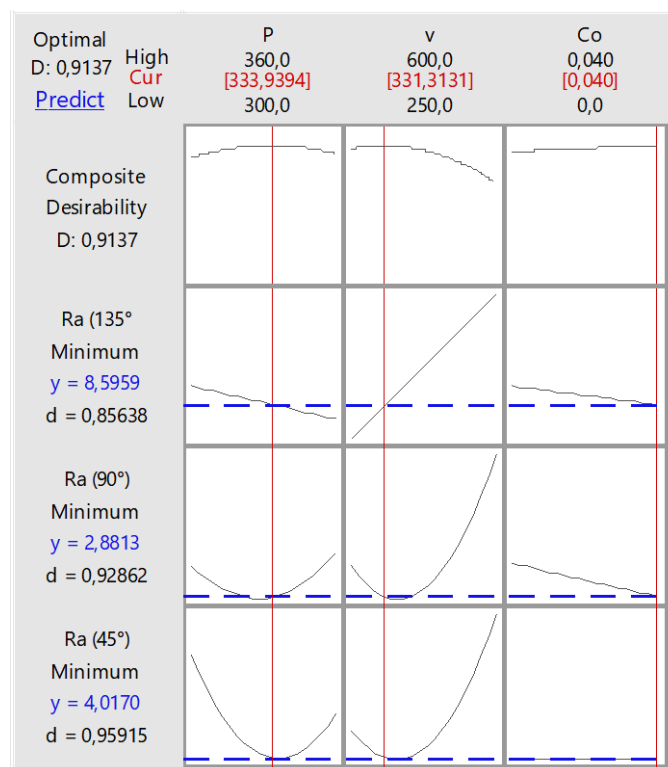


Figura 97 Ottimizzazione congiunta dei modelli per 45°, 90° e 135°.

È ora possibile fornire i set globali dei parametri di esposizione da usare per la produzione di palette Pelton.

I parametri per l'hatch sono suddivisi in parametri generali e parametri relativi all'InFill, all'UpSkin e al DownSkin. I primi sono riportati in Tabella 8 suddivisi per aree identificative. I parametri specifici sono elencati in Tabella 9. Da notare che per l'UpSkin e il DownSkin non si scelgono pattern di alcun tipo al fine di migliorare le superfici orizzontali della parte. Le energie specifiche sono differenti in quanto variano le possibilità di scambio termico per superfici scansionate a contatto con le polveri o con altre zone consolidate. Tabella 1

Tabella 8 Parametri di esposizione generali dell'hatch

Area identificativa	Parametro di esposizione	Valore del parametro
Hatch rotation	Offset angle	0°
	Rotation angle	67°
Hatch definition	Hatch offset	0.02 mm
	Hatch overlap	0.02 mm
	Minimo vettore	0.2 mm

Tabella 9 Parametri di esposizione specifici dell'hatch

Variabile	Valore per l'Infill	Valore per l'UpSkin	Valore per il DownSkin
Tipologia di pattern	Stripes	Nessuno	Nessuno
Larghezza delle stripes	7 mm	-	-
Overlap delle stripes	0.02 mm	-	-
Spessore della pelle	-	4 mm	4 mm
Potenza del laser	370W	320 W	320 W
Velocità di scansione	1300 mm/s	1850 mm/s	1500 mm/s

Distanza di hatching	0.13 mm	0.09 mm	0.1 mm
----------------------	---------	---------	--------

Come indicato al primo gruppo di hatching se ne aggiunge un secondo allo scopo di effettuare il remelting sulle superfici orizzontali. I parametri di esposizione sono indicati nella Tabella 13

Infine, in Tabella 11 vengono riportati i valori dei parametri di esposizione trovati in precedenza per le tre operazioni di contour.

Tabella 10 Parametri di esposizione per il secondo hatching

Variabile	Valore per l'UpSkin
Offset angle	0°
Rotation angle	67°
Hatch offset	0.02 mm
Hatch overlap	0.02 mm
Spessore della pelle	4 mm
Potenza del laser	360 W
Velocità di scansione	908 mm/s
Distanza di hatching	0.09 mm

Tabella 11 Parametri di esposizione delle tre operazioni di contour

Variabile	Valore per il primo contour (standard)	Valore per il secondo contour (standard)	Valore per il terzo contour (sperimentale)
Contour offset	0.02 mm	0 mm	0.04 mm
Numero di layer	2	2	2
Corridor	0.06 mm	0.06 mm	0.06 mm
Potenza Standard	95 W	120 W	334 W
Velocità Standard	900 mm/s	900 mm/s	331 mm/s
Potenza DownContour	120 W	135 W	334 W
Velocità DownContour	400 mm/s	400 mm/s	331 mm/s
Potenza OnPart	95 W	95 W	334 W
Velocità OnPart	900 mm/s	900 mm/s	331 mm/s

4.1.3 Studio di diverse orientazioni delle palette

Come sopra premesso si sceglieranno diverse orientazioni delle palette in tavola così da vederne modificati aspetti come la finitura ottenibile, i supporti necessari, tempi e costi di produzione. A tal fine l'orientazione scelta al paragrafo 3.4.2.3 con paletta orizzontale verrà indicata come 0° mentre un posizionamento verticale della stessa sarà indicato come 90°. Al fine di studiare diverse inclinazioni si farà riferimento allo schema riportato in Figura 98.

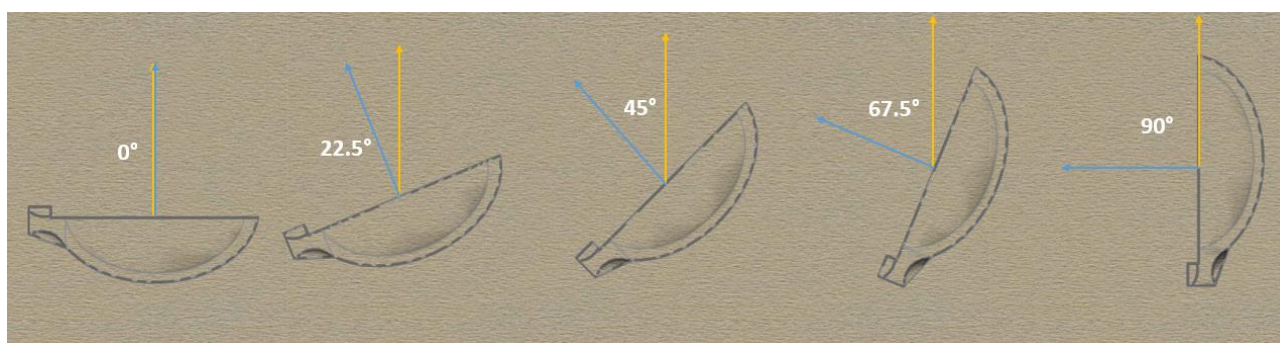


Figura 98 Orientazioni delle palette investigate nel progetto.

4.1.3.1 Creazione delle strutture di supporto per ciascuna orientazione

Per ogni palette caratterizzata da una diversa inclinazione sono state generate le strutture di supporto. La Figura 99 e la Figura 100 mostrano i risultati per le altre quattro inclinazioni considerate. Gradualmente si può notare come le strutture di supporto abbiano un volume e un'area decrescenti con l'angolo mentre si incrementa l'altezza di fabbricazione. Tuttavia, questo è solo apparente poiché l'andamento dei volumi delle strutture di supporto è più complesso di quanto non sembri. Effettuando un'analisi più approfondita e andando a misurare i volumi per ogni configurazione si ottiene il grafico di Figura 101. Il massimo dei volumi si trova in corrispondenza dell'inclinazione 22.5° anche se non è detto sia la soluzione più svantaggiosa in termini di tempi di fabbricazione poiché è caratterizzata da un'altezza relativamente bassa. L'altezza massima si trova in corrispondenza all'inclinazione di 90° che però è contraddistinta dal volume minimo necessario di strutture di supporto.

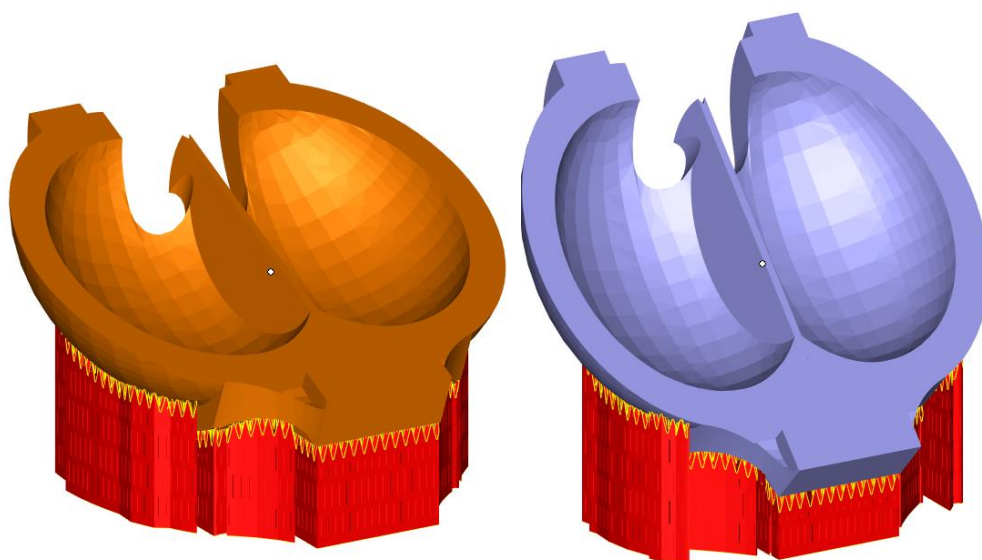


Figura 99 Strutture di supporto per palette inclinate di 22.5° (sinistra) e 45° (destra)

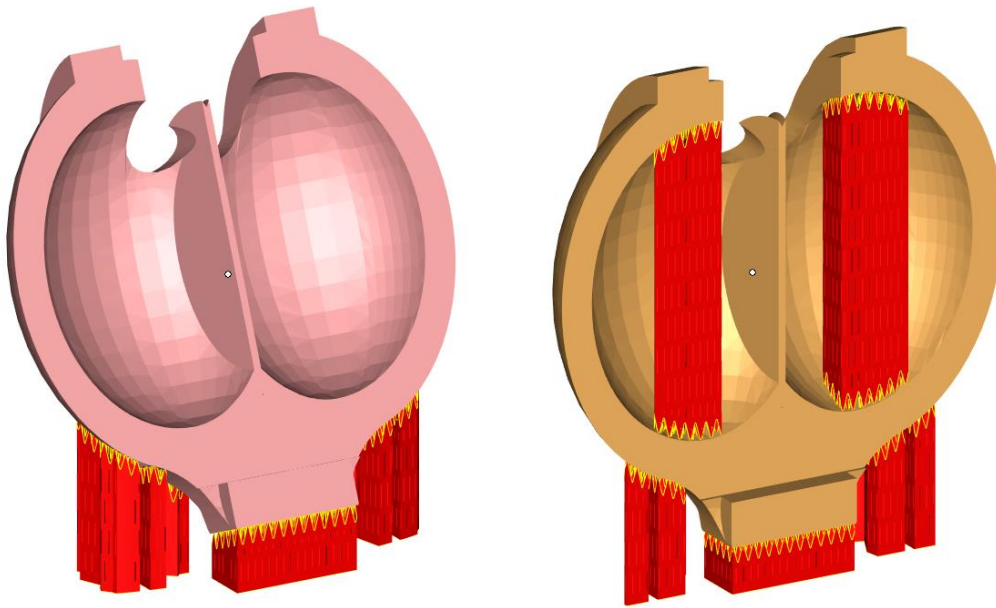


Figura 100 Strutture di supporto per palette inclinate di 67.5° (sinistra) e 90° (destra)

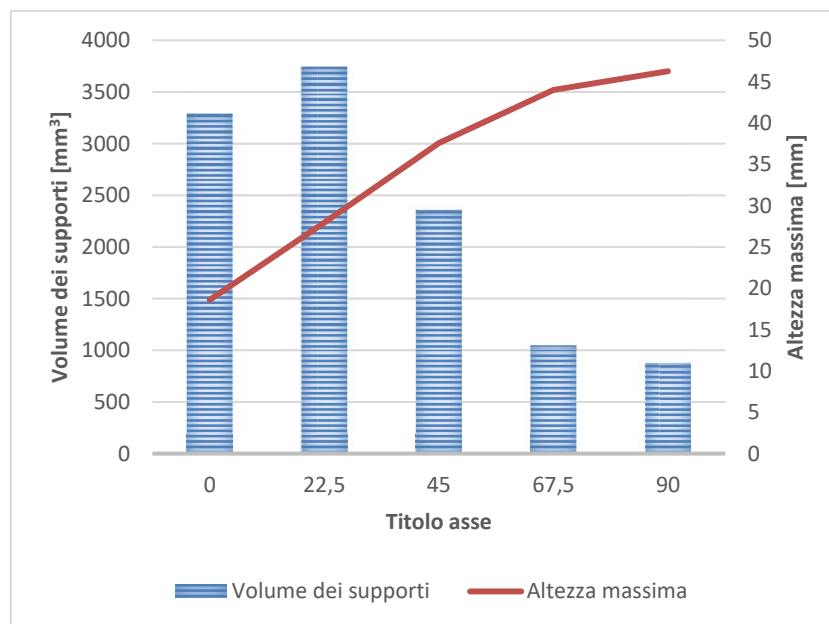


Figura 101 Andamenti dei volumi dei supporti e delle altezze massime di fabbricazione per le diverse configurazioni di orientazione delle palette in tavola

Ulteriori analisi valutative devono essere fatte quando si considerano configurazioni di produzione. Vale a dire nell'annidamento è possibile che una soluzione sia migliore di un'altra poiché conduce ad una sola piattaforma di fabbricazione e un risparmio in altezza piuttosto che un risparmio in termini di volumi dei supporti. Va altresì notato come le operazioni di rimozione siano più lunghe laddove i supporti da rimuovere siano più grandi.

4.2 Fabbricazione fisica delle palette

Il workflow delle operazioni è mostrato in Figura 102. I supporti generati in Magics vengono salvati con un semplice click dato che la configurazione del sistema consente una denominazione automatica dei file compatibile con quanto viene successivamente letto dal sistema EOSPRINT.



Figura 102 Workflow della produzione delle palette

I file ordinati con le corrette estensioni e denominazioni sono mostrati in Figura 103. Si nota come la dimensione dei file CLI sia molto più grande delle parti in STL. Ciò è dovuto all’enorme superficie posseduta dalle strutture cellulari della tipologia block scelta per tali elementi. I file così configurati possono essere direttamente importati in EOSPRINT senza aver cura di associare tra di loro le parti con i relativi supporti.

 Pelton 000_sup	29/12/2021 18:58	File STL	348 KB
 Pelton 000_sup01_0m	29/12/2021 18:59	CLI File	16.098 KB
 Pelton 225_sup	29/12/2021 18:59	File STL	348 KB
 Pelton 225_sup01_0m	29/12/2021 18:59	CLI File	18.285 KB
 Pelton 450_sup	29/12/2021 18:59	File STL	348 KB
 Pelton 450_sup01_0m	29/12/2021 18:59	CLI File	12.026 KB
 Pelton 675_sup	29/12/2021 18:59	File STL	348 KB
 Pelton 675_sup01_0m	29/12/2021 18:59	CLI File	5.581 KB
 Pelton 900_sup	29/12/2021 19:00	File STL	348 KB
 Pelton 900_sup01_0m	29/12/2021 19:00	CLI File	4.949 KB

Figura 103 File di uscita del Magics in formato STL e CLI rispettivamente per le parti e le strutture di supporto.

La Figura 104 riporta le geometrie con le cinque inclinazioni differenti corredate dei rispetti supporti in giallo. A lato è possibile vedere l’elenco ordinato dei raggruppamenti. Successivamente si applicano le strategie di esposizione: nella Figura 105 la colorazione in fucsia indica che le parti saranno fabbricate con i nuovi parametri.

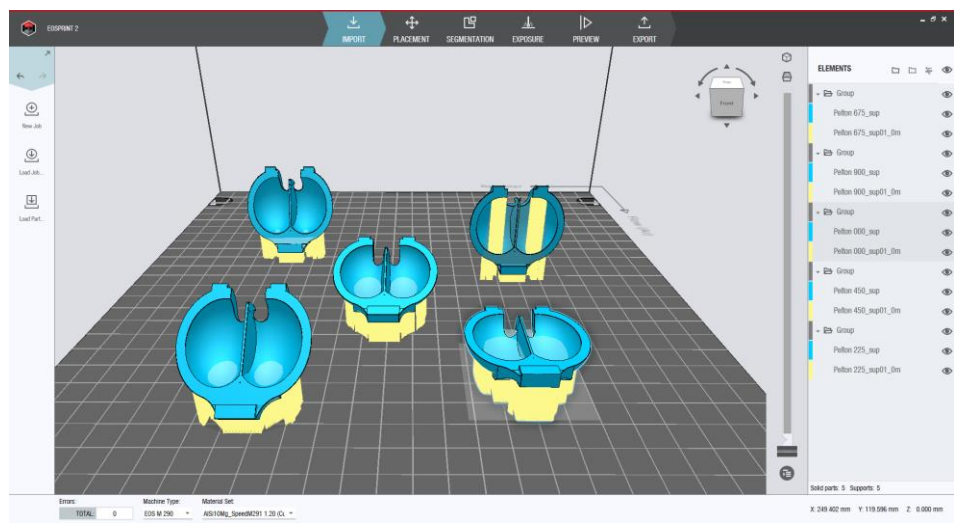


Figura 104 Caricamento delle geometrie in EOSPRINT.



Figura 105 Applicazione dei parametri di esposizione.

È possibile visionare layer per layer i percorsi di scansione con colorazione differente per ogni tipologia di scansione: blu per il contour, rosso per l'UpSkin, verde per l'InFill, nero per il DownSkin come mostrato in Figura 106.

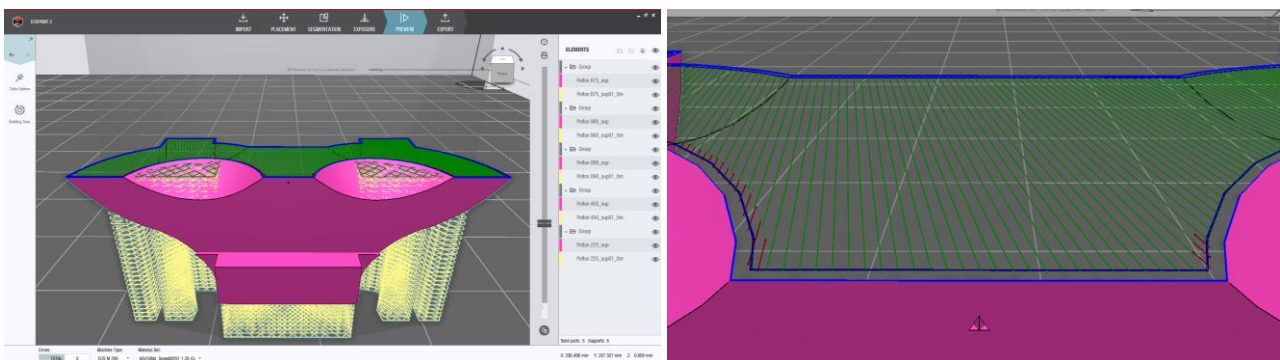


Figura 106 Preview del percorso delle scansioni laser (sinistra) e ingrandimento della zona centrale (destra)

Ora è possibile simulare fedelmente il percorso utensile poiché le istruzioni in macchina sono note punto per punto. La simulazione restituisce 6 ore e 58 minuti per la tavola così configurata.

4.2.1 Componentistica e workflow

La macchina di fabbricazione Selective Laser melting necessita di apparecchiature ausiliarie per funzionare. A seguire l'elenco dei componenti:

- Macchina EOS 290 con sistema di ricircolazione e filtraggio del gas protettivo.
- Sistema di raffreddamento del generatore del laser a fibra.
- Modulo di setacciatura per il ripristino delle polveri non utilizzate.
- Modulo di riempimento per operare il travaso delle polveri in macchina senza rischi di esplosioni.
- Modulo di trasporto: è un modulo che consente di spostare le polveri attraverso un aspiratore e ne impedisce il contatto diretto con gli operatori.
- Elevatore elettrico per il trasporto dei bin di polveri.

- Aspiratore separatore per l'eliminazione di polveri presenti sullo sportello e sugli accessori. È in grado di aspirare e porre in emulsione in glicole le polveri senza pericolo di esplosione.
- Troncatrice a controllo numerico computerizzato. Si impiega una troncatrice abrasiva a controllo per effettuare delicatamente la separazione tra la piattaforma e i pezzi fabbricati. Il controllo numerico assicura la costanza dei parametri di lavorazione e il fluido refrigerante assicura un taglio abrasivo a bassa temperatura.
- Sabbiatrice. La sabbiatura viene effettuata mediante sfere di vetro per non danneggiare la superficie dei pezzi prodotti.

I componenti appena descritti sono mostrati in Figura 107.

Il workflow consiste nell'effettuare il caricamento delle polveri, calibrare la piattaforma e stendere il primo layer, effettuare la fabbricazione, scaricare la macchina e rimuovere la piattaforma, effettuare le operazioni di post-processing attraverso la troncatrice e la sabbiatrice. Le polveri in eccesso verranno poi setacciate e il ciclo comincerà daccapo con un nuovo job. In Figura 108 è raffigurata una schematizzazione delle operazioni in macchina.



Figura 107 Componentistica utilizzata nella fase di fabbricazione fisica



Figura 108 Workflow delle operazioni in macchina

4.2.2 *Caricamento delle polveri in macchina*

Le polveri vengono movimentate in bin con chiusura stagna. La fase di caricamento consiste nel porre ad altezza adeguata il bin e, attraverso il modulo di riempimento, permetterne la discesa in macchina (Figura 109).



Figura 109 Bin per la movimentazione delle polveri (sinistra) e fase di caricamento in macchina (destra)

4.2.3 *Calibrazione e distesa del primo layer*

Il primo layer viene disteso manualmente al fine di porre adeguata cura al layer più critico e più importante della lavorazione. Prima di fare questo un'altra attenta operazione è quella di livellamento della tavola attraverso misure manuali. Come riportato in Figura 110 a bordo macchina è possibile agire su pulsanti appositi per modificare l'orientazione tridimensionale del piano. Mediante strumenti apposti sul recoater si procede a verificare la planarità rispetto a quest'ultimo in modo da rendere omogenea la distesa del layer.

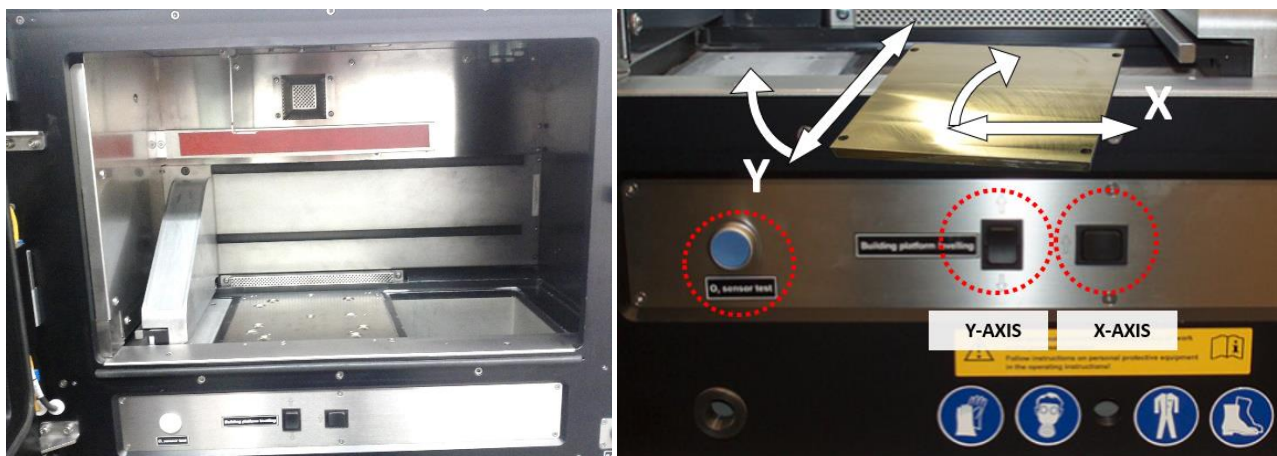


Figura 110 Camera di lavorazione e azioni di livellamento

4.2.4 Fabbricazione fisica

La fabbricazione fisica viene preceduta dallo smontaggio e dal montaggio di alcuni accessori:

- Lo schermo delle polveri nuove viene rimosso
- Il collector delle particelle e dei fumi viene montato
- Il sistema di misura del laser viene inserito
- Il recoater è movimentato a destra

La fabbricazione vera e propria può avere inizio. La macchina in automatica carica l'argon e, non appena il livello di ossigeno massimo viene raggiunto la lavorazione si avvia automaticamente.

La Figura 111 mostra le fasi di preparazione e quella di scansione di un layer.



Figura 111 Fase di inserimento degli accessori e fase di scansione

4.2.5 Estrazione del componente

Al termine della produzione la macchina si ferma automaticamente e lo sportello può essere aperto. La piccola quantità di argon si disperde nell'ambiente e, attraverso il sistema di aspirazione, si elimina la polvere in eccesso (Figura 112).

Successivamente la tavola con i componenti può essere rimossa e preparata per la successiva fase di distacco.

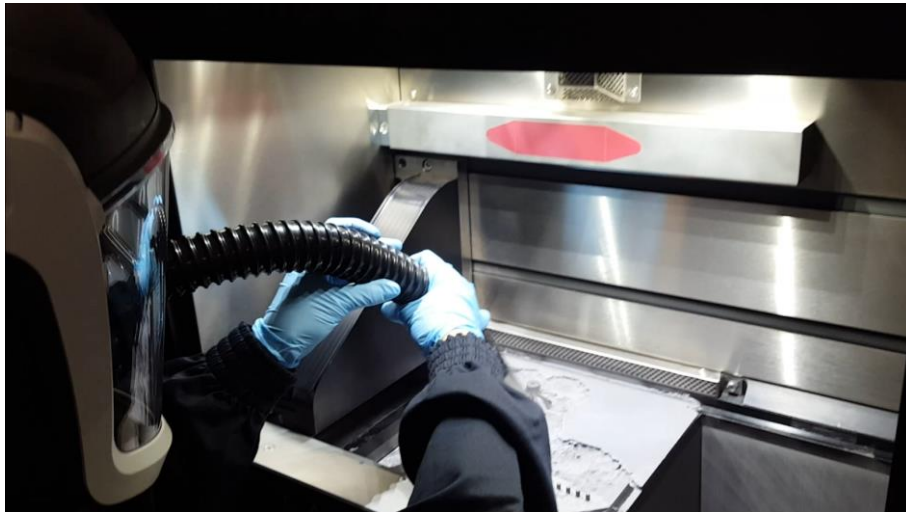


Figura 112 Eliminazione della polvere in eccesso

4.2.6 *Distacco dalla tavola di fabbricazione e post-processing*

La fase di distacco avviene nella troncatrice a controllo numerico. I valori dei parametri impostati sono:

- Diametro del disco abrasivo: 400 mm
- Avanzamento del pezzo: 50 mm/min
- Velocità di taglio periferica del disco: 40 m/s
- Spazio di riposizionamento verticale: 50 mm

Il movimento del disco è stato programmato in modo da effettuare 5 passate da 50 mm l'una a zig zag. Per tale operazione, a prescindere dalla quantità di parti in tavola sono necessari 22 minuti. La Figura 113 di sinistra mostra la fase operativa di taglio.

Dopo il distacco è possibile procedere alla pulizia delle parti tramite sabbiatura. L'uso di sfere di vetro riduce la possibilità di danneggiare le superfici, tuttavia, al fine di assicurare tale scopo è opportuno limitare a soli 15 secondi il trattamento superficiale (Figura 113).



Figura 113 Troncatura a controllo (sinistra) e sabbiatura (destra)

Le cinque palette fabbricate in Selective Laser Melting sono, infine, mostrate in Figura 114.



Figura 114 Palette dopo la fase di fabbricazione.

4.3 Analisi della rugosità ottenuta

Le misure di rugosità sono state condotte con un rugosimetro Mitutoyo Surftest SJ-412 (Figura 115) impostando i seguenti parametri per il filtraggio dei dati:

- Lunghezza di campionamento: 12.5 mm
- Raggio di raccordo dello stilo: $2\mu\text{m}$
- Frequenza spaziale di campionamento: $1.5\mu\text{m}$
- Filtro ISO 166210-22, 2015: filtro spline con cutoff di $\lambda_c=2.5\text{ mm}$
- Cutoff di taglio superior $\lambda_s=8\mu\text{m}$.



Figura 115 rugosimetro Mitutoyo Surftest SJ-412.

Le strutture di supporto non sono state rimosse per non incorrere in danneggiamenti locali individuabili dal rugosimetro. Inoltre, la loro collocazione originale non potrà essere persa in questo modo.

Sono state scelte 5 zone di misura della rugosità in accordo allo schema riportato in Figura 116.

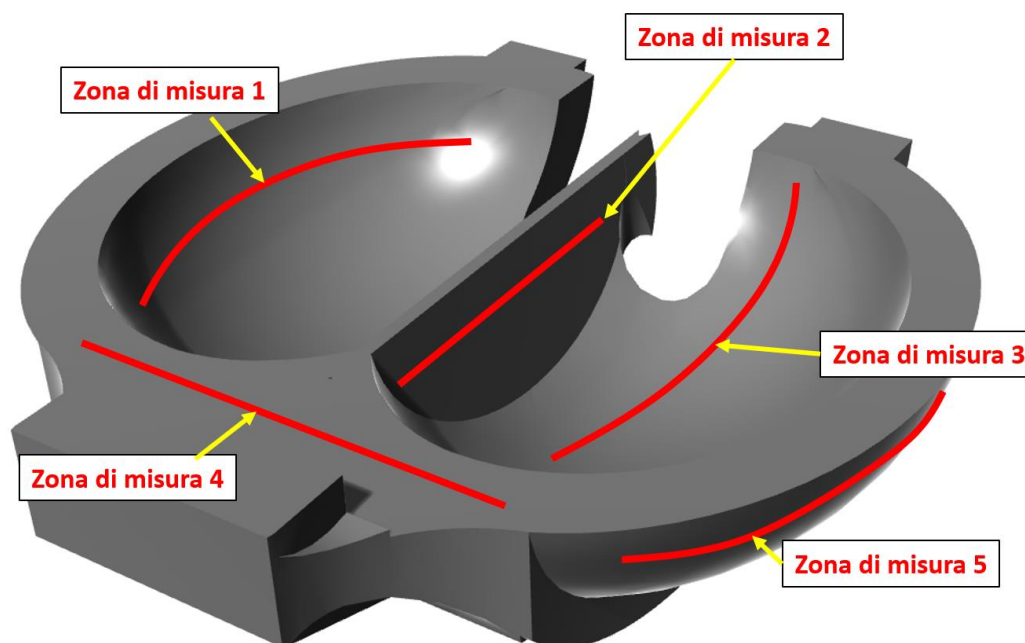


Figura 116 Zone di misura della rugosità

Le sopra-specificate misure sono state effettuate su superfici diversamente inclinate a seconda della paletta considerata. Poiché alcune di loro sono su superfici curve si è misurata l'inclinazione media della superficie caratterizzata. In Tabella 12 sono riportati i valori di tali inclinazioni per ogni zona e per ogni configurazione di paletta fabbricata.

Per comodità si riportano i valori delle rugosità teoriche previste per i quattro angoli locali di stratificazione:

- 0°: 2 μm
- 45°: 4 μm
- 90°: 2.9 μm
- 135° 8.6 μm

Tabella 12 Angoli di misura nelle zone considerate per le diverse configurazioni

Zona di misura	Configurazione paletta				
	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
1	78°	82°	85°	88°	90°
2	87°	88°	89°	89°	90°
3	21°	34°	46°	71°	88°
4	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
5	128°	116°	107°	98°	91°

I risultati delle misure sono riportati in Tabella 13. Alla prima osservazione si nota come la maggior parte delle misure di rugosità sono piuttosto omogenee segno che la modellazione ha sortito l'effetto di uniformare la qualità superficiale ottenibile in questa lavorazione. Lo scostamento maggiore, considerando la percentuale di errore, si ha per le superfici orizzontali che però hanno comunque la qualità migliore. Se si considera che le zone 4 e 5 non sono funzionali per il flusso sulla paletta, si può affermare che la rugosità di tutte e cinque le configurazioni è compresa tra 3.5 μm e 5 μm . Questo è un risultato interessante sia dal punto di vista dell'uniformità che da quello della flessibilità che comporta: infatti, non è necessario

considerare tale aspetto nella valutazione di quale orientazione in tavola offra la migliore qualità superficiale sull'interno del cucchiaio.

Tabella 13 Risultati delle misure di rugosità nelle diverse zone per le configurazioni considerate

	Configurazione paletta				
Zona di misura	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
1	4.5 μm	3.5 μm	4.0 μm	4.5 μm	3.5 μm
2	3.5 μm	3.8 μm	4.9 μm	4.2 μm	3.9 μm
3	5.1 μm	3.4 μm	4.8 μm	5.0 μm	4.1 μm
4	3.1 μm	5.5 μm	4.1 μm	4.2 μm	4.3 μm
5	8.5 μm	7.1 μm	5.6 μm	4.5 μm	4.5 μm

4.4 Misura dell'accuratezza geometrica ottenuta

Per la misurazione dell'accuratezza della forma fabbricata si è impiegato lo scanner tridimensionale a luce strutturata ATOS SO 4M. La scelta è stata dettata dalla complessità geometrica della paletta che non può essere misurata con le normali tecniche di misura da officina. Una valida alternativa sarebbe stata quella di una macchina di misura a coordinate ma, data la precisione dello strumento non a contatto scelto, si è preferita questa strada per la capacità di prendere tutte le superfici di interesse con grande rapidità. A seguire le caratteristiche di questa strumentazione:

- Punti misurati: 4000000.
- Tempo di misura: 2 s.
- Area di misura: 100 mmx100 mm.
- Spaziatura dei punti: 0.03 mm.

L'ultimo dato indica a che distanza si trovano i punti della nuvola che viene acquisita. Ovviamente non si tratta della precisione dello strumento. Va però detto che, se adeguatamente impiegato la precisione attesa è inferiore a 0.03 mm.

In Figura 117 è mostrata una foto della strumentazione e lo schema del posizionamento rispetto all'oggetto misurando.

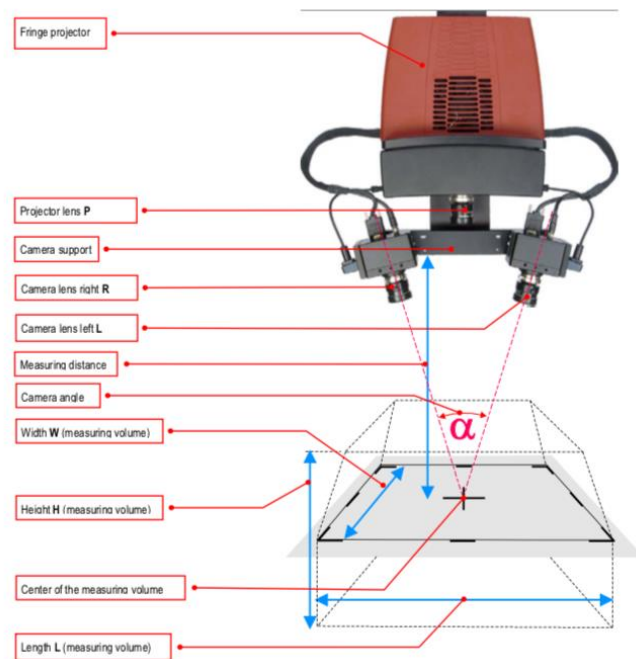


Figura 117 ATOS SO 4M e schema di posizionamento

Il sistema si basa sulla metodologia di acquisizione a luce strutturata. Si tratta di una strumentazione piuttosto costosa che però ha il vantaggio di una grande automazione nella fusione tra le varie viste. Infatti, per la scansione di un oggetto vanno effettuate varie viste, fino a quando il cammino ottico del dispositivo non è in grado di rilevare tutte le superfici. Per oggetti complessi occorrono moltissime viste e, al termine dell'acquisizione devono essere allineate e fuse tra di loro. Questa operazione è piuttosto complessa e, nel caso si proceda manualmente, è foriera di notevoli perdite di accuratezza. La strumentazione ATOS è basata sul posizionamento di marker fisici sull'oggetto che vengono rilevati separatamente dal sistema per fornire un preciso sistema di riferimento tra diverse viste. I marker sono di geometria e riflettività calibrate e vanno posizionati sulle superfici dell'oggetto in modo che si possa procedere gradualmente a successivi allineamenti tra markers presenti in più viste. Il processo è automatico. La Figura 118 mostra le cinque palette con i marker posizionati ovunque sulle superfici.

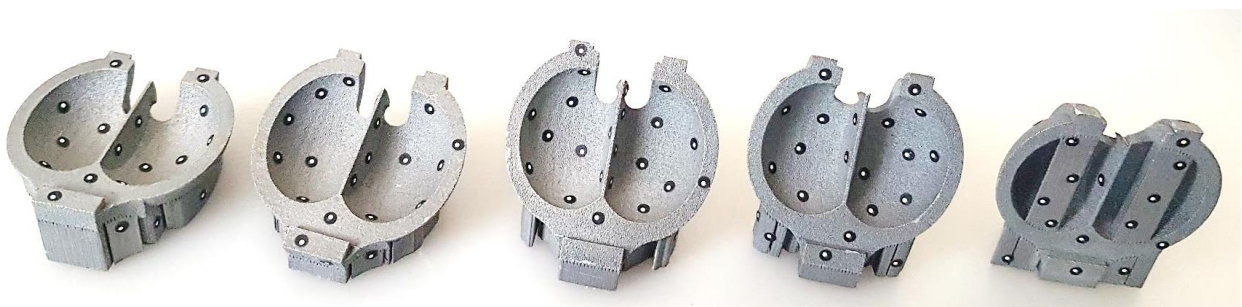


Figura 118 Posizionamento dei marker da 0.8 mm sulle superfici delle palette.

La nuvola di punti viene salvata in formato STL per poi essere analizzata nella piattaforma GOM Inspect 2021. Qui viene caricata come Mesh come riportato in Figura 119. In questo caso è stata considerata la palette orientata a 67.5°.

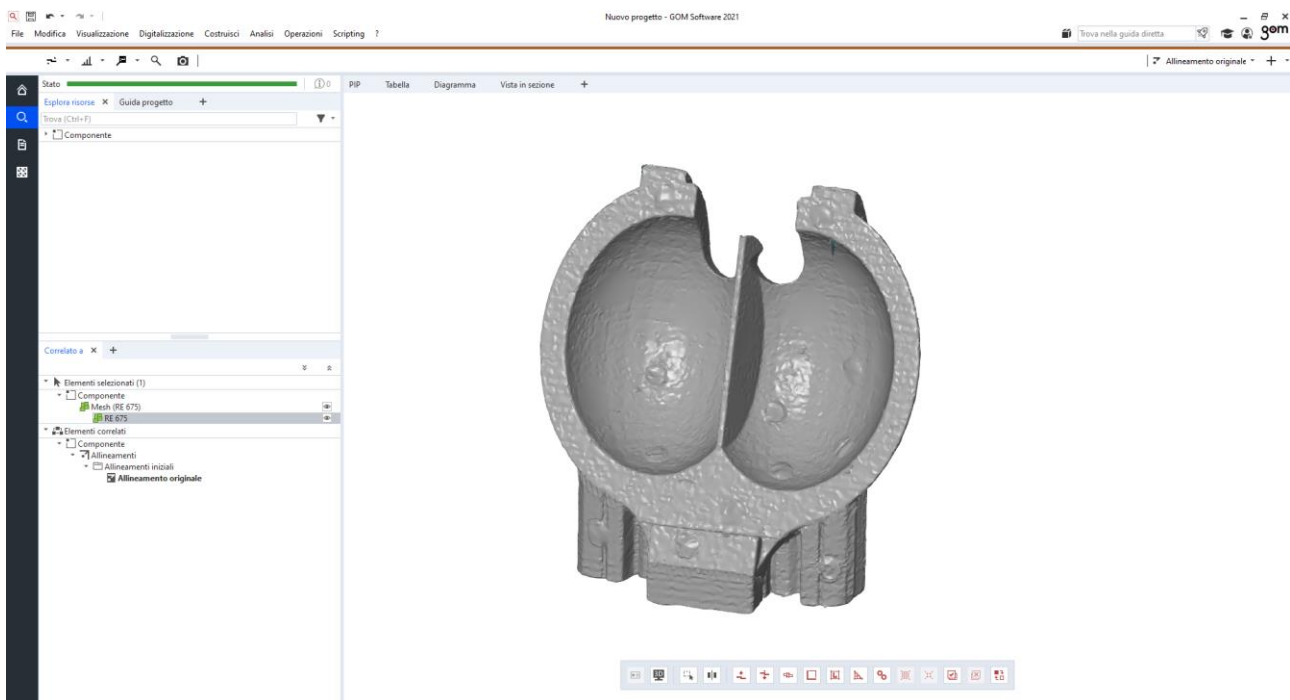


Figura 119 Nuvola di punti della paletta orientata a 67.5° importata in GOM Inspect 2021

La mesh viene ripulita da residui provenienti da rumori ambientali. Le operazioni sono di selezione delle patch eliminazione di reflui in modalità manuale, riempimento di fori, eliminazione delle zone caratterizzate dalla presenza di marker che per loro natura si stagliano sopra la superficie misuranda provocandone un'alterazione. Le operazioni di riparazione sono di vario genere in dipendenza del tipo di errore che si rileva. In Figura 120 sono riportate le azioni necessarie alla riparazione di due tipi di difetti provocati da marker presenti nelle zone indicate.

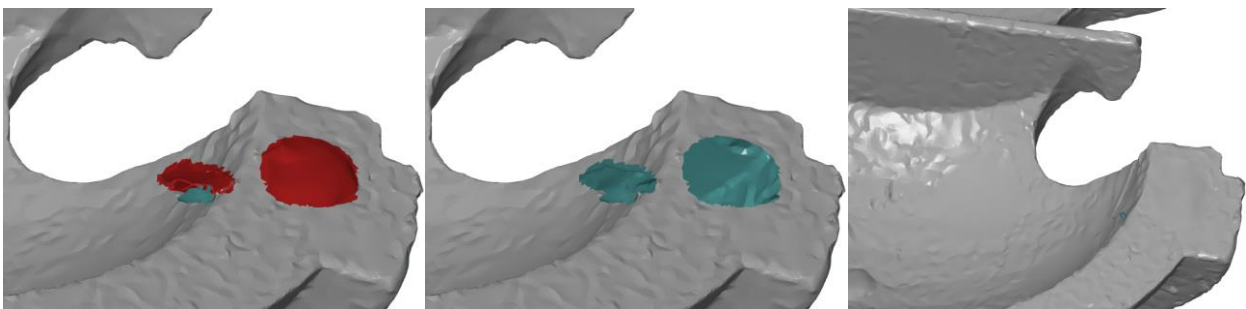


Figura 120 Operazioni di riparazione della nuvola di punti. Da sinistra a destra: selezione delle zone, apertura delle feature, riparazione dei fori.

Per poter determinare le deviazioni dell'oggetto fabbricato rispetto a quello progettato si procede caricando la geometria iniziale, più precisamente proprio il file STL usato come input nel processo di Additive Manufacturing. Aprendo questo file come tipologia "CAD" è possibile osservare in Figura 121 come i sistemi di riferimento sono completamente diversi essendo appartenenti a mondi completamente diversi, vale a dire quello virtuale di progettazione al CAD e quello fisico di misura al GOM ATOS. Impiegando l'algoritmo di allineamento alle minime distanze presente nella piattaforma è possibile ottenere il risultato mostrato in Figura 122.

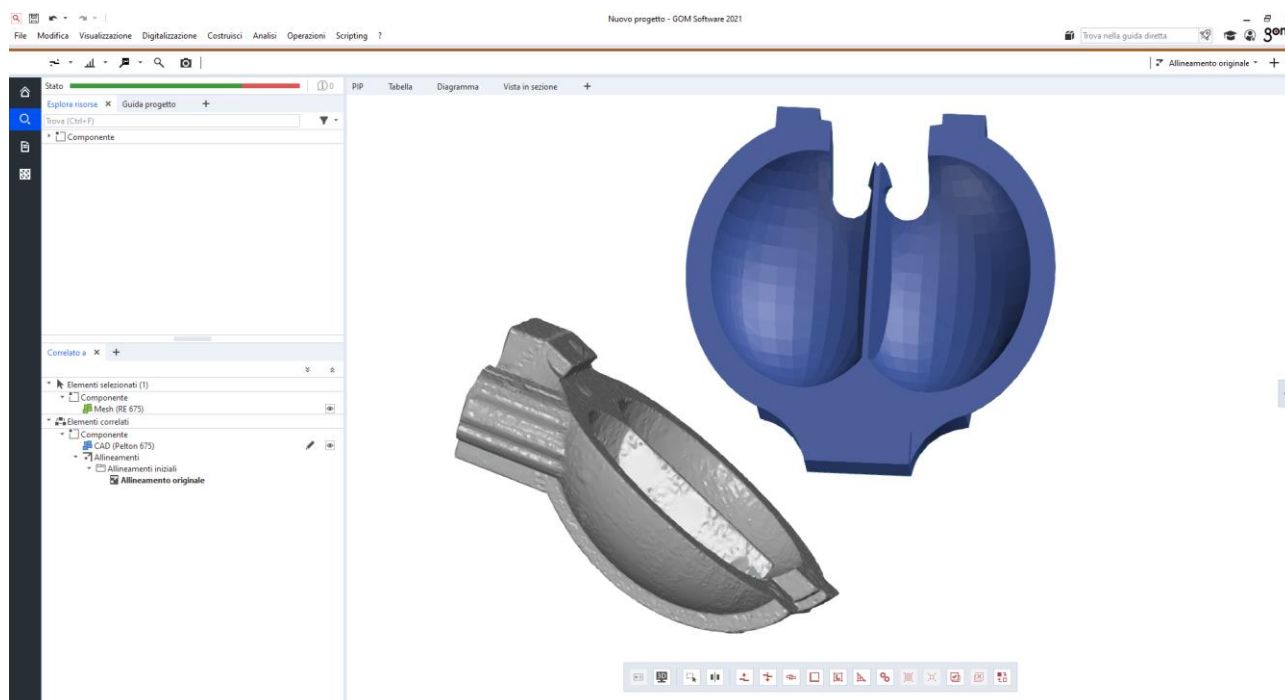


Figura 121 Nuvola di punti (in grigio) e file CAD del modello virtuale (in blu).

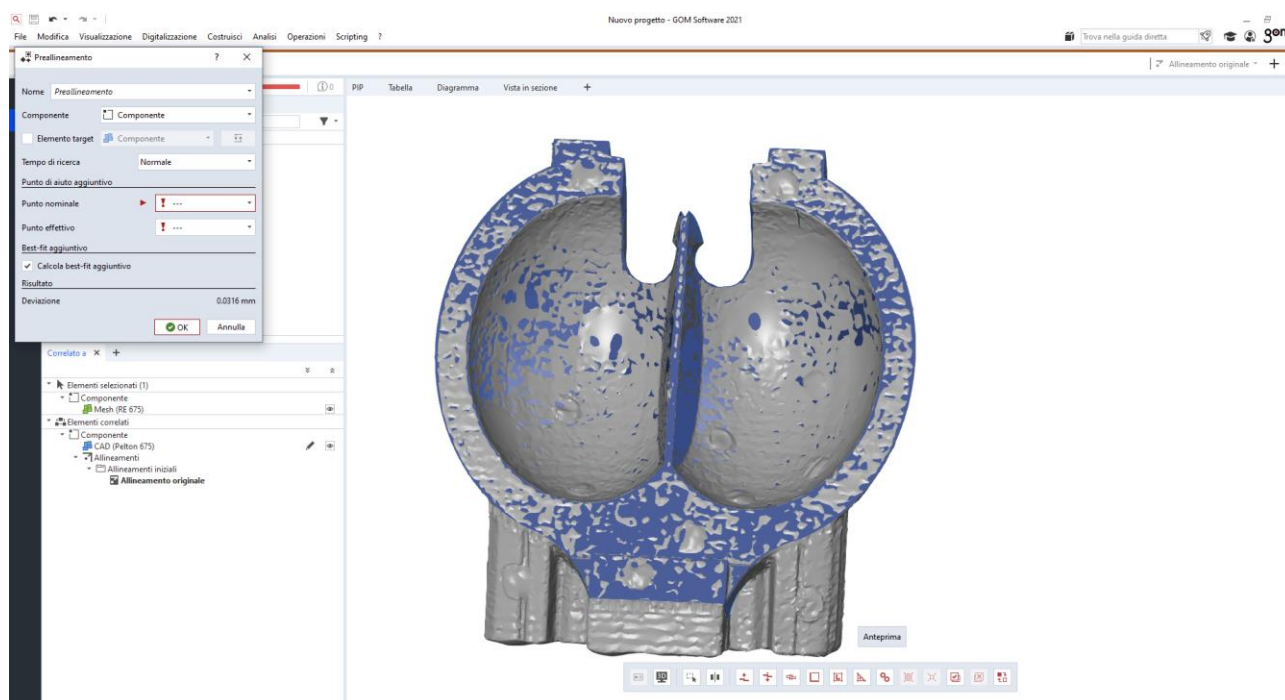


Figura 122 Nuvola di punti allineata con il modello CAD.

A questo punto è possibile eseguire il confronto punto a punto tra le due entità, quella fisica fabbricata in SLM e quella virtuale data in input alla tecnologia additiva. L'esecuzione del comando permette una visualizzazione tridimensionale dell'oggetto con mappatura a colori relativa agli scostamenti misurati. In questo caso (Figura 123) il risultato evidenzia come l'orientazione a 67.5° è caratterizzata da scostamenti compresi tra circa -0.5 mm e 0.5 mm. Tuttavia, va considerato che gli scostamenti maggiori si trovano in concomitanza dei supporti che non sono stati rimossi e pertanto non costituiscono elemento di analisi. Se si

considera la zona interna del cucchiaio gli scostamenti sono inferiori a 0.2 mm. Si tratta di un risultato confortando considerando che è proprio lo scostamento atteso quando non vi siano effetti indesiderati nel processo di fabbricazione.

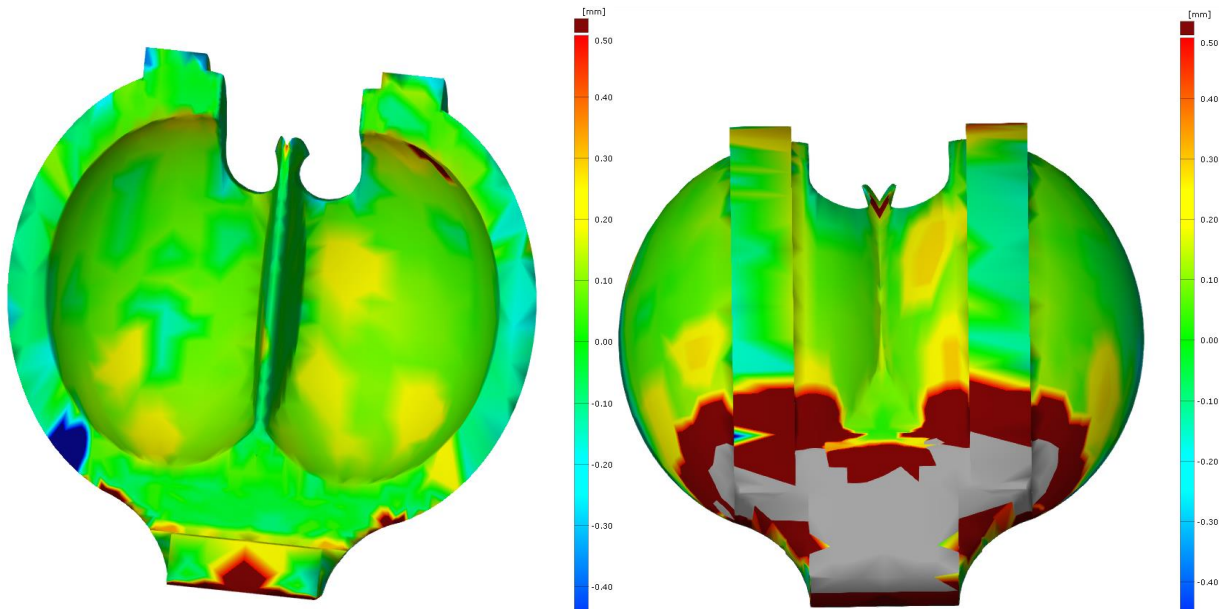


Figura 123 Risultato dell'analisi comparativa tra la nuvola di punti misurata e il modello CAD.

Ripetendo il processo per tutte le altre quattro palette è possibile ottenere gli scostamenti dal CAD per ciascuna configurazione. In Figura 124 sono mostrate le geometrie prima delle operazioni di riparazione.

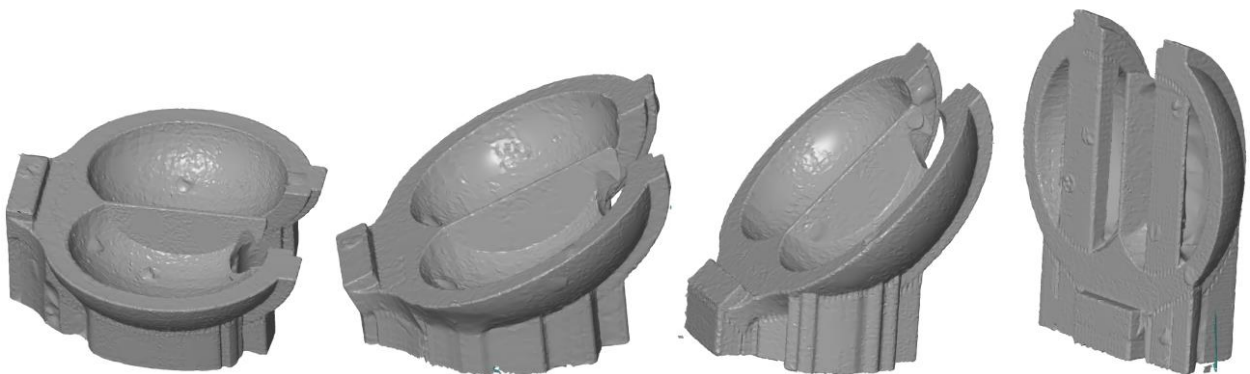


Figura 124 Nuvole di punti per le configurazioni 0°, 22.5°, 45°, 90° (da sinistra a destra).

Le analisi comparative sono mostrate nella Figura 125 e nella Figura 126. Si rileva che le configurazioni da 0° a 45° si comportano similmente a quanto osservato per la 67.5°. Tutti gli scostamenti interni al cucchiaio sono inferiori a 0.2 mm. Solo la configurazione a 90° mostra delle deviazioni maggiori: all'interno del cucchiaio si rilevano deviazioni eccedenti 0.3 mm anche se in alcuni punti. Per questa configurazione si paga lo sviluppo verticale senza supporti intermedi nella zona centrale del guscio. Tuttavia, il risultato è comunque interessante considerando che la palette non è stata sottoposta ad alcun trattamento secondario.

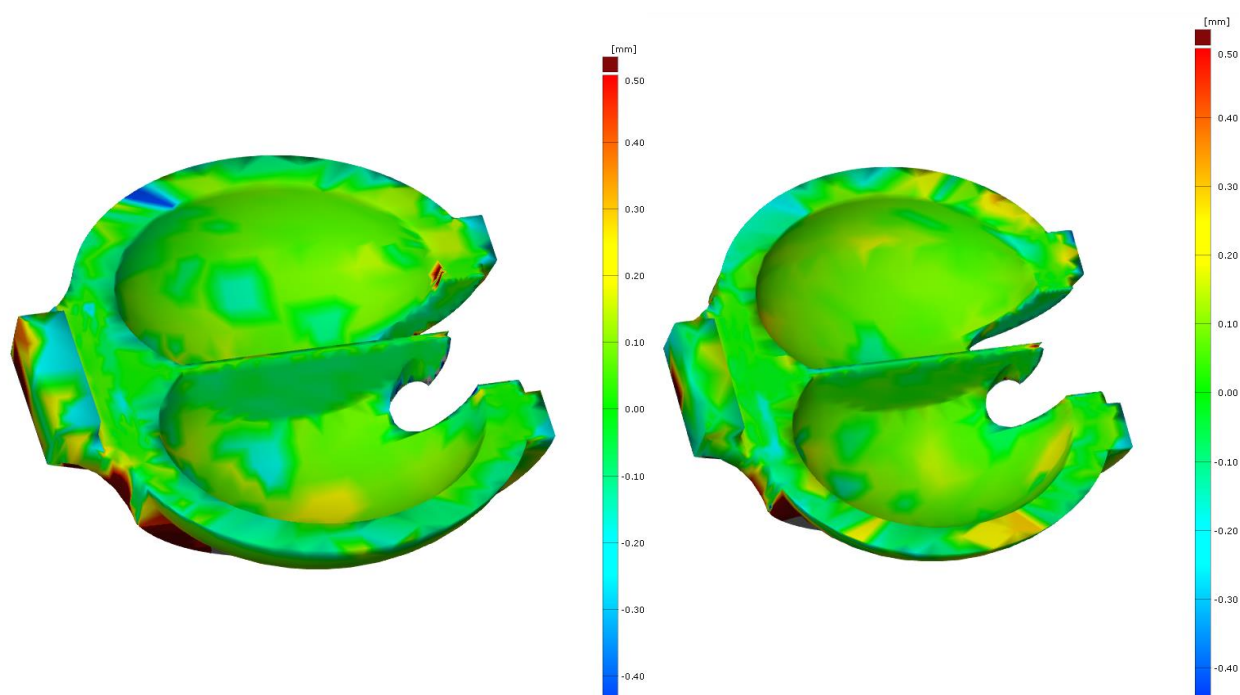


Figura 125 Risultati dell'analisi comparativa per le orientazioni 0° (sinistra) e 22.5° (destra).

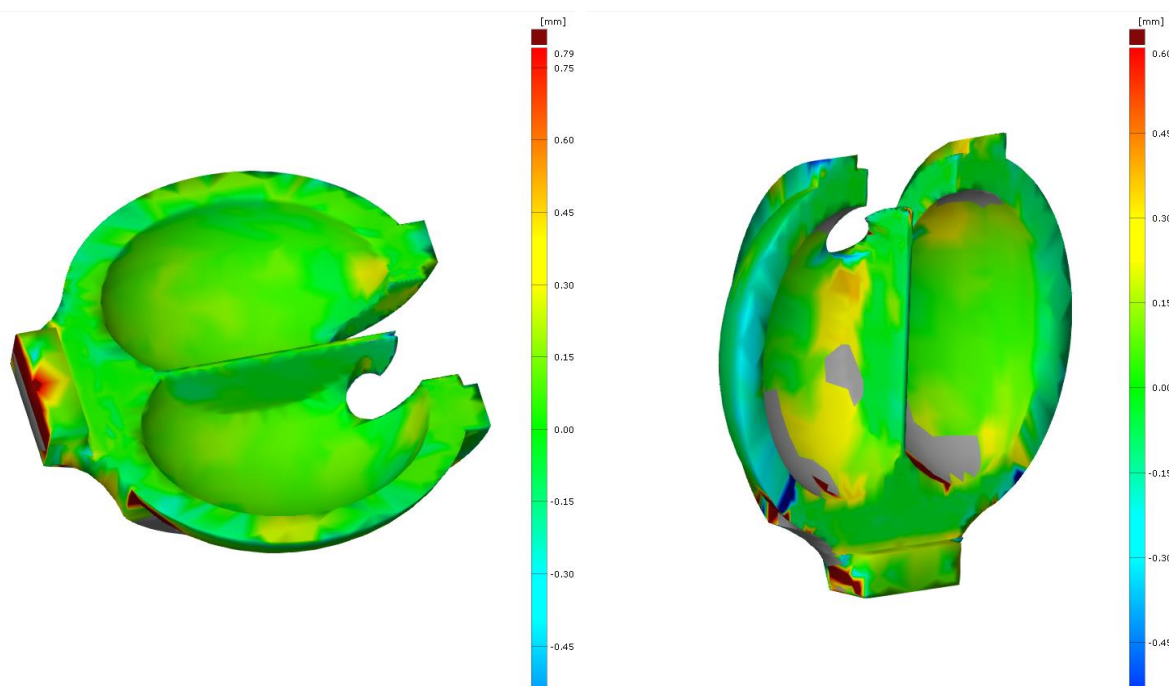


Figura 126 Risultati dell'analisi comparativa per le orientazioni 45° (sinistra) e 90° (destra).

5 Conclusioni del progetto

In questa ultima sezione vengono riassunti gli avanzamenti raggiunti dal progetto.

L'impiego di tecnologie digitali ha senz'altro un impatto decisivo quando il componente da fabbricare ha una geometria fortemente dipendente dalle caratteristiche di impianto e quindi va customizzata tutta la linea produttiva. Questo è il caso della fabbricazione di giranti per la produzione di energia elettrica da fonti idriche di piccola entità. Come già sottolineato, queste fonti sono ancora di scarsa utilizzazione in Italia mentre altre nazioni come la Svizzera hanno già attuato piani di intervento per la generazione locale di energia idroelettrica. Ciò è imputabile ai costi di progettazione di prodotto e costi di progettazione di processo che non sono scalabili e quindi di notevole impatto su impianti di piccola e soprattutto di piccolissima entità.

Il cuore del sistema è la girante che costituisce un elemento chiave della fattibilità tecnica a causa delle complicazioni geometriche necessarie al funzionamento.

La fattibilità economica è derivante dalle seguenti considerazioni. Le amministrazioni pubbliche, ma si può estendere ovviamente anche al privato, hanno a disposizione una quantità considerevole di rivi, ruscelli, canali di irrigazione con piccoli salti e piccole portate. L'esempio pratico portato in questo progetto (Tabella 5) ha a disposizione un salto di 20 m, una portata di $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ e dai calcoli si ottiene una potenza elettrica di 3.5kW. Nel caso di portata costante si otterrebbe una energia annua di 30600kWh con un singolo pico-impianto. Considerando il crescente aumento del costo dell'energia elettrica si può desumere che la tariffa di 0.285€/kWh sia ottimistica per il futuro. Ne deriva un risparmio che supera gli 8000€ per anno. Considerate le spese manutentive, sebbene molto ridotte, ne deriva un ritorno di investimento misurabile in due anni se si abbattessero i costi di progettazione di prodotto e di processo. Tali informazioni erano già note prima del presente progetto e non costituiscono una novità in merito ai vantaggi di installazione di pico impianti nel territorio italiano. Tuttavia, sia la fase progettuale che quella di fabbricazione costituiscono un limite alla fattibilità poiché necessitano di studi costosi e lunghi che impattano notevolmente sulle capacità di una piccola amministrazione.

In questo progetto si sono sviluppati i know-how in grado di permettere lo sviluppo integrato del processo di fabbricazione digitale delle giranti. Non sono stati investigati gli apparati accessori come l'inverter, la cassa, gli ugelli e il sistema di presa. Tali sotto-sistemi sono per loro natura commerciali o adattabili da elementi commerciali. Le giranti sono componenti la cui geometria non può essere adattata ma deve essere progettata.

5.1 Benefici del progetto

La natura digitale dei processi attuali come quelli di Additive Manufacturing richiede lo sviluppo di un modello solido della geometria da fabbricare. Generalmente tale studio richiede molte ore di lavoro connesse con l'analisi delle superfici, il dimensionamento dei componenti, la generazione delle superfici digitali. Tali operazioni richiedono personale specializzato che fa crescere notevolmente i costi. Sfortunatamente tali costi non sono proporzionali alle dimensioni della turbina, anzi sono praticamente indipendenti. Questo è un primo elemento che limita notevolmente lo sviluppo di pico impianti.

Un altro step importante è la trasformazione della geometria solida in formato STL utile alla fabbricazione. Purtroppo, la natura dell'operazione provoca errori che spesso minano se addirittura impediscono le fasi successive. Infine, la fabbricazione additiva necessita di numerosi interventi per l'attribuzione di parametri di processo e orientazioni della geometria in tavola che, pure, minano o quantomeno rendono antieconomico l'impiego della tecnologia stessa. Questo è un motivo tipico per cui molte aziende che si sono impegnate nella Additive Manufacturing sono state costrette a conversioni di impianto quando si sono rese conto dell'antieconomicità delle scelte. Un punto ancora molto importante è quello della scarsa

finitura superficiale ottenibile dalla manifattura additiva. Il progetto si è concentrato su questi aspetti sviluppando metodi e procedure in grado di eliminare o ridurre tali problematiche.

La conclusione del progetto ha ottenuto numerosi benefici riassunti nella Figura 127.

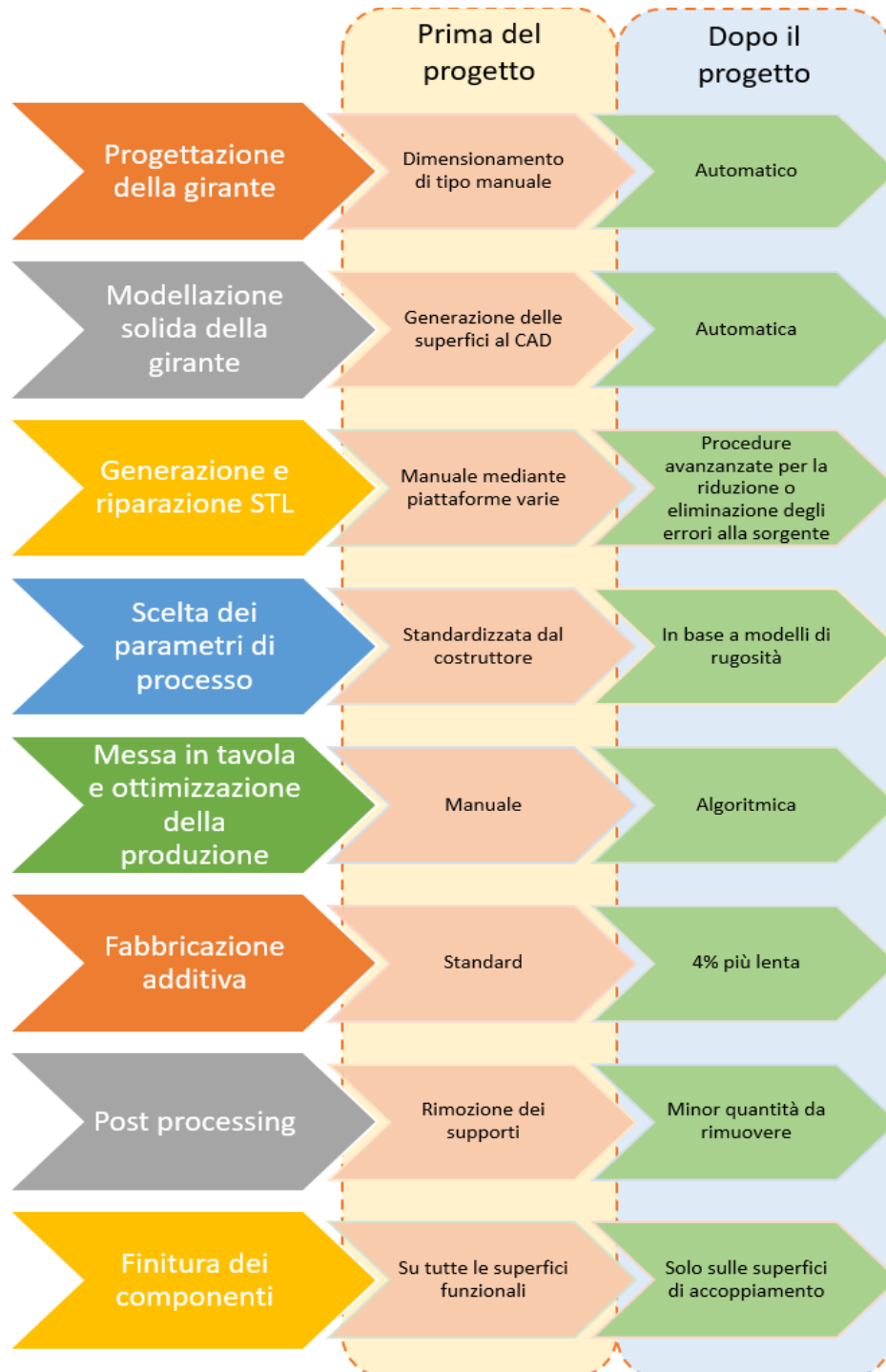


Figura 127 Avanzamenti conclusivi del progetto: prima e dopo gli interventi per ogni fase

In breve, le fasi del processo interessate hanno visto le seguenti modifiche:

- La progettazione della girante è passata da manuale ad automatica
- La modellazione solida da manuale è passata a totalmente automatica

- La generazione del file di interscambio STL è ora caratterizzata da procedure robuste allo scopo di evitare gli errori tipici e pericolosi per la manifattura additiva
- La scelta dei parametri di processo è passata da standardizzata, vale a dire quella del costruttore, ad una derivante dall'ottimizzazione per la rugosità ottenibile permettendo un incremento considerevole della finitura sulle superfici funzionali rendendo non necessarie aggiuntive operazioni di asportazione di truciolo che vanificano i benefici della manifattura additiva. Ciò a fronte di un trascurabile incremento del tempo di produzione
- La messa in tavola delle giranti è stata pragmatizzata effettuando pratiche considerazioni sul nesting misto ovvero un annidamento che tenda in considerazione diverse orientazioni tridimensionali delle palette che portano con sé diverse strutture di supporto. L'ottimizzazione in tal senso porta a considerare aspetti economici nelle scelte che prendono in considerazione l'ammontare di polveri necessari, il materiale necessario ai supporti e i tempi necessari alla loro rimozione.
- La fabbricazione automatica vede un tempo di produzione aumentato di alcuni punti percento a favore però di un notevole dispendio di risorse nella fase di finitura dei componenti
- Il post processing vede un'ottimizzazione a favore dei tempi: vengono dunque considerate le risorse necessarie alla rimozione dei supporti. Al contempo le verifiche dimensionali dimostrano come anche la scelta di una quantità minima di strutture di supporto non provoca alterazione geometriche limitanti la funzionalità della paletta.
- La finitura dei componenti additive necessitava costose e lunghe operazioni di finitura sia nel caso di adozione di macchine a CNC che di finitura mediante flussi granulari. Adesso, la finitura è limitata alle semplici superfici di accoppiamento delle palette, vale a dire i fori e gli attacchi rispettivamente ottenibili per alesatura e fresatura di spianatura tradizionali, ovvero senza l'ausilio di macchine a controllo numerico computerizzato.

5.1.1 Esempio di quantificazione

Il secondo semestre del secondo anno del progetto si è focalizzato su una girante specifica. Con tutti i dati ricavati è possibile effettuare una quantificazione riassuntiva di tutte le risorse temporali necessarie alla fabbricazione della palettatura. Per ottenere questi dati occorre considerare la produzione di un piccolo batch in cui si siano ottemperate le ottimizzazioni descritte nel presente progetto. In particolare, la palettatura è posizionata con orientazione 67.5°, il nesting in tavola è ottimizzato con rotazione in piano, i parametri di esposizione sono quelli ottimizzati per la finitura superficiale migliore. Rimane spazio ulteriore in tavola che può essere impiegato per palette aggiuntive, di riserva o diverse dalle precedenti in una customizzazione di produzione. La Figura 128 mostra il pre-processing del job effettuato in EOSPRINT, ovvero appena prima della produzione.

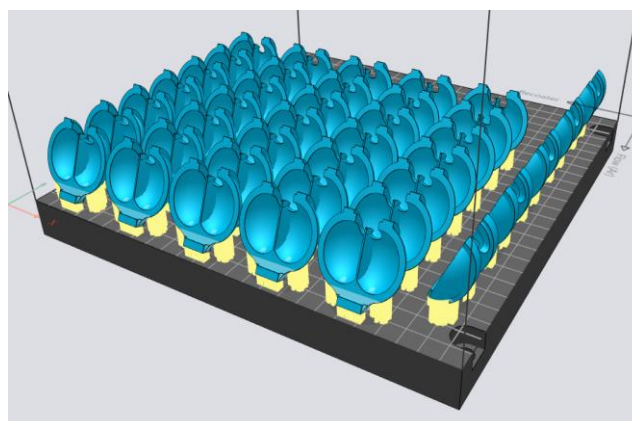


Figura 128 Tavola di fabbricazione

Volendo quantificare le singole operazioni si ottiene il risultato riassunto in Figura 129. Come è molto evidente le fasi di progettazione sono adesso particolarmente ridotte data la progettazione integrata sviluppata nel progetto la cui attuazione è completamente automatica. Un lieve incremento si osserva nella fase di scelta dei parametri e nella fabbricazione fisica. Ciò è dovuto all’inserimento di strategie di scansione più articolate rispetto a quelle standard e ad una durata maggiore della fase di fabbricazione. Tuttavia, sono di trascurabile entità se paragonate al beneficio ottenuto nelle fasi di post-produzione. Se l’eliminazione dei supporti viene ridotta di poco più di un’ora, la finitura necessaria all’ottenimento di una qualità adeguata al funzionamento è ridotta al 15%. Si tratta infatti di effettuare le sole operazioni di alesatura dei piccoli fori e di spianatura delle superfici piane laterali degli ancoraggi. Precedentemente, occorre una lavorazione tridimensionale o una finitura di massa, quest’ultima non scevra di problematiche sul coltello che andava comunque finito di macchina.

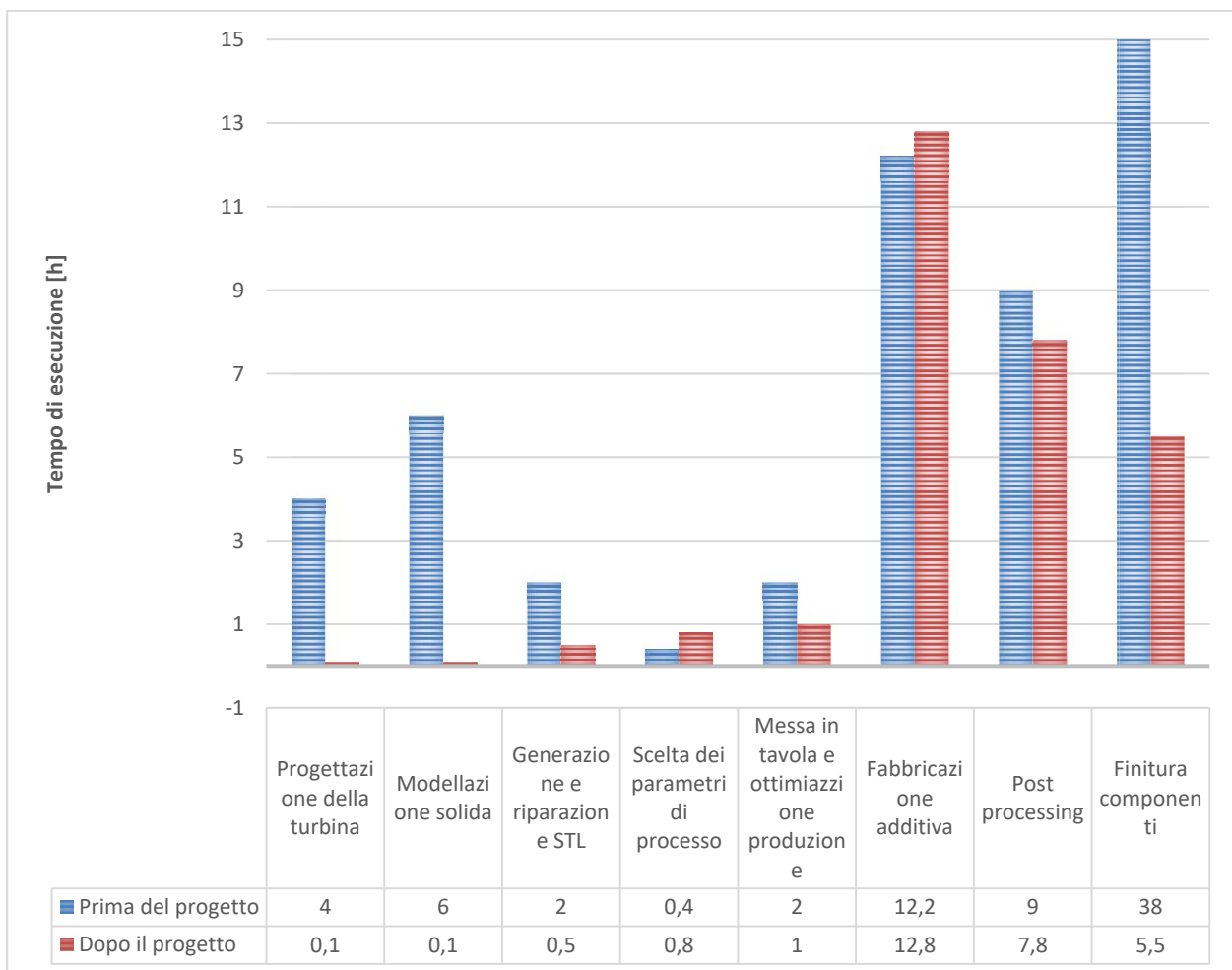


Figura 129 Tempi di esecuzione delle operazioni prima e dopo l’intervento del progetto

Quanto riportato fa emergere un’effettiva vantaggiosità nell’impiego dell’Additive Manufacturing. In particolare, sono totalmente abbattute le fasi di progettazione rendendo la lavorazione just in time.

5.1.2 Confronto con le tecnologie tradizionali

È importante considerare l’alternativa classica alla fabbricazione di un componente così complesso. Data la natura della geometria è necessario adottare un centro di lavoro a controllo numerico computerizzato. È

possibile sposare la fabbricazione con un sistema a 4 assi, vale a dire tre spostamenti e una rotazione. Le fasi a seguire descrivono il processo così come lo si è studiato. La paletta oggetto di analisi è la medesima del progetto.

FASE 10: montaggio del semilavorato sulla tavola rotante

FASE 10/1: sgrossatura zona superiore della paletta

FASE 10/2: cambio utensile e finitura parallela della superficie superiore

FASE 20: rotazione di 180° del componente

FASE 20/1: sgrossatura della parte inferiore

FASE 20/2: finitura parallela della parte inferiore

FASE 20/3: separazione della paletta dal semilavorato

Non appena terminata una paletta il semilavorato viene spostato in modo da poter ripetere le operazioni dalla fase 10/1. In fig. XXX sono riportate le toolpath e le lavorazioni parziali dello stock.

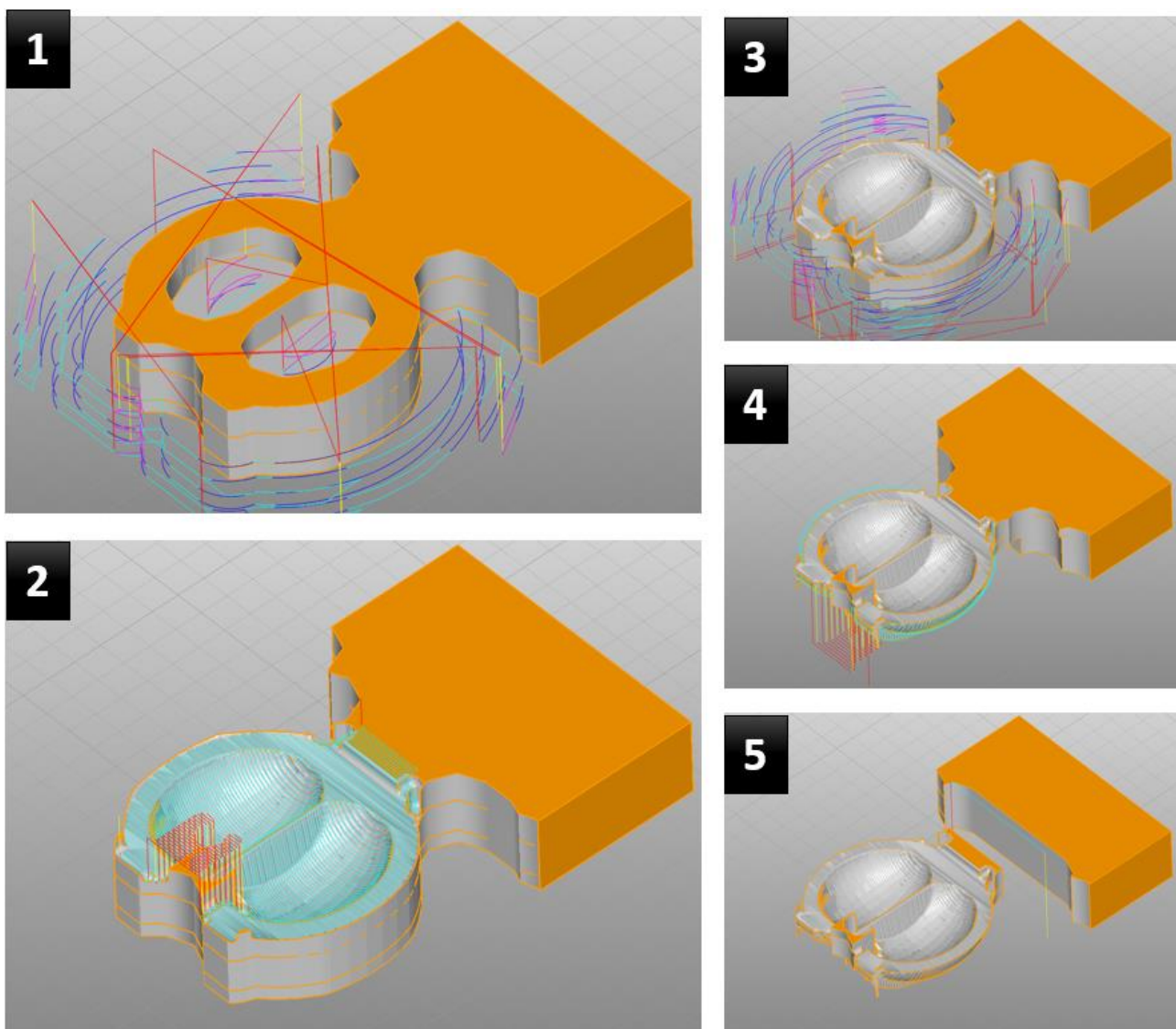


Figura 130 Fasi di lavorazione per asportazione di truciolo: sgrossatura orizzontale parte superiore (1), finitura parallela della parte superiore (2), sgrossatura orizzontale della parte inferiore (3), finitura parallela della parte inferiore (4), troncatura finale della paletta (5).

Il tempo totale di lavorazione è di 51.3 minuti per la parte superiore, 18.4 minuti per quella inferiore e 0.4 minuti per la troncatura per un totale di 69.8 minuti di tempo attivo più 6 minuti dei tempi morti di

allineamento. La Figura 131 mostra l'output della simulazione al CAM. Si può osservare come le lavorazioni di finitura siano le più lente a causa dei profili curvilinei, nonostante si sia fatta un'ottimizzazione dei parametri di taglio al fine di ottenere una finitura superficiale paragonabile a quella ottenibile dall'SLM ottimizzato come da presente progetto.

Mops Information

Name	Status	Tool	Tool #	Cut Feed	Spindle Speed	# of GOTOs	Machining Time
Setup 1							
Work Zero	Clean	No Tool	-	0.0			
Horizontal Roughing	Clean	FlatMill1	1	1616.86 m...	7957 RPM	673	1.65 min
Parallel Finishing	Clean	BallMill1	2	212.20 m...	10610 RPM	6210	21.26 min
Horizontal Finishing	Clean	BallMill1	2	212.20 m...	10610 RPM	7343	28.43 min
						Setup-total	51.34 min
Setup 2							
Horizontal Roughing	Clean	FlatMill1	1	1616.86 m...	7957 RPM	744	1.86 min
Parallel Finishing	Clean	BallMill1	2	212.20 m...	10610 RPM	5551	16.12 min
2 1/2 Axis Profiling	Clean	FlatMill1	1	212.20 m...	10610 RPM	5	0.45 min
						Setup-total	18.43 min

Figura 131 Tabella riassuntiva dei risultati di simulazione al Computer Aided Manufacturing

Per la produzione di 20 giranti occorreranno quindi 25.3 ore di lavorazione. Se confrontiamo tutti i punti inerenti alla fase di progettazione e fabbricazione della palettatura otteniamo i risultati mostrati in Tabella 14. I costi orari sono stati attribuiti considerando che l'operatore è specializzato e i costi delle macchine sono differenti. Il totale promuove la lavorazione additiva. Va notato che, nel caso si necessitasse di operazioni di finitura secondaria e la parte di progettazione non è così ridotta, il risultato sarebbe completamente opposto. Grossolanamente, aggiungendo i precedenti tempi di progettazione e i tempi necessari alla finitura al CNC, una produzione additive avrebbe una maggiorazione di costo di circa 1950€ portandola ad essere antieconomica.

Tabella 14 Confronto tra la manifattura sottrattiva (CNC) e additiva (SLM) in termini di tempi e costi di fabbricazione

	CNC			SLM		
	tempo [h]	costo orario [€/h]	sub totale [€]	tempo [h]	costo orario [€/h]	sub totale [€]
Studio del componente	3	90	270	1	90	90
CAM	6	90	540	0,4	90	36
ottimizzazione produzione	0,5	90	45	1	90	90
preparazione file macchina e verifica	2	90	180	0,5	90	45
preparazione macchina/accessoriamento	4	45	180	2	45	90
fabbricazione effettiva	25,3	95	2403,5	12,8	155	1984
Post processing	1,5	30	45	7,8	30	234
finitura secondaria	0	0	0	5,5	45	247,5
TOTALE	42,3		3663,5	31		2816,5

In ultimo si vuole sottolineare lo spreco di materiale. Nella produzione sottrattiva si parte da un semilavorato di forma parallelepipedo e si elimina il materiale in eccesso. Nella fabbricazione additiva lo spreco è inerente le strutture di supporto e una piccola quantità di materiale nel riciclo. I calcoli effettuati

per il CNC hanno considerato un semilavorato di lunghezza 1 m che viene afferrato per circa 50 mm che verranno persi nell'ultimo componente da afferrare. Nella fabbricazione additiva al materiale del modello viene sommato il supporto e l'1.5% di perdite nel riciclo. In breve, la Figura 132 mostra come il materiale nella fabbricazione SLM è circa 8 volte in meno rispetto al CNC. Si tratta di un vantaggio puramente ambientale: infatti, poiché il costo di una lega di alluminio commerciale è di circa 5 euro al kg ovvero circa dieci volte in meno della polvere di alluminio per l'SLM, va da sé che il costo del materiale è paragonabile (6,6€ per l'additive manufacturing e 4,8€ per il CNC).

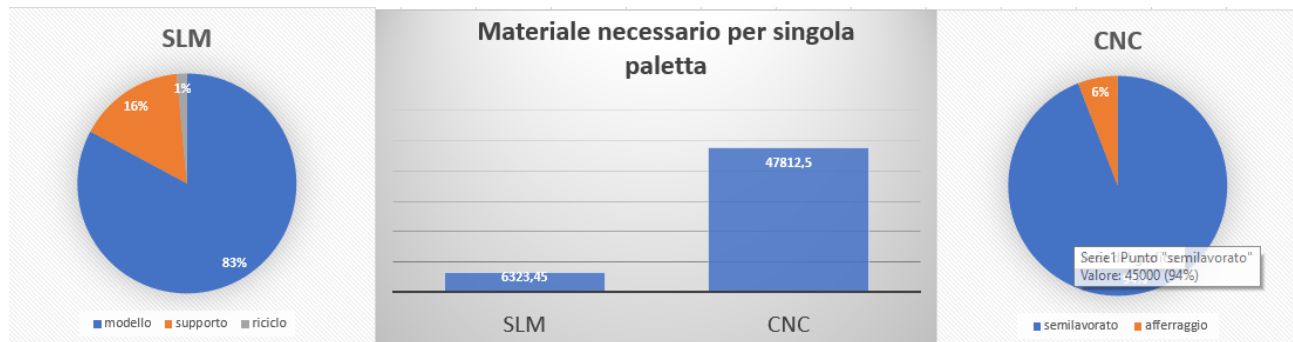


Figura 132 Confronto tra la manifattura additiva (SLM) e sottrattiva (CNC) applicata ad una singola paletta in termini di materiale di ingresso necessario

2 Riferimenti bibliografici

- [1] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications (3rd Edition), World Scientific Publishing Co., Inc. 1060 Main Street Suite 1B River Edge, NJ United States
- [2] J.S. Ferreira. J.F. Oliveira. Algorithms for nesting problems. Applied Simulated Annealing, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 396:255–273, 1993.
- [3] L.M. Braga S.A. Sagenreic. Optimal nesting of general plane figures: A monte carlo heuristical approach. Computers & Graphics, 10(3):229–284, 1986.
- [4] Kantorovich, Leonid, (1960), Mathematical Methods of Organizing and Planning Production, Management Science, 6, issue 4, p. 366-422.
- [5] Ameen, W., Al-Ahmari, A. & Mohammed, M.K. Self-supporting overhang structures produced by additive manufacturing through electron beam melting. Int J Adv Manuf Technol 104, 2215–2232 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04007-3>
- [6] Chen, H., Gu, D., Xiong, J., & Xia, M. (2017). Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology, 250, 99–108. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2017.06.044>

3 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di lavoro è composto da due persone appartenenti al Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università La Sapienza di Roma. Entrambi sono particolarmente impegnati nello studio delle tecnologie additive con particolare riguardo al Selective Laser Melting. Sono responsabili di un laboratorio denominato Rapid Prototyping and Reverse Engineering iscritto al Wohlers Report e del Sapienza Selective Laser Melting Laboratory.

Alberto Boschetto è professore associato nel settore scientifico disciplinare Tecnologie e Sistemi di Lavorazione. Il settore di ricerca privilegia le seguenti tematiche:

- Lavorazioni non tradizionali di finitura mediante mass finishing, principalmente barrel finishing
- Lavorazioni tradizionali di materiali non convenzionali: tornitura di materiali compositi, foratura di reactive powder concrete
- Squeeze Casting di leghe di alluminio
- Additive Manufacturing con particolare riguardo alle tecnologie di Fused Deposition Modeling, Selective Laser Melting, Stereolitografia
- Fabbricazione di schiume metalliche di alluminio mediante infiltrazione in sale
- Analisi di immagine rivolta alla caratterizzazione dell'output dei processi di fabbricazione come: analisi dei difetti metallografici, analisi del flusso granulare, analisi della morfometria e morfologia delle polveri
- Emissione acustica volta alla caratterizzazione di polveri metalliche
- Tecniche diagnostiche per l'analisi dei vetrini citologici
- Fabbricazione di nuovi materiali mediante meccanosintesi con sistemi High Energy Ball Milling
- Analisi della morfologia superficiale applicata a molteplici ambiti: dalle lavorazioni meccaniche alla produzione del manto di asfalto stradale
- Descrizione di geometrie complesse mediante trattazione puramente matematica e loro applicazione al contesto di fabbricazione industriale di componenti

È autore di 42 pubblicazioni su riviste internazionali, 52 conferenze e 4 capitoli di libri.

È stato docente negli scorsi 16 anni nei corsi di I e II livello del Corso in Ingegneria Meccanica e Gestionale per un totale di 250 crediti. Gli insegnamenti sono: Gestione dei processi produttivi, Programmazione e controllo della produzione meccanica, Tecnologia meccanica, Programmazione e controllo della produzione, Sistemi integrati di produzione, Laboratorio di rapid prototyping, Additive Manufacturing and production systems.

È stato Principal Investigator di 6 convenzioni di ricerca, di 8 progetti di ateneo ed è stato partecipante di 12 progetti.

È membro dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica (Aitem).

È Guest Editor dello Special Issue "New Trends on Selective Laser Melting" in Applied Science Journal.

È Board Editor della rivista Applied Science Journal.

È membro della rivista Arte e Scienza.

Luana Bottini è ricercatrice nello stesso settore scientifico. Le sue linee di ricerca riguardano principalmente le tecnologie di Additive Manufacturing. Nel Fused Deposition Modeling ha sviluppato dei modelli predittivi la finitura superficiale e l'accuratezza ottenibili, le lavorazioni secondarie di finitura. Ha investigato il Selective Laser Melting in merito alla finitura superficiale su superfici diversamente inclinate, all'impiego delle strategie di laser remelting, alla fabbricazione di giunti non assemblati. Si è occupata di tecnologie tradizionali come la fresatura a controllo numerico computerizzato e le lavorazioni di finitura di massa come la burattatura e lo spindle finishing. È esperta di tecniche non invasive come la rugosimetria a contatto e l'analisi di immagine. Quest'ultima è stata impiegata per lo studio della morfologia delle schiume metalliche, delle polveri e dello studio dei vetrini citologici.

È autrice di 20 pubblicazioni su riviste internazionali, 15 conferenze e 3 capitoli di libri.

È docente di Tecnologia Meccanica e Laboratorio di Additive Manufacturing nel corso di laurea in Ingegneria Meccanica e Tecnologie di Additive Manufacturing nel corso di laurea magistrale in ingegneria Gestionale.

È membro dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica (Aitem).

È membro della rivista Arte e Scienza.