



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

SVILUPPO DI UN METODO PER
L'OTTIMIZZAZIONE DELLA DIREZIONE
DI STAMPA IN PROCESSI ADDITIVI

DEVELOPMENT OF A METHOD TO
OPTIMIZE THE PRINT DIRECTION IN
ADDITIVE MANUFACTURING

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

FILIPPO SPADONI

CORRELATORE:

ING. MIKHAILO SARTINI

*'Un giorno le macchine riusciranno a risolvere tutti i problemi,
ma nessuna di esse potrà porne uno'
Albert Einstein*

I. Sommario

I. Sommario	i
II. Elenco delle figure	iii
III. Elenco delle tabelle	v
Abstract	1
1 Introduzione	3
2 Stato dell'arte	5
2.1 Breve storia di Additive Manufacturing	5
2.2 Fasi della produzione additiva	12
2.3 Possibili orientamenti e principali fattori di orientamento trovati in letteratura	16
2.4 Fattori di riferimento	18
2.4.1 Tempo di costruzione	19
2.4.2 Costo di costruzione	20
2.4.3 Parametri della stampante	21
2.4.4 Volume dei supporti e superfici overhang	24
2.4.5 Resistenza meccanica e anisotropia	27
2.4.6 Accuratezza e staircase effect	29
2.5 Stampa di un lotto di parti	32
2.6 Ulteriori criteri considerabili	39
3 Metodo	41
3.1 Input utente	41
3.2 Raccolta dati	44
3.3 Verifica dei vincoli di processo	44
3.4 Applicazione metodo TOPSIS	46
3.5 Analisi dei risultati	50
4 Caso studio	52
5 Risultati e discussione	55
5.1 Scenario rapidità elevata	62
5.2 Scenario resistenza meccanica elevata	74
6 Conclusioni	78
7 Bibliografia	81
8 Appendice	83

8.1	Tabelle raccolta dati e risultati scenario rapidità elevata _____	83
8.2	Tabelle raccolta dati e risultati scenario resistenza meccanica elevata _____	91

II. Elenco delle figure

Figura 2.1 Tecnologia SL, un laser ultravioletto viene diretto su una vasca di resina foto polimerizzabile per indurirla e realizzare la forma mediante la fotopolimerizzazione di strati successivi.	6
Figura 2.2 Tecnologia FDM, un filamento di materiale termoplastico viene fuso e depositato su un substrato per realizzare una forma preimpostata mediante deposizione strato su strato.	7
Figura 2.3 La produzione di oggetti laminati vede un rotolo di materiale che entra all'interno della camera di stampa e viene termo pressato con un rullo riscaldato sugli strati precedenti, a quel punto un laser ritaglia forme predefinite dal software di stampa.	8
Figura 2.4 La sinterizzazione laser selettiva utilizza un laser per fondere la polvere di plastica strato per strato in una forma predeterminata. Il processo per la fusione a letto di polvere è molto simile a SLS.	9
Figura 2.5 Directed energy deposition, la materia prima metallica viene introdotta in una sorgente luminosa sotto forma di filo (A) oppure come polvere (B).....	11
Figura 2.6 Esempio generazione file STL	13
Figura 2.7 Slicing di un busto mediante l'uso di strati uniformi.....	15
Figura 2.8 Rappresentazione schematica dei due angoli di rotazione α, β	16
Figura 2.9 Camera di stampa con componente al suo interno	22
Figura 2.10 Esempio valutazione packing density: a) orientamento base, b) orientamento inclinato....	23
Figura 2.11 Materiale di supporto per consentire la stampa di caratteristiche sporgenti	24
Figura 2.12 Esempi di diversi tipi di supporto. L'immagine riporta un esempio, per questa parte non sarebbe ideale utilizzare questa configurazione.	26
Figura 2.13 Caso di clip stampata in diversi orientamenti	27
Figura 2.14 Esempio di struttura a traliccio	28
Figura 2.15 Profilo di una superficie inclinata	30
Figura 2.16 Parametri per il calcolo della rugosità superficiale nei sistemi AM.....	31
Figura 2.17 Modello per il calcolo della rugosità basato sulla deviazione della linea media	31
Figura 2.18 Esempio di parte in cui la lama del recoater è stata danneggiata e ha causato un difetto nella parte	32
Figura 2.19 Evitare il posizionamento di parti parallele alla lame del recoater	33
Figura 2.20 Evitare parti allineate direttamente una dietro l'altra	34
Figura 2.21 Evitare che più parti colpiscano contemporaneamente la lama del recoater	35

Figura 2.22 Posizionamento delle parti più alte vicino alla lama del recoater.....	36
Figura 2.23 Inserimento di parti nella camera di stampa in uno strato (a) e in più strati (b).....	37
Figura 2.24 Gradi di libertà di un modello CAD 3D all'interno della camera di stampa	38
Figura 2.25 Presenza di supporti di difficile rimozione	40
Figura 3.1 Passaggi fondamentali del metodo.....	41
Figura 4.1 Vista assonometrica dei casi di studio: a) parte con codice 1 v1, b) parte con codice 2 v2, c) parte con codice Penta valve v14.....	52
Figura 4.2 Forze e coppie applicate ai casi di studio: a) caso di studio 1 v1, b) caso di studio 2 v2, c) caso di studio Penta valve v14.....	54
Figura 5.1 Grafico radar dei pesi utilizzati nei casi di studio	55
Figura 5.2 Configurazione di riferimento caso di studio 1 v1	57
Figura 5.3 Configurazione di riferimento caso di studio 2 v2.....	57
Figura 5.4 Configurazione di riferimento caso di studio Penta valve v14.....	58
Figura 5.5 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718.....	68
Figura 5.6 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316.....	69
Figura 5.7 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS70	
Figura 5.8 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale poliammide	71

III. Elenco delle tabelle

Tabella 3.1 Tabella per raccolta dati utilizzata nel metodo.....	44
Tabella 3.2 Esempio verifica vincoli di processo	45
Tabella 3.3 Esempio normalizzazione di una matrice	47
Tabella 3.4 Esempio creazione matrice pesata.....	47
Tabella 3.5 Esempio identificazione soluzione ideale positiva e negativa	48
Tabella 3.6 Esempio realizzazione matrice distanza da soluzione ideale positiva.....	49
Tabella 3.7 Esempio realizzazione matrice distanza da soluzione ideale negativa.....	49
Tabella 3.8 Esempio risultati finali	50
Tabella 3.9 Esempio tabella analisi direzioni	51
Tabella 4.1 Elenco dei casi di studio.....	53
Tabella 4.2 Vincoli di processo utilizzati nel metodo	54
Tabella 5.1 Valore dei pesi utilizzati nel metodo applicato ai casi di studio.....	55
Tabella 5.2 Insieme delle configurazioni utilizzate per il caso di studio 1 v1	59
Tabella 5.3 Insieme delle configurazioni utilizzate per il caso di studio 2 v2	61
Tabella 5.4 Insieme delle configurazioni utilizzate per il caso di studio Penta valve v14.....	62
Tabella 5.5 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718....	63
Tabella 5.6 Verifica vincoli di processo caso di studio 2 v2 con tecnologia SLM e materiale Inconel 718	63
Tabella 5.7 Vincoli di processo per caso di studio 2 v2 con tecnologia SLM e materiale Inconel 718.....	64
Tabella 5.8 Matrice pesata caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718.	65
Tabella 5.9 Distanze da soluzione ideale positiva caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718	66
Tabella 5.10 Distanze da soluzione ideale negativa caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718	66
Tabella 5.11 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718.....	67
Tabella 5.12 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316	68
Tabella 5.13 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS	70
Tabella 5.14 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale poliammide	71
Tabella 5.15 Risultati caso di studio 1 v1 scenario rapidità elevata	73

Tabella 5.16 Risultati caso di studio Penta valve v14 scenario rapidità elevata	73
Tabella 5.17 Risultati caso di studio 2 v2 scenario resistenza meccanica elevata	75
Tabella 5.18 Risultati caso di studio 1 v1 scenario resistenza meccanica elevata	76
Tabella 5.19 Risultati caso di studio Penta valve v14 scenario resistenza meccanica elevata	77
Tabella 8.1 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario rapidità elevata	83
Tabella 8.2 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario rapidità elevata	84
Tabella 8.3 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario rapidità elevata	84
Tabella 8.4 Risultati caso di studio 1v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario rapidità elevata	85
Tabella 8.5 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario rapidità elevata	85
Tabella 8.6 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario rapidità elevata	86
Tabella 8.7 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario rapidità elevata	86
Tabella 8.8 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario rapidità elevata	87
Tabella 8.9 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario rapidità elevata	87
Tabella 8.10 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario rapidità elevata	88
Tabella 8.11 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario rapidità elevata	88
Tabella 8.12 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario rapidità elevata	89
Tabella 8.13 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario rapidità elevata	89
Tabella 8.14 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario rapidità elevata	90
Tabella 8.15 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario rapidità elevata	90
Tabella 8.16 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario rapidità elevata	91

Tabella 8.17 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata	92
Tabella 8.18 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata	92
Tabella 8.19 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata	93
Tabella 8.20 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata.....	93
Tabella 8.21 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata.....	94
Tabella 8.22 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata.....	94
Tabella 8.23 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata	95
Tabella 8.24 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata	95
Tabella 8.25 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata	96
Tabella 8.26 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata	96
Tabella 8.27 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata	97
Tabella 8.28 Risultati caso di studio 1v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata.....	97
Tabella 8.29 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata.....	98
Tabella 8.30 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata.....	98
Tabella 8.31 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata	99
Tabella 8.32 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata	99
Tabella 8.33 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata	100
Tabella 8.34 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata	100

Tabella 8.35 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata	101
Tabella 8.36 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata	101
Tabella 8.37 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata.....	102
Tabella 8.38 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata	102
Tabella 8.39 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata.....	103
Tabella 8.40 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata.....	103

Abstract

La produzione additiva è una delle principali tecnologie dell'industria 4.0, è ampiamente utilizzata nell'industria moderna data la sua automazione e la possibilità di realizzare forme molto complesse con scarti minimi, costi inferiori e velocità maggiore. I componenti realizzati con questa tecnologia soffrono tuttavia di alcuni difetti relativi ad errori dimensionali e volumetrici, inoltre molte delle tecnologie di produzione additiva necessitano di materiali di supporto per realizzare superfici a sbalzo. Va ulteriormente evidenziato che la maggior parte delle tecnologie realizzano parti con una certa anisotropia. Tutte queste considerazioni sono direttamente influenzate dalla scelta della direzione di stampa.

Dalla revisione della letteratura non è stato possibile identificare un metodo unico che guidasse la scelta delle direzioni di stampa, ma sono state individuate diverse indicazioni che hanno permesso lo sviluppo di un metodo.

Il seguente elaborato di tesi si pone come obiettivo quello di sviluppare un metodo che ottimizzi la scelta delle direzioni di stampa nei processi additivi e che permetta all'utente di essere guidato nella scelta delle direzioni ottimali di stampa. L'elaborato di tesi si sviluppa in diversi capitoli: inizialmente viene riportata una rapida revisione della letteratura che permette di visualizzare le principali informazioni rinvenute dalla revisione. Sono riportate sia nozioni per la scelta della direzione di stampa di singole parti, sia alcune nozioni riguardanti la stampa di un lotto di parti. Successivamente vengono riportati i principali passi del metodo sviluppato, poi applicato a diversi casi di studio. Nel metodo vengono utilizzati diversi criteri di valutazione dell'orientamento ottimale per ogni caso di studio, avvalendosi anche del metodo di scelta multicriterio TOPSIS.

I casi di studio sono stati identificati in tre componenti con caratteristiche differenti tra loro. Il metodo sviluppato viene quindi applicato ai tre casi di studio utilizzando diverse tecnologie di stampa e materiali. Le tecnologie utilizzate sono L-PBF, DED, SLS e FDM. Vengono inoltre identificati due scenari possibili per i casi di studio. Il primo scenario in cui viene richiesta rapidità nel processo e il secondo scenario nel quale viene favorita la resistenza meccanica.

Essendo uno degli obiettivi del metodo quello di accompagnare l'utente nella scelta della direzione di stampa è una prerogativa l'elevata personalizzazione dei pesi applicati ad ogni criterio. I pesi vengono scelti dall'utente esprimendo giudizi riguardo quattro macroaree identificate in: rapidità, economicità, produttività e resistenza meccanica.

I risultati ottenuti hanno mostrato la validità del metodo portando alla scelta delle direzioni ottimizzate per ogni componente del caso di studio. Viene evidenziato che, in alcuni casi, l'applicazione del metodo in prima battuta non permette l'identificazione di una sola direzione ottimale ma potrebbe portare a più soluzioni. Per determinare quindi il vero orientamento ottimale potrebbe essere necessario un ulteriore studio di dettaglio applicando il metodo una seconda volta con una sensibilità maggiore nell'intorno delle direzioni che hanno ottenuto le valutazioni più alte, detti anche punti di massimo relativo della funzione obiettivo. Questa procedura potrebbe essere utilizzata anche nel caso in cui si ritenga fondamentale identificare la direzione ottimale con elevata precisione.

1 Introduzione

Con l'avvento dell'industria 4.0 sono state introdotte nuove tecnologie per la realizzazione dei componenti. Tra i più noti e conosciuti troviamo sicuramente la produzione additiva, nota anche con il nome di Additive Manufacturing. La tecnologia additiva comprende una vasta gamma di tecnologie che consentono la realizzazione di componenti fisici in tre dimensioni, partendo da un modello virtuale, costruendo strato su strato il componente, fino al completamento della parte.

Nelle tecniche di produzione additiva il materiale viene aggiunto in maniera selettiva coerentemente con il modello matematico ottenuto da un sistema CAD 3D o mediante scansione 3D. Questo aspetto rende la tecnologia di stampa additiva molto innovativa in quanto, contrariamente alle tecnologie sottrattive, come tornitura e fresatura, permette un minore utilizzo di materiale ed una maggiore libertà di progettazione del pezzo, consentendo al progettista di esprimersi al meglio grazie anche all'ottenimento di forme molto complesse.

Nella produzione additiva, dopo la fase di progettazione, sono previste più fasi per preparare la parte prima della produzione. Tra queste, la fase di selezione dell'orientamento è quella più significativa. Come dimostrato in varie ricerche la scelta dell'orientamento di stampa ha un impatto enorme su durata del processo, qualità, costo di produzione, proprietà meccaniche e molti altri parametri che verranno analizzati in seguito.

La definizione ottimale dell'orientamento richiede un elevato livello di competenze e rimane una delle principali preoccupazioni nelle industrie nonostante l'elevata disponibilità di strumenti CAM. Infatti, diversi studi dimostrano che gli operatori del settore, solitamente, per prendere decisioni sui parametri di fabbricazione, fanno riferimento alle proprie conoscenze.

Nonostante il gran numero di metodi e indicazioni per cercare la migliore direzione di costruzione pubblicati in letteratura, la definizione dell'orientamento di stampa rimane una questione aperta.

L'obiettivo della seguente tesi è quello di sviluppare un metodo per la ricerca degli orientamenti preferenziali di stampa. L'idea alla base del metodo è quella di riunire le indicazioni riportate in letteratura così da ridurre significativamente il numero dei possibili orientamenti e fornire un supporto tangibile all'operatore, guidandolo nella scelta consapevole dell'orientamento, che soddisfi maggiormente i requisiti progettuali richiesti.

La definizione dell'orientamento di stampa è un tipico esempio di problema multicriterio, la cui ottimizzazione non è banale. Nel caso in questione è stato scelto di utilizzare il metodo TOPSIS.

Il metodo verrà poi applicato su una serie di componenti che consentiranno di valutare la sua effettiva validità e solidità.

I possibili sviluppi futuri sono l'implementazione del metodo e la creazione di un software che permetta, una volta inserito il file STL della parte, di ottenere il miglior orientamento di stampa.

2 Stato dell'arte

In letteratura è possibile trovare molte indicazioni e criteri che guidano la scelta dell'orientamento di stampa. Dato l'elevato numero di informazioni trovate, nel seguente capitolo vengono raccolte le principali tecnologie di stampa utilizzate nei processi di additive manufacturing e vengono inoltre riportati i principali criteri utilizzati in letteratura.

2.1 Breve storia di Additive Manufacturing

Vengono riportati alcuni cenni storici riguardo la storia delle tecnologie di Additive Manufacturing per inquadrare al meglio le varie tipologie e permetterne una prima descrizione riguardo il loro funzionamento.

La tecnologia di Additive Manufacturing nasce ufficialmente nel 1986 quando Chuck Hull depositò il brevetto per la stereolitografia, una forma di fotopolimerizzazione in vasca come è mostrato in [1]. Hull fondò la 3D Systems nello stesso anno e, come riportato in [2], commercializzò nel 1987 la prima stampante denominata SLA-1, che si basava su un laser UV per polimerizzare selettivamente la resina fotosensibile punto per punto, strato per strato in modo tale da ricreare un oggetto fisico sulla base dei disegni di un file CAD (Figura 2.1). La società ha anche introdotto il formato di file STereoLithography (STL), un tipo di file stampabile in 3D che è ancora ampiamente utilizzato oggi.

La tecnologia alla base della stereolitografia si è evoluta passando dalla polimerizzazione di singoli punti alla polimerizzazione di uno strato completo all'interno di una vasca, consentendo sia dettagli più fini che stampe più rapide. Inoltre, le moderne fonti di illuminazione hanno contribuito a ridurre ulteriormente il prezzo della tecnologia.

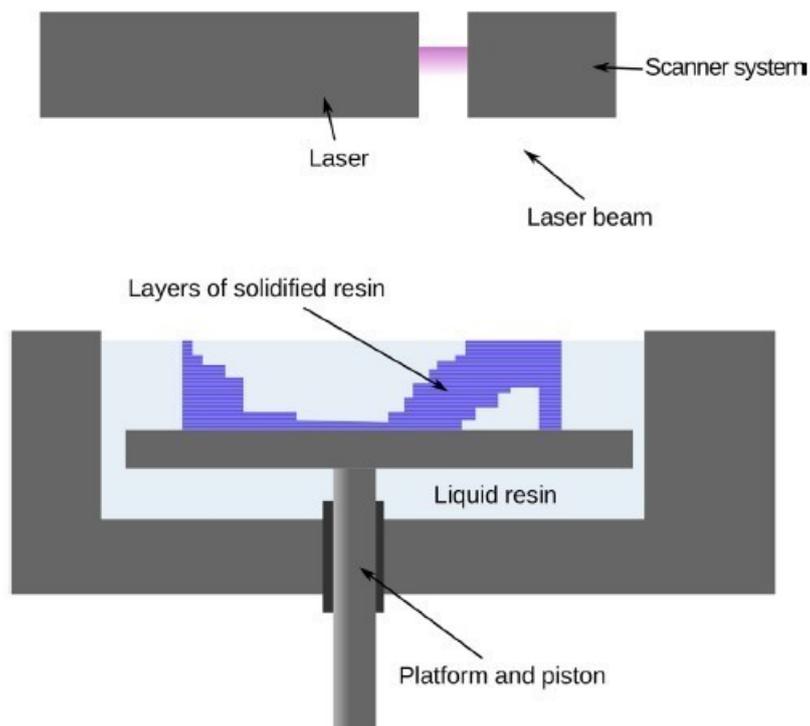


Figura 2.1 Tecnologia SL, un laser ultravioletto viene diretto su una vasca di resina foto polimerizzabile per indurirla e realizzare la forma mediante la fotopolimerizzazione di strati successivi.

Data la natura del materiale utilizzato, le parti realizzate con la stereolitografia tendono a degradare il colore nel tempo se esposte al sole. Per di più, i fotopolimeri sono termoindurenti, quindi, una volta trasformati in un solido, non possono essere fusi e rimodellati. Un altro limite all'uso dei fotopolimeri è il fatto che non abbiano una resistenza meccanica elevata, in quanto, se sottoposte a stress, le parti potrebbero spezzarsi.

Tra gli anni 80 e 90 diverse società iniziarono a produrre nuovi prodotti con tecnologie SL per il mercato della stampa 3D al tempo in rapida crescita. Di primaria importanza è la società Stratasys che inventò il processo di estrusione del materiale noto come Fused Deposition Modeling FDM, un sistema basato su un processo di estrusione in cui il materiale termoplastico, sotto forma di bobine di filamento, viene riscaldato fino al suo punto di fusione e depositato su un substrato (Figura 2.2).

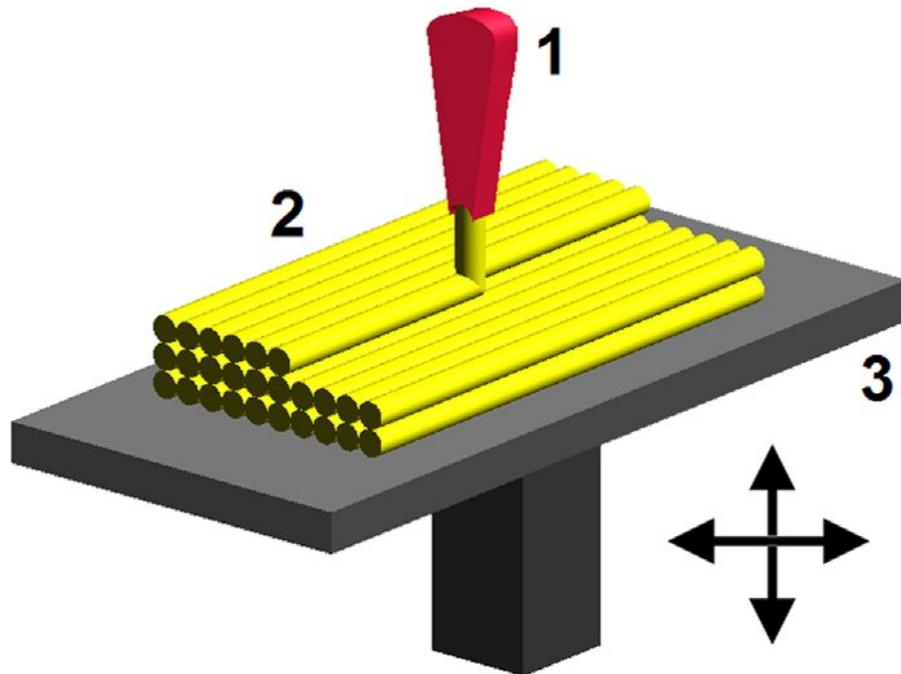


Figura 2.2 Tecnologia FDM, un filamento di materiale termoplastico viene fuso e depositato su un substrato per realizzare una forma preimpostata mediante deposizione strato su strato.

I materiali termoplastici possono essere sciolti e raffreddati più volte, contrariamente ai materiali termoindurenti. Infatti, la tecnologia FDM è nota per la produzione di parti robuste utilizzate anche in applicazioni critiche come aerei o veicoli spaziali. I difetti principali di questa tecnologia di stampa sono risoluzione e velocità di stampa inferiori rispetto alla stereolitografia.

FDM è una tecnologia unica, anche perché i componenti a basso costo per costruire una semplice stampante 3D per estrusione di plastica hanno reso possibile la costruzione di stampanti 3D open source. [3] Questo ha permesso a un elevato numero di persone di sperimentare applicazioni molto fantasiose come l'ipotesi di Fab@Home di poter stampare alimenti e altri prodotti viscosi e di dimostrare la flessibilità dell'utilizzo di tali sistemi con una vasta gamma di materiali.

Nel 1991 una azienda chiamata Helisys introdusse per la prima volta la tecnologia di Sheet Lamination. Il processo di produzione di oggetti laminati avviene fondendo insieme fogli di materiale e utilizzando un laser per tagliare selettivamente i fogli in modo da ottenere l'oggetto desiderato. (Figura 2.3). Nel 2003 i fratelli MacCormack svilupparono una tecnologia di Sheet Lamination che si basava sull'utilizzo di carta da ufficio per la stampa di oggetti 3D, questa tecnologia è utilizzata principalmente per produrre oggetti con scopi promozionali e prototipazione visiva. [4]

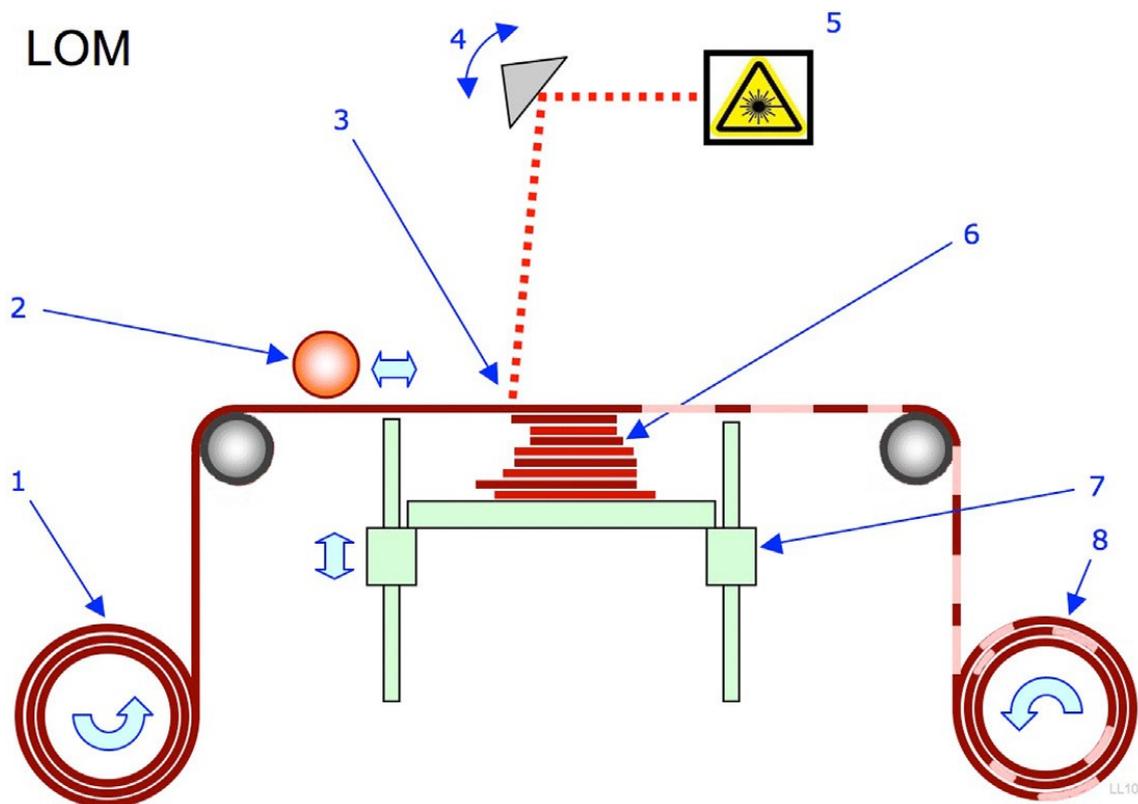


Figura 2.3 La produzione di oggetti laminati vede un rotolo di materiale che entra all'interno della camera di stampa e viene termopressato con un rullo riscaldato sugli strati precedenti, a quel punto un laser ritaglia forme predefinite dal software di stampa.

Nello stesso periodo l'università del Texas sviluppa la sintetizzazione laser selettiva SLS, una tecnologia di fusione a letto di polvere. Introdotto sul mercato nel 1992 SLS utilizza un laser per fondere selettivamente polvere di plastica, nylon e altri materiali in oggetti 3D completi. (Figura 2.4)

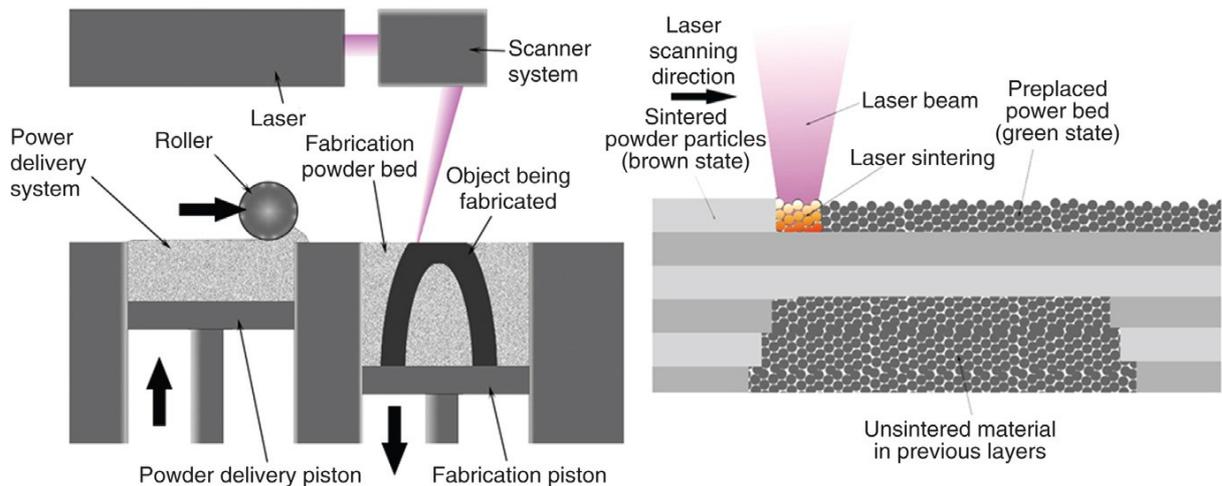


Figura 2.4 La sinterizzazione laser selettiva utilizza un laser per fondere la polvere di plastica strato per strato in una forma predeterminata. Il processo per la fusione a letto di polvere è molto simile a SLS.

Il sistema SLS è unico in quanto il letto di polvere di un sistema di stampa funge da supporto integrato per le parti che vengono sintetizzate, a differenza di SL e FDM che richiedono la realizzazione di strutture di supporto. Questo permette di stampare geometrie molto complesse, comprese parti mobili e ad incastro come ingranaggi e oggetti cavi.

La resistenza delle parti realizzate in SLS è pari a quelle realizzate con tecnologia FDM, ma la tecnologia SLS è più costosa. Per questo motivo le macchine SLS sono tipicamente utilizzate in ambienti industriali al contrario delle macchine FDM che possono essere anche utilizzate da privati per produzione di parti a scopo hobbistico.

Un'altra tecnologia sviluppata negli anni 90 era un tipo di stampa a cera, inventato da Solidscape e denominato Material Jetting. La tecnologia è unica in quanto produce oggetti che possono essere immediatamente colati come componenti metallici con elevata precisione ponendo le basi per la stampa 3D come processo secondario per la creazione di parti finite.

Nel 1996 3D Systems ha rilasciato la propria tecnologia di stampa 3D a cera, che si basava su una tecnica di getto di materiale. Questo sarebbe servito per la realizzazione della tecnica multi-jet printing (MJP) che si basa su testine di stampa a getto d'inchiostro piezoelettriche, simili a quelle che si trovano nelle stampanti 2D tradizionali, per depositare resina plastica fotopolimerizzabile o cera colata ad altissima risoluzione. In questo caso una lampada UV polimerizza l'inchiostro solidificandolo con gli altri strati fino al completamento dell'oggetto.

Con questa tecnologia è possibile effettivamente stampare in 3D oggetti multicolore e multimateriali che consentono anche di ottenere proprietà fisiche diverse all'interno di un singolo oggetto.

Il getto di legante, o Binder Jetting, è un'altra tecnologia sviluppata in questo periodo. Questa tecnica di stampa 3D utilizza testine di stampa che depositano un legante liquido e un inchiostro colorato su uno strato di polvere. [5] Queste stampanti sono state commercializzate con un prezzo molto competitivo e più conveniente di altri sistemi industriali. Il fascino di questa tecnologia sta inoltre nella possibilità di ricreare stampe 3D realistiche partendo da scansioni 3D di persone.

La tecnologia Binder Jetting è stata successivamente utilizzata anche con polveri di metallo; le parti ottenute vengono poi inserite in un forno per essere ulteriormente sintetizzate in una parte metallica densa. Oggigiorno l'uso di questa tecnica è utilizzato anche per la stampa di farmaci che si dissolvono istantaneamente nella bocca del paziente.

Nonostante la plastica sia molto preziosa per alcuni settori industriali altri, come il settore aerospaziale e della difesa, sono fortemente interessati allo sviluppo della stampa 3D di tecnologie in metallo. I processi principalmente sviluppati sono stati il Direct Energy Deposition (DED) e i processi di fusione a letto di polvere.

La tecnologia DED prevede l'introduzione di polvere metallica in una fonte di calore, come un laser, che fonde insieme le particelle metalliche mentre si depositano. (Figura 2.5). I sistemi DED non si limitano alla sola stampa 3D su un supporto piano in quanto sono spesso collegati a un braccio a 4 o 5 assi. Questo permette di stampare il metallo su superfici curve come le strutture metalliche già esistenti e di riparare parti danneggiate, in particolare nell'industria aerospaziale. Le macchine DED hanno camere di stampa con volumi elevati e sono stati compiuti degli esperimenti per stampare intere fusoliere di aeromobili, anche se i risultati non sono stati pubblicati.

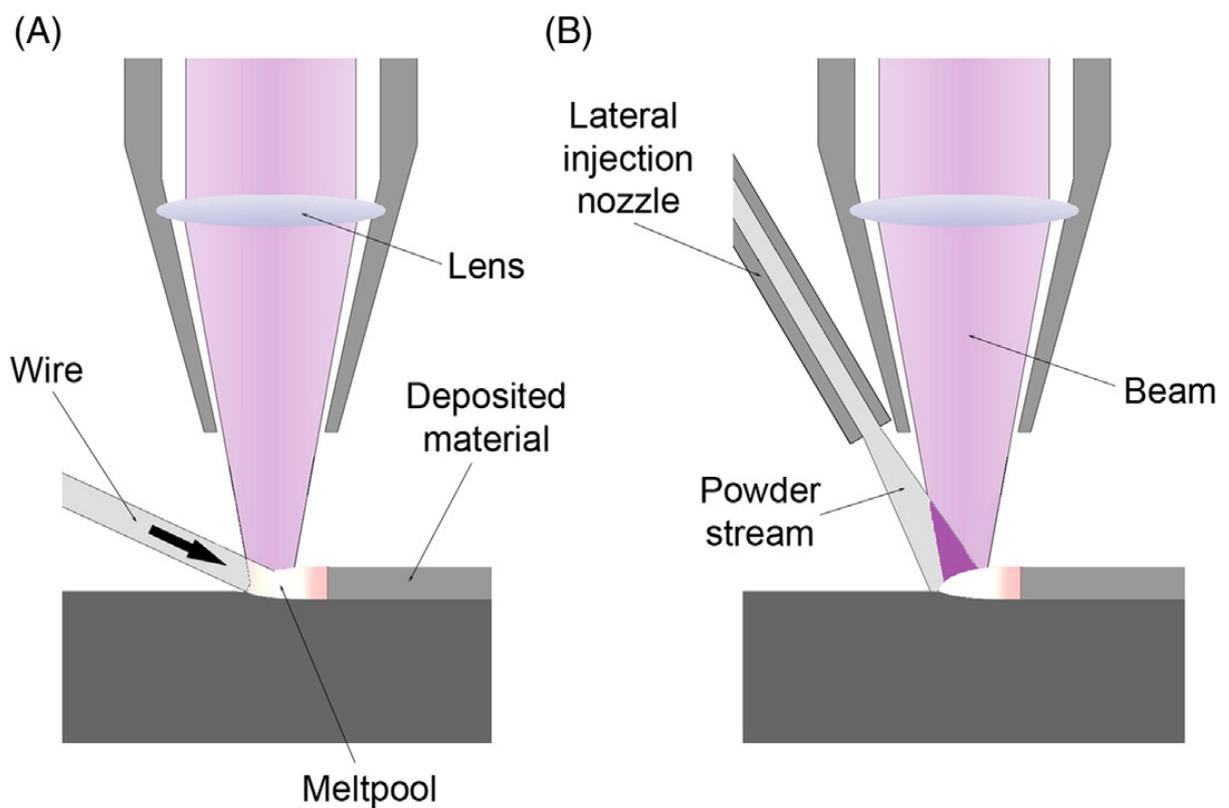


Figura 2.5 Directed energy deposition, la materia prima metallica viene introdotta in una sorgente luminosa sotto forma di filo (A) oppure come polvere (B).

Le macchine a letto di polvere invece sono alloggiare all'interno di una camera a gas inerte, in cui una fonte di energia ad alta potenza fonde le particelle di metallo strato per strato: il processo è molto simile a quello utilizzato per SLS.

Sono state sviluppate due tecniche principali per PBF. La prima è quella sviluppata da EOS ed è basata sulla tecnologia SLS mentre la seconda è quella sviluppata dall'istituto Fraunhofer Institute for Laser Technology in Aachen in Germania, nota con il nome di Selective Laser Melting (SLM).

La più grande distinzione tra la tecnologia di Fraunhofer e quella di EOS è che nella prima le particelle metalliche si fondono completamente insieme piuttosto che essere semplicemente sintetizzate con conseguente ottenimento di parti più dense e più forti, che non richiedono un trattamento termico dopo la stampa.

Una categoria specifica di SLM è l'Electron Beam Melting (EBM) che utilizza un fascio di elettroni come fonte di calore. Questo porta a tempi di realizzazione più rapidi.

Le tecnologie di fusione a letto di polvere sono adatte alla produzione finemente dettagliata di parti e, quando la macchina è sufficientemente grande, di piccoli lotti. Anche se è richiesta una consistente fase di post-elaborazione per rimuovere le strutture di supporto e migliorare la finitura superficiale.

Il limite principale di queste tecnologie è la dimensione delle camere di stampa che non sono paragonabili a quelle utilizzate per DED.

2.2 Fasi della produzione additiva

Il processo di produzione additiva passa attraverso diversi step prima di ottenere la realizzazione finale della parte. Le principali fasi sono:

1. Creazione del modello matematico tridimensionale
2. Generazione del file STL
3. Orientamento del modello e generazione dei supporti
4. Esecuzione dello slicing
5. Costruzione dell'oggetto
6. Attività di post-processing

La creazione del modello matematico tridimensionale è il presupposto principale per l'utilizzo della stampa 3D e viene realizzato utilizzando un sistema CAD o una scansione tridimensionale. Oggigiorno i progettisti dispongono di una vasta gamma di sistemi CAD che permettono loro di ottenere componenti di ogni genere.

La generazione del file STP, acronimo di Standard Triangulation Language, avviene mediante una conversione del modello CAD 3D in un modello di tipo "Shell", in cui le superfici vengono discretizzate da triangoli di differenti dimensioni in funzione di complessità e risoluzione richiesta. È quindi logico pensare che più è fitto il reticolo di triangoli che discretizza le superfici del modello, maggiori saranno le informazioni che vengono fornite al software per la realizzazione della parte, portando a un miglioramento della precisione di stampa. In Figura 2.6 è possibile notare l'approssimazione di un oggetto ottenuta dopo la generazione del file STL.

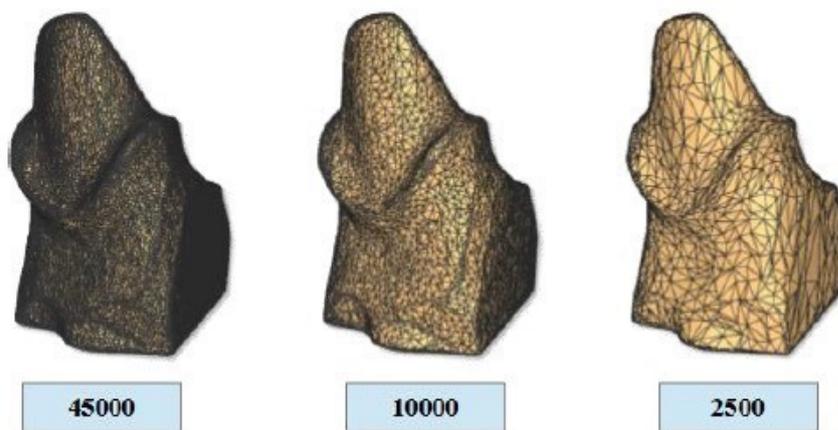


Figura 2.6 Esempio generazione file STL

Quasi tutti i sistemi di progettazione assistita da computer (CAD) possono importare ed esportare file STL e quasi tutte le macchine AM supportano il formato STL.

L'orientamento del modello e la generazione dei supporti compongono una delle fasi che ha un maggior impatto su tutto il processo di produzione additiva. In questa fase il file in formato STL viene utilizzato come interfaccia tra il modello CAD ed il software della macchina di fabbricazione additiva. Il Software, una volta ricevuto il file, definisce l'orientamento con cui l'oggetto verrà realizzato e genera in automatico i supporti.

I supporti hanno molteplici scopi tra cui ancorare l'oggetto alla piattaforma di lavoro durante la costruzione, proteggere le pareti laterali durante la lavorazione e supportare le zone sporgenti. La scelta del materiale e la geometria con cui vengono generati i supporti deve quindi tenere conto di differenti necessità:

- Sorreggere il pezzo durante la costruzione e impedire che questo aderisca al piatto di stampa
- Collocazione dei supporti in superfici che non richiedono finiture superficiali particolarmente elevate in quanto la rimozione dei supporti incrementa la rugosità superficiale
- Collocazione dei supporti in zone in cui la loro successiva rimozione sia facile e quindi evitare zone inaccessibili agli utensili per la rimozione.

La fase di esecuzione dello Slicing è caratterizzata da un processo nel quale le informazioni del modello vengono trasferite alla stampante sotto forma di istruzioni permettendo di determinare tutti i parametri necessari. Tali informazioni vengono raccolte dalla stampante con un determinato codice denominato G-code.

In questa fase il modello tridimensionale viene tradotto in una serie di 'fette' piane orizzontali, come mostrato in Figura 2.7, che verranno poi realizzate una sopra l'altra, mediante deposizione di materiale fuso dall'estrusore della stampante. Infatti, gli oggetti stampati con questa tecnologia sono caratterizzati da una certa rigatura orizzontale dovuta proprio alla sovrapposizione degli strati. Lo spessore degli strati, detti anche layer, è scelto direttamente dall'utente in quanto da questo parametro sono fortemente influenzati la qualità della stampa, la resistenza meccanica dell'oggetto prodotto e i tempi di stampa.

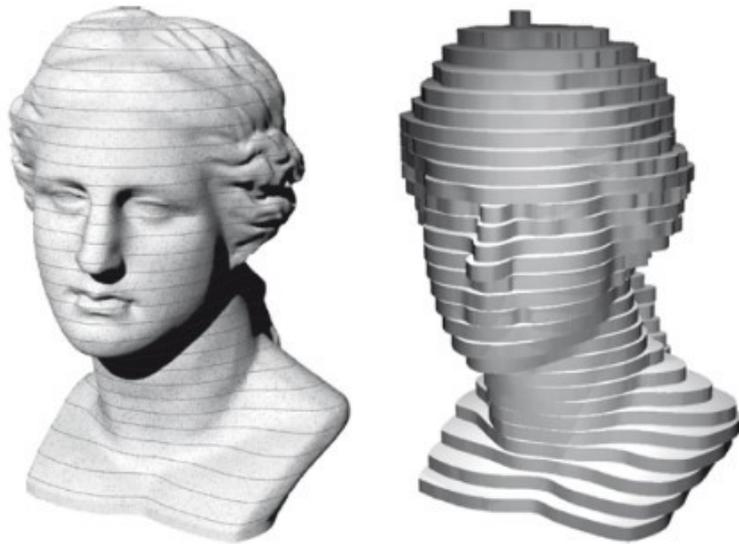


Figura 2.7 Slicing di un busto mediante l'uso di strati uniformi

La costruzione dell'oggetto varia a seconda della tecnologia utilizzata ed è controllata da un computer che realizza la parte strato su strato.

Successivamente alla costruzione dell'oggetto si hanno le attività di post-processing. Queste iniziano con la rimozione dell'oggetto dal piatto di stampa e continuano con pulizia, rimozione dei supporti, lavorazioni di finitura superficiale, trattamenti termici e altre lavorazioni che variano in base alle richieste progettuali della singola parte e alla tecnica di stampa 3D utilizzata.

La fase che in questa tesi verrà maggiormente analizzata è quella relativa a orientamento e generazione dei supporti in quanto si è notato come in letteratura non sia presente un metodo che permette di identificare le direzioni migliori per la stampa di componenti. Questo metodo si basa sullo studio di determinati parametri che avranno lo scopo di limitare il numero, teoricamente infinito, di orientamenti e permettere all'utente di operare una scelta più consapevole.

2.3 Possibili orientamenti e principali fattori di orientamento trovati in letteratura

L'orientamento di una data parte può essere definito da due angoli α e β nel riferimento globale $O(x,y,z)$. Come dimostrato da varie ricerche, questi due parametri di orientamento da soli hanno un enorme impatto su durata del processo, qualità attesa e costo di produzione. Come riportato in [6], teoricamente il numero possibile di orientamenti di costruzione di una parte è infinito mentre gli input principali del problema di orientamento sono rappresentati dal modello 3D di una parte e dagli obiettivi di produzione che sono richiesti. Questo è un tipico problema multi-obiettivo. L'orientamento viene identificato dopo aver ruotato lungo l'asse X il modello di un angolo α ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$) e attorno all'asse Y di un angolo β ($0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$) come mostrato in Figura 2.8

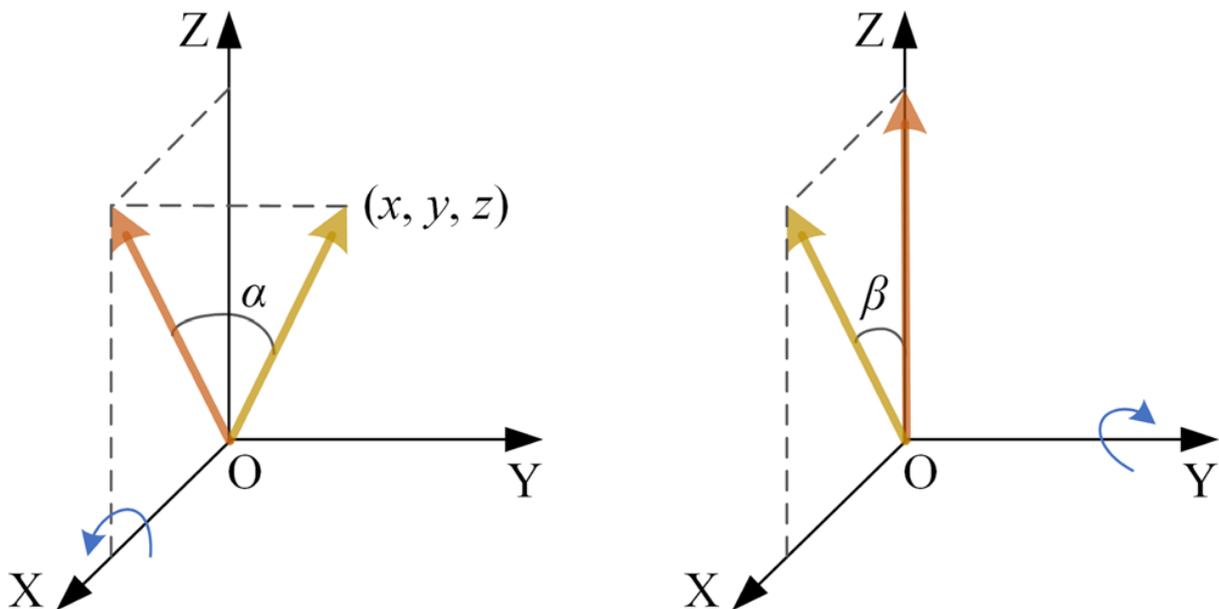


Figura 2.8 Rappresentazione schematica dei due angoli di rotazione α, β

È anche possibile indicare un orientamento utilizzando l'espressione di un vettore unitario (x, y, z) che può essere convertito nella coppia (α, β) utilizzando le equazioni Eq. 2.1 e Eq. 2.2

$$\text{Eq. 2.1} \quad \alpha = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{z}\right) & \text{se } y \neq 0 \text{ oppure } z \neq 0 \\ 0 & \text{se } y = 0 \text{ e } z = 0 \end{cases}$$

$$\text{Eq. 2.2} \quad \beta = -\arctan\frac{x}{\sqrt{y^2+z^2}}$$

Secondo gli articoli [7] [8] e gli studi [9] e [10] i principali fattori che guidano l'orientamento sono:

1. Proprietà della parte: questo fattore comprende sia proprietà meccaniche come resistenza a trazione, a snervamento e durezza sia proprietà fisiche come sollecitazione residua, modulo di flessione e prestazioni a fatica. Tutte queste proprietà sono direttamente influenzate dall'orientamento.
2. Precisione della parte: questo fattore comprende i principali indicatori di precisione della parte come errori dimensionali, errori geometrici ed errori volumetrici. Anche in questo caso l'orientamento della parte influisce direttamente su restringimento, arricciatura e distorsione della parte stampata, che sono i principali fattori che causano errori dimensionali e geometrici i quali saranno approfonditi nel capitolo successivo.
3. Qualità della superficie: viene valutata utilizzando l'indicatore della rugosità superficiale. L'orientamento ha un effetto diretto sulla rugosità in tutti i processi di additive manufacturing a causa del metodo di costruzione strato su strato.
4. Strutture di supporto: questo fattore ha particolare interesse in quelle tecnologie di stampa nelle quali i supporti sono necessari come FDM, LPBF, EBM e DMD. Come riportato in precedenza i supporti servono per sostenere le superfici a sbalzo, resistere alla deformazione o al possibile collasso della parte in costruzione, ridurre la distorsione delle parti causata da gradienti termici o bilanciare una zona della parte per evitare spostamenti. L'uso di strutture di supporto porta a un aumento di volume allungando così il tempo e, di conseguenza, il costo di costruzione. Inoltre, la rimozione dei supporti allungherà le attività di post-processing e diminuirà la qualità superficiale.

5. Tempo di costruzione: è costituito dal tempo che la macchina impiega per la preparazione e il tempo effettivo per stampare la parte completa. L'orientamento influisce direttamente sull'altezza della parte e quindi influenza il tempo di costruzione in quanto saranno maggiori i layer che la macchina dovrà realizzare.
6. Costo di costruzione: viene calcolato valutando tutte le risorse richieste alla costruzione della parte come materiali, energia, macchina e lavoro. Anch'esso è influenzato dall'orientamento poiché diversi orientamenti possono causare consumo di materiale e tempi di lavorazione diversi.
7. Tempo di post processing: viene valutato come il tempo impiegato per il miglioramento delle proprietà della parte come precisione e qualità superficiali e la rimozione dei supporti. L'orientamento influisce su questo fattore in quanto il tempo di post-processing è direttamente influenzato dalla quantità dei supporti da rimuovere e dalla qualità delle superfici che si ottengono una volta completata l'operazione di stampa.
8. Costo di post-processing: calcolato identificando tutte le risorse necessarie alle attività di post-processing. Questo fattore è influenzato dall'orientamento in quanto diversi orientamenti possono generare una variazione delle risorse impiegate e quindi del relativo costo.

Il metodo sviluppato in questa tesi prende in considerazione i fattori sopracitati e ne integra altri che sono ritenuti molto importanti per la scelta dell'orientamento di stampa.

2.4 Fattori di riferimento

In letteratura sono stati riscontrati altri fattori che possono essere utilizzati come riferimento per la scelta della direzione di stampa. Nel seguente capitolo essi saranno elencati e riportate le principali informazioni trovate nella letteratura.

2.4.1 Tempo di costruzione

Una prima intuizione riguardo il tempo di stampa suggerisce che esso sia direttamente proporzionale all'altezza della parte da realizzare. Ciò è stato riscontrato in letteratura, infatti, analizzando il processo SLA è possibile notare che un elevato tempo è utilizzato nella fase di dip-delay cioè quella fase nella quale il liquido scorre sullo strato appena formato. Questo ritardo è presente nella costruzione di ogni strato e quindi è possibile affermare che maggiori strati richiederanno sicuramente un tempo maggiore di costruzione.

Alcuni articoli come [11] ipotizzano che il tempo di stampa possa essere calcolato come nella equazione Eq. 2.3, cioè come la somma di due contributi: un contributo relativo al tempo impiegato per la copertura dello strato precedente e un contributo proporzionale al volume della parte. Il termine t_w indica il tempo di ricoprimento, n rappresenta il numero degli strati, S_i e l_i sono rispettivamente l'area e lo spessore dello strato i -esimo.

L'equazione tiene conto delle strategie di slicing variabili che possono essere utilizzate. Questo metodo di calcolo del tempo di stampa è utilizzato in molti sistemi di ottimizzazione. Il principale punto debole sta nel fatto che non vengono considerati i tempi per la realizzazione dei supporti.

$$\text{Eq. 2.3} \quad t_{build} = t_w n + K_1 \sum_{i=1}^n S_i l_i$$

In [12] viene proposto un metodo per il calcolo del tempo di costruzione ottenuto mediante combinazione lineare dell'altezza della parte h , volume della parte v_p e volume di supporto v_s . L'equazione Eq. 2.4 riporta la combinazione proposta:

$$\text{Eq. 2.4} \quad t_{build} = K_{3a} + K_{3b}h + K_{3c}v_p + K_{3d}v_s$$

Tutte le tecnologie analizzate non tengono comunque conto di un fattore importante, la complessità della parte. Questo è facilmente deducibile poiché non risulta facile tradurre la complessità in un parametro da attribuire al modello. In letteratura sono presentati alcuni modelli parametrici che permettono di valutare il tempo di stampa considerando anche quest'ultimo fattore.

Nel metodo viene valutato sia il tempo di costruzione di un lotto che il tempo di costruzione della singola parte. Questa distinzione è necessaria in quanto l'utente potrebbe essere interessato non solo alla realizzazione di una sola parte, ma anche alla realizzazione di un lotto. La distinzione permette quindi di prevedere l'impatto temporale che avrà l'orientamento di una singola parte sul tempo necessario per la realizzazione di un lotto.

2.4.2 Costo di costruzione

Per valutare il costo di costruzione della parte è consigliabile considerare non solo il costo di realizzazione della parte, ma anche il costo di pre e post processing, che nella maggior parte dei casi non possono essere trascurati. Quindi il costo totale è definito dai contributi dei tre elementi, espressi nell'equazione Eq. 2.5:

$$\text{Eq. 2.5} \quad c_{tot} = c_{pre} + c_{build} + c_{post}$$

Combinando ora l'equazione Eq. 2.3 con l'equazione Eq. 2.5 è possibile ottenere l'equazione Eq. 2.6:

$$\text{Eq. 2.6} \quad c_{tot} = (t_{pre} + t_{post})c_{labour} + c_{operative}t_{build} + c_{material}$$

Dove $c_{material}$ indica il costo dei materiali, $c_{operative}$ indica il costo operativo, c_{labour} indica il costo del lavoro, t_{build} indica il tempo di costruzione, t_{pre} indica il tempo di pre-processing e t_{post} indica il tempo di post-processing.

Nell'articolo [12] è presente un'osservazione interessante, si sostiene che ogni obiettivo da ottimizzare possa essere ricondotto a un elemento di costo. Questo è sicuramente vero e inoltre, un approccio simile, porta a svariati vantaggi come, ad esempio, il fatto che il problema multi-obiettivo si riconduce a un unico problema di ottimizzazione la cui unica funzione è rappresentata dalla funzione di costo. Tutto ciò renderebbe il lavoro di ottimizzazione incredibilmente facile da eseguire e fornirebbe un risultato più che significativo per il mondo industriale. L'intuizione è però solo una proposta e non è presente in letteratura un metodo che dia una soluzione di questo tipo.

Anche in questo caso, come nel calcolo del tempo di stampa, è utile fare una distinzione tra il costo della singola parte e il costo di realizzazione di un lotto. Come detto in precedenza, l'utente potrebbe avere una necessità particolare per cui è interessato a produrre più parti possibili in una sola stampa, in questo modo verrà probabilmente ottimizzato il costo del lotto, ma non sempre è possibile imporre a ogni parte il suo orientamento migliore e ciò rende necessario un compromesso.

2.4.3 Parametri della stampante

Nel metodo sviluppato sono presenti alcuni criteri direttamente collegati alla tecnologia di stampa e in particolar modo al tipo di stampante utilizzata. Questi parametri sono utilizzati per valutare l'effettiva realizzazione della parte utilizzando una determinata stampante.

I principali parametri della stampante sono larghezza e lunghezza del piatto di stampa, altezza della camera di stampaggio, area della parte proiettata sul piatto di stampa, volume di ingombro e densità di impacchettamento (packing density).

I parametri relativi a larghezza e lunghezza del piatto di stampa sono direttamente ricavabili dalla scheda tecnica fornita dal produttore della stampante, così come l'altezza della camera di stampaggio. È importante che la parte realizzata non ecceda dalle dimensioni effettive della stampante, in particolar modo quando la camera di stampaggio è ad atmosfera controllata come nel caso di L-PBF e EBM. Questo, come visto in precedenza, è uno dei limiti della tecnologia AM in quanto non permette la realizzazione di manufatti con dimensioni elevate. Nel metodo sviluppato, i parametri relativi alle dimensioni della stampante, saranno utilizzati come primo discriminante per l'eliminazione di alcuni orientamenti, in quanto, un elemento essenziale per la realizzazione del componente è quello di poter essere realizzato all'interno della stampante. In Figura 2.9 viene rappresentato un componente all'interno della camera di stampa, il componente dovrà essere sempre all'interno del volume di stampa.

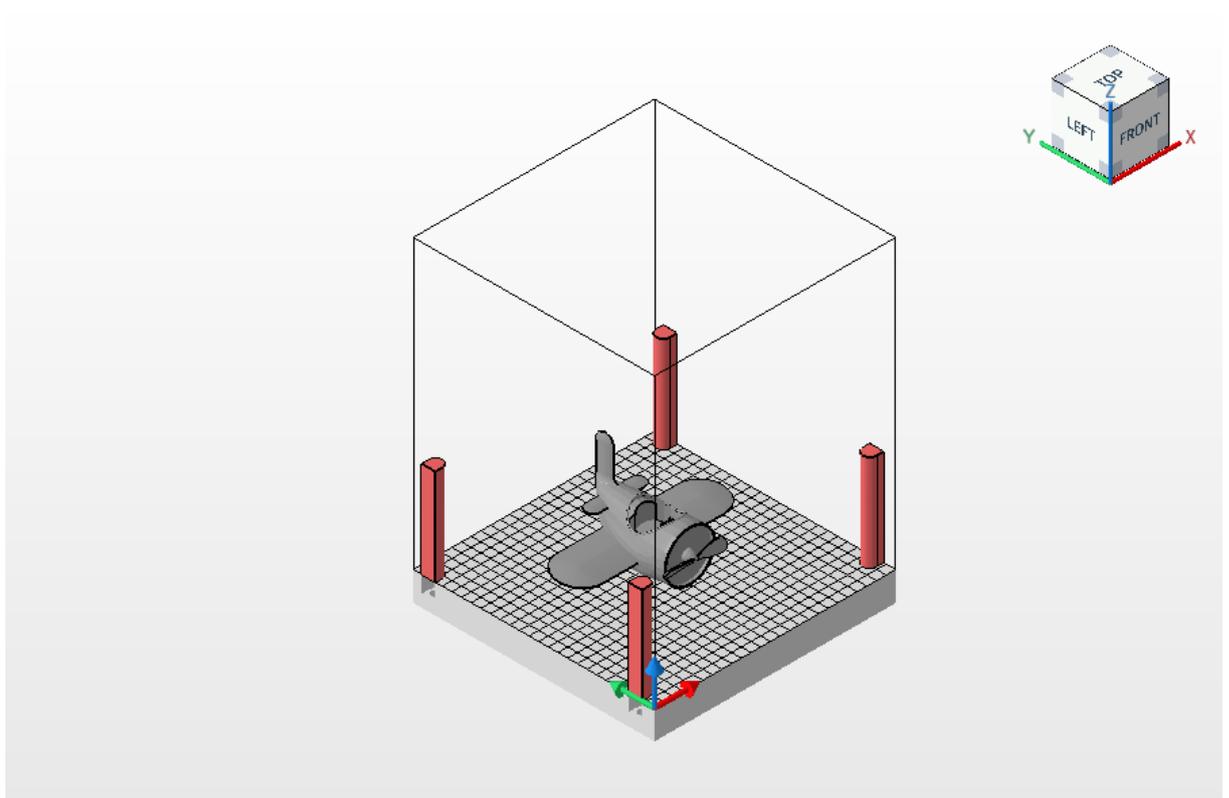


Figura 2.9 Camera di stampa con componente al suo interno

La densità di impacchettamento è un parametro di notevole importanza nel caso in cui la stampa non riguardi una sola parte, ma un insieme di esse. Questo fattore è solitamente individuato da una percentuale ed indica l'effettivo ingombro della parte all'interno della camera di stampa. Viene calcolata facendo il rapporto tra il volume della parte e il volume di ingombro. L'ideale è avere un valore elevato della densità di impacchettamento, poiché a causa dell'elevato costo dei materiali è preferibile realizzare più manufatti possibili in una sola stampa. Come è possibile notare nella Figura 2.10 vengono riportate due rappresentazioni di un modello. Il modello ha volume pari a 157897 mm^3 . Nel caso a) si ottiene un volume di ingombro pari a 970680 mm^3 ed valore di packing density pari al 16% mentre nel caso b) si ottiene un volume di ingombro pari a 680506 mm^3 e quindi la packing density assume un valore pari al 23%.

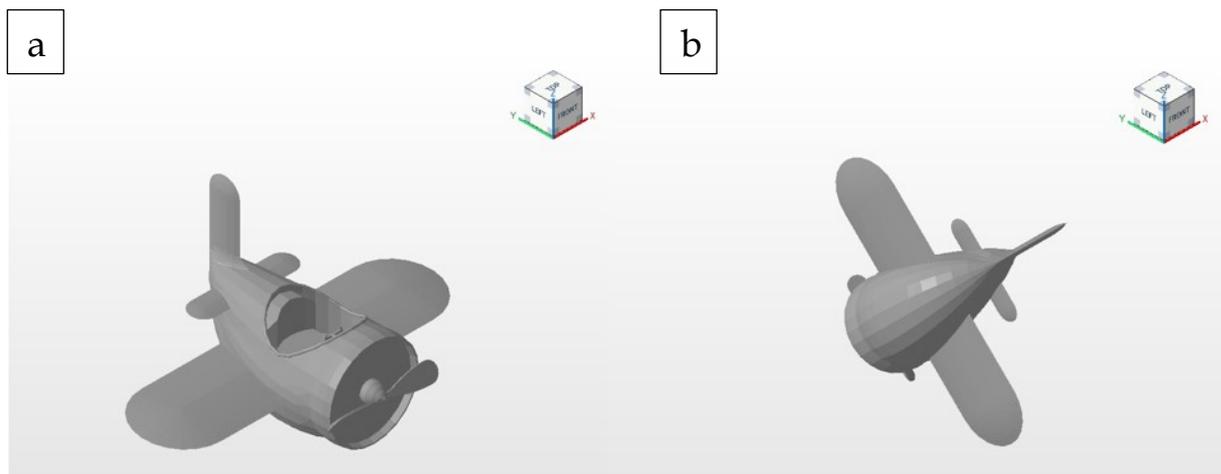


Figura 2.10 Esempio valutazione packing density: a) orientamento base, b) orientamento inclinato

Il volume di ingombro e l'area proiettata sul piatto di stampa possono essere collegate alla densità di impacchettamento, essi permettono di identificare rapidamente se la presenza di una o più parti saturi completamente lo spazio a disposizione o se sia possibile inserire ancora altri oggetti. In letteratura sono disponibili alcuni articoli che indicano come ottimizzare la posizione dei componenti all'interno della camera di stampaggio nel caso vengano stampate più parti contemporaneamente.

2.4.4 Volume dei supporti e superfici overhang

Il materiale di supporto viene utilizzato per realizzare superfici sporgenti, dette anche superfici overhang. I supporti sono effettivamente un materiale sacrificale che viene utilizzato durante il processo di stampa per consentire la realizzazione di eventuali caratteristiche sporgenti in quanto non è possibile stampare in aria senza che il materiale collasi. I supporti vengono poi rimossi al termine della stampa, questa è una delle prime operazioni di post-processing.

La maggior parte dei sistemi AM consentono di scegliere con quale angolazione utilizzare il materiale di supporto. La scelta richiede alcune prove ed errori per determinare l'angolo da utilizzare così da ottenere la migliore qualità della parte, riducendo al contempo la quantità del materiale di supporto utilizzato.

Una indicazione riportata in [13] suggerisce di scegliere l'orientamento che necessita il minor materiale di supporto. Questa indicazione è sicuramente utile per minimizzare la quantità di materiale utilizzato e di conseguenza tempo e costo di stampa, ma devono essere tenuti in considerazione altri parametri.

Un esempio riportato in [13] mostra come la stampa della parte in Figura 2.11, realizzata con orientamento verso l'alto, permette di utilizzare pochissimi materiali di supporto, mentre, se stampata con orientamento opposto, la zona interna verrà riempita con del materiale che richiederà un tempo maggiore per essere rimosso una volta che la parte sarà stampata.



Figura 2.11 Materiale di supporto per consentire la stampa di caratteristiche sporgenti

È utile ricordare che la rimozione del materiale è sempre difficoltosa se questo è presente all'interno della parte. Inoltre, le superfici che entrano in contatto con il materiale di supporto avranno una finitura superficiale peggiore rispetto alle altre superfici e sarà quindi necessaria un'ulteriore lavorazione in fase di post-processing per renderla adeguata.

Nel caso delle tecnologie di AM metalliche è importante tenere in considerazione che il materiale di supporto, oltre a sostenere le zone sporgenti, svolge molteplici compiti tra cui:

- Rinforzare e fissare la parte alla piattaforma di stampa
- Allontanare il calore in eccesso
- Prevenire deformazioni della parte o, nel peggiore dei casi, il collasso della costruzione
- Resistere alla forza meccanica del meccanismo di spargimento della polvere sul pezzo

Anche in questo caso è sempre necessario un compromesso per orientare la parte in modo che vengano ottimizzati tempo di costruzione, facilità nella rimozione dei supporti, qualità superficiale e deformazione della parte. La maggior parte dei software di pre-processing AM per metallo consente la selezione di un numero di diversi tipi di supporto, ognuno dei quali ha diverso trasferimento di calore e diverse caratteristiche di resistenza meccanica. Alcuni dei tipi di supporto offerti dai software includono solidi, muri, alberi, coni, reticoli, blocchi, punti, linee, ragnatele e fazzoletti. È possibile notare l'uso di alcuni di essi nella Figura 2.12.

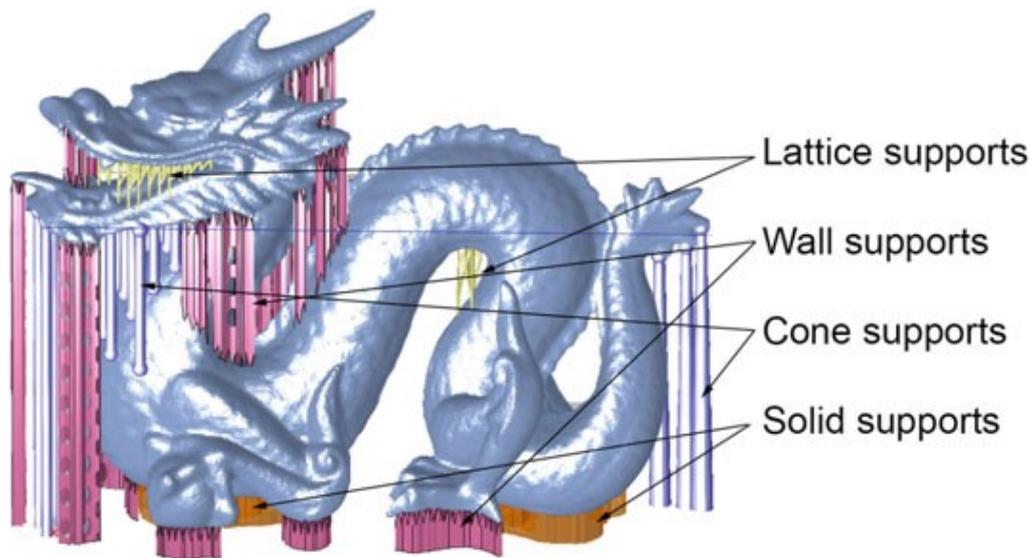


Figura 2.12 Esempi di diversi tipi di supporto. L'immagine riporta un esempio, per questa parte non sarebbe ideale utilizzare questa configurazione.

Nel caso delle tecnologie di AM polimeriche quasi tutte le tecnologie, ad eccezione della fusione a letto di polvere e alcune tecnologie di binder jetting, necessitano di strutture di supporto per le superfici in overhang. Tutte le tecnologie di AM metalliche hanno necessità di strutture di supporto.

Per valutare e quantificare quali zone necessitano di materiale di supporto sono state formulate varie ipotesi. Una formulazione semplice e molto utilizzata è quella riportata in [14]: questa valutazione è eseguita considerando l'area dei triangoli, le cui normali soddisfano un certo angolo di inclinazione rispetto alla direzione di costruzione. In altri studi la quantità dei volumi di supporto viene valutata tramite un'approssimazione bidimensionale, calcolando la somma delle proiezioni di ciascun triangolo per il quale l'angolo tra la normale del triangolo e la direzione di stampa è maggiore di un certo valore. Il limite di alcuni di questi metodi è il fatto che non tengono in considerazione i supporti che poggiano direttamente sulla superficie dell'oggetto, anziché sulla piattaforma di stampa.

Dalla revisione della letteratura è possibile ricavare che l'angolo minimo con cui una superficie possa essere realizzata senza supporti è 45° misurati dalla direzione orizzontale.

Per definire in maniera appropriata le superfici overhang l'articolo [8] propone di definirle come quelle parti di superficie il cui vettore normale è opposto alla direzione di stampa. Come detto in precedenza queste aree sono candidate ad avere strutture di supporto comportando un aumento di materiale, tempo di costruzione e costo. Possiamo quindi affermare che nella scelta della direzione di stampa la minimizzazione delle superfici overhang comporta un beneficio.

2.4.5 Resistenza meccanica e anisotropia

L'anisotropia è la proprietà per la quale un componente ha caratteristiche che dipendono dalla direzione lungo la quale vengono considerate.

Tutte le tecnologie di produzione additiva risentono di un certo grado di anisotropia dovuto alla realizzazione degli oggetti in AM mediante deposizione di strato su strato. L'unica tecnologia ad essere isotropa è la tecnologia SLA [15], in quanto non c'è differenza tra i legami chimici che compongono ogni strato e le forze che tengono insieme gli strati.

Data la presenza dell'anisotropia nella maggior parte delle tecnologie la resistenza meccanica del legame tra ogni strato può essere leggermente più debole rispetto alla resistenza meccanica valutata dello strato stesso. Anche in questo caso l'orientamento gioca un ruolo molto importante poiché, come mostrato in Figura 2.13, se un oggetto viene stampato con orientamento verticale (caso a) è probabile che subisca una rottura con l'applicazione del carico.

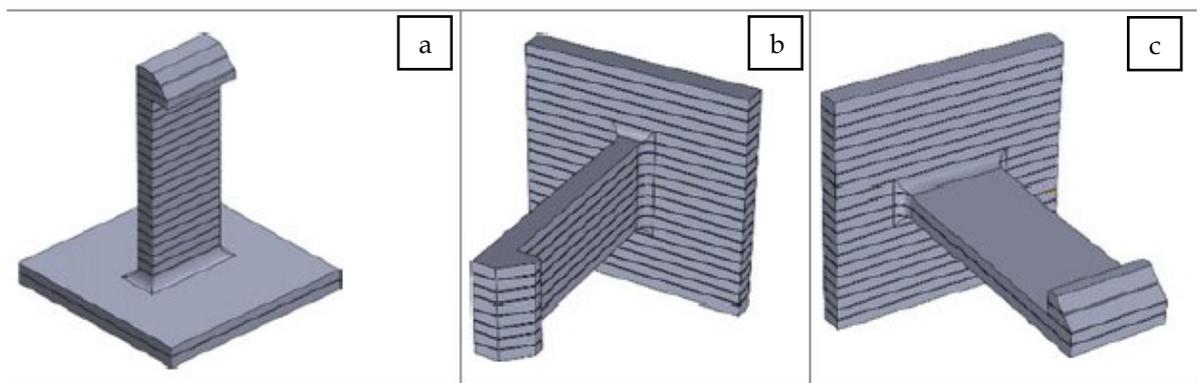


Figura 2.13 Caso di clip stampata in diversi orientamenti

Il caso c risulta invece essere quello con maggiore resistenza e flessibilità, ma con aggancio peggiore, mentre il caso b è considerabile come il giusto compromesso. Questo esempio fa comprendere anche quanto sia importante progettare le parti in modo che queste siano adatte ai carichi che dovranno sopportare. Non è sempre possibile però, in particolare quando le geometrie sono molto complesse, ottenere anisotropia in direzioni preferenziali e quindi si scende spesso a un compromesso.

Una soluzione valida è quella di operare trattamenti termici nelle fasi di post-processing, ma questo aumenterebbe in maniera significativa il costo totale della parte e quindi potrebbe essere vantaggioso realizzare quella parte con metodi tradizionali e non più con tecnologie di additive manufacturing.

In alcune tecnologie, come la fusione a letto di polvere per polimeri, è presente un certo grado di anisotropia ma, quando si supera un certo spessore, questa viene ridotta al minimo. Questo è dovuto alla massa di materiale polimerico più grande, che trattiene il calore più a lungo, creando un legame migliore con lo strato sottostante.

Sono stati eseguiti diversi studi che ottimizzano le proprietà meccaniche, ma molti di essi considerano al massimo due o tre parametri da ottimizzare. Nell'articolo [16] viene descritta una procedura analitica per ottimizzare l'orientamento della costruzione su strutture a tralicci come quella riportata in Figura 2.14.

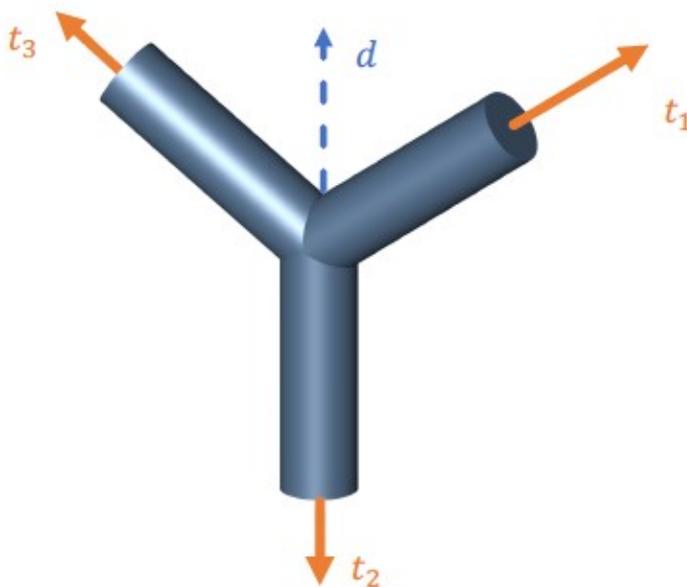


Figura 2.14 Esempio di struttura a traliccio

È noto che una struttura di questo tipo garantisce la massima resistenza lungo la direzione dei suoi filamenti. Nei componenti AM la direzione dei filamenti è perpendicolare alla direzione di costruzione, quindi, supponendo che la struttura sia principalmente soggetta a trazione, definito B il numero di travi che compongono la struttura, l'orientamento ottimale si ottiene minimizzando l'equazione Eq. 2.7 $\beta = \sum_{b=1}^B \omega_b (t_b \cdot d)^2$ Eq. 2.7

Eq. 2.7

$$\beta = \sum_{b=1}^B \omega_b (t_b \cdot d)^2$$

In cui t_b e ω_b definiscono l'orientamento spaziale e il peso assegnato alla trave b -esima.

2.4.6 Accuratezza e staircase effect

Uno dei principali limiti delle parti realizzate con tecnologie AM è la mancanza di 'qualità' degli oggetti finiti. Questi errori, difficilmente eliminabili, rendono i classici processi sottrattivi più attraenti quando sono richieste tolleranze dimensionali e geometriche molto stringenti. Sebbene questi errori non possano essere eliminati a causa di limitazioni tecniche, sono state condotte numerose attività di ricerca per ridurre al minimo questi errori.

Uno dei principali motivi della mancanza di qualità è dovuta all'effetto scalino, detto anche staircase effect, che si viene a creare nelle superfici inclinate o curve causato dalla modalità di stampa strato su strato. L'effetto scalino dipende dall'inclinazione della superficie e dallo spessore dello strato. La Figura 2.14 illustra un confronto tra la superficie del modello e il profilo della superficie realizzata. Si può facilmente intuire che se la superficie di una parte fosse orientata orizzontalmente o perpendicolarmente rispetto alla direzione di stampa l'errore dovuto all'effetto gradino può essere ridotto al minimo. Questo in realtà è molto difficile poiché un oggetto è composto da molte sfaccettature con orientamenti differenti.

Nel caso in cui una superficie sia funzionale e quindi necessiti di maggiore precisione dimensionale allora potrebbe essere intuitivo posizionarla in direzione parallela o perpendicolare alla direzione di stampa oppure saranno necessari ulteriori lavorazioni in fase di post-processing.

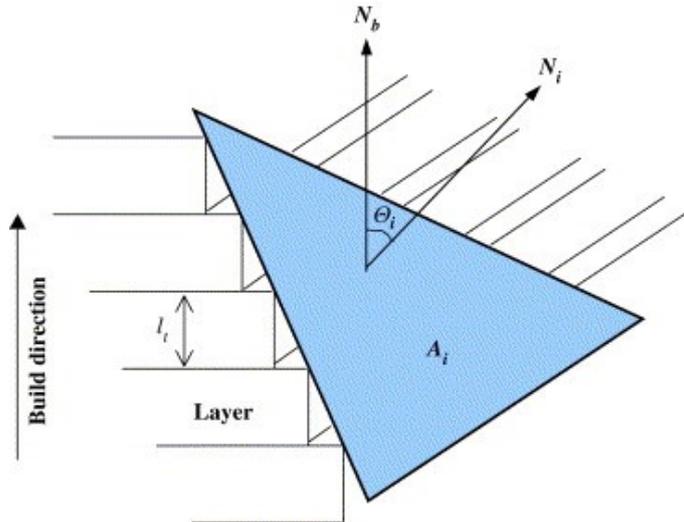


Figura 2.15 Profilo di una superficie inclinata

Lo standard internazionale dell'American National Standards Institute (ANSI) per valutare la rugosità media è quello riportato nell'equazione Eq. 2.8

Eq. 2.8

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x) - y_c| dx$$

dove $y(x)$ è il valore del profilo di rugosità, l è la lunghezza della valutazione e y_c è la posizione della linea centrale. Le aree sopra e sotto la linea sono uguali, dunque R_a rappresenta la sommatoria delle aree sopra e sotto la linea divisa per la lunghezza di valutazione.

Il modello a spigolo vivo non rappresenta accuratamente le caratteristiche della superficie reale. Alcuni studi hanno mostrato la differenza tra l'effettiva rugosità superficiale del pezzo fabbricato e il valore analitico del modello a spigolo vivo. In pratica, è difficile produrre la parte con spigoli vivi come mostrato in Figura 2.15 a causa del meccanismo di processo e delle caratteristiche del materiale come la diversa granulometria e viscosità del materiale.

Nell'articolo [17] viene proposta una formulazione alternativa per il calcolo della rugosità mostrato nell'equazione Eq. 2.9.

Eq. 2.9
$$Ra = \frac{L}{2} \left| \frac{\cos(\theta - \phi)}{\cos \phi} \right|$$

dove L è lo spessore dello strato, θ è l'angolo della superficie e ϕ è l'angolo della superficie del profilo come mostrato nella Figura 2.16.

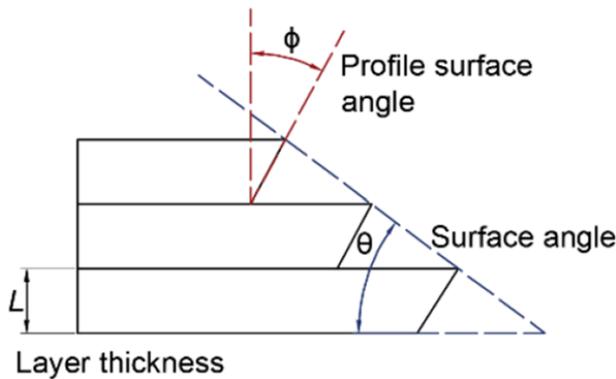


Figura 2.16 Parametri per il calcolo della rugosità superficiale nei sistemi AM

Ulteriore formulazione alternativa è mostrata nell'articolo [18] nel quale viene proposta l'equazione Eq. 2.10 per calcolare la rugosità di una superficie.

Eq. 2.10
$$Ra = \frac{A}{W} = \frac{t}{2} \left| \frac{\cos(\theta - \phi)}{\cos \phi} \right|$$

Questo metodo di calcolo è molto conservativo e sviluppato considerando la deviazione dell'area media A1 e A2 come mostrato in Figura 2.17.

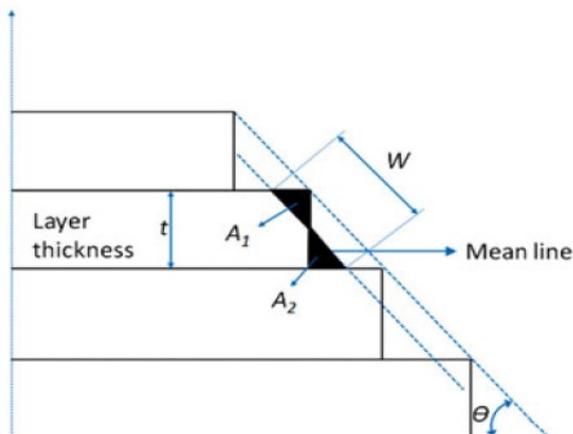


Figura 2.17 Modello per il calcolo della rugosità basato sulla deviazione della linea media

2.5 Stampa di un lotto di parti

Sulla maggior parte dei sistemi AM il lavoro di stampa avviene su una piastra di costruzione. Questo piatto può essere quadrato o rotondo ed è imbullonato al pistone della camera di costruzione che sarà spostato verso il basso, dello spessore di un singolo strato, dopo che ogni operazione di fusione viene completata.

La polvere viene distribuita sulla piastra di costruzione in uno strato sottile dal 'recoater', un sistema composto da un tergitristallo morbido (spazzole in silicone o fibra di carbonio) o duro (acciaio o ceramica) oppure da un rullo duro.

Il modo in cui vengono posizionate le parti sulla piastra di costruzione può avere un impatto importante sul successo e la qualità delle parti stampate. Mentre il recoater stende un nuovo strato di polvere, le sezioni della parte che sono già stampate non possono muoversi, quindi, se c'è qualche distorsione (anche minima) sulla parte, questa potrebbe generare una forza meccanica sul recoater quando entrano in contatto. Questa forza può bastare per piegare o rompere le parti se sono abbastanza delicate oppure potrebbe causare un danneggiamento del recoater che porterà al fallimento della stampa. Un esempio dell'effetto che si ha quando il recoater viene danneggiato è mostrato in Figura 2.18.

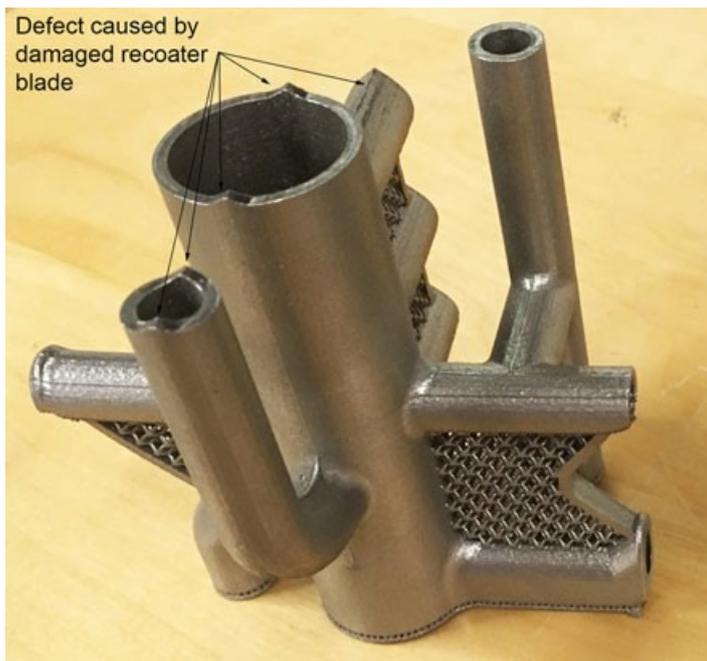


Figura 2.18 Esempio di parte in cui la lama del recoater è stata danneggiata e ha causato un difetto nella parte

In [13] vengono riportate alcune indicazioni per limitare i possibili danni alle parti stampate o il fallimento della stampa.

La prima indicazione riportata è il caso in cui il componente da realizzare sia in gran parte rettangolare o contenga lunghe pareti piatte. L'indicazione è quella di non posizionare le parti con pareti lunghe parallele al recoater, poiché questo farà sì che il recoater si incontri improvvisamente con un grosso ostacolo. È perciò consigliabile ruotarli attorno all'asse verticale per cercare di minimizzare la forza del recoater nei punti di contatto. Se la parte viene posizionata parallela al recoater e si ha la presenza di qualche distorsione, il recoater potrebbe non essere in grado di superare la distorsione e bloccherà la costruzione. Se la parte viene ruotata attorno all'asse Z di un angolo compreso tra 5° e 45° si ha che il recoater non incontrerà improvvisamente un lungo muro piatto e verranno ridotti notevolmente i possibili rischi di un incidente e verrà migliorata la qualità di elementi delicati come le pareti sottili. In Figura 2.19 viene rappresentata graficamente l'indicazione sopra descritta.

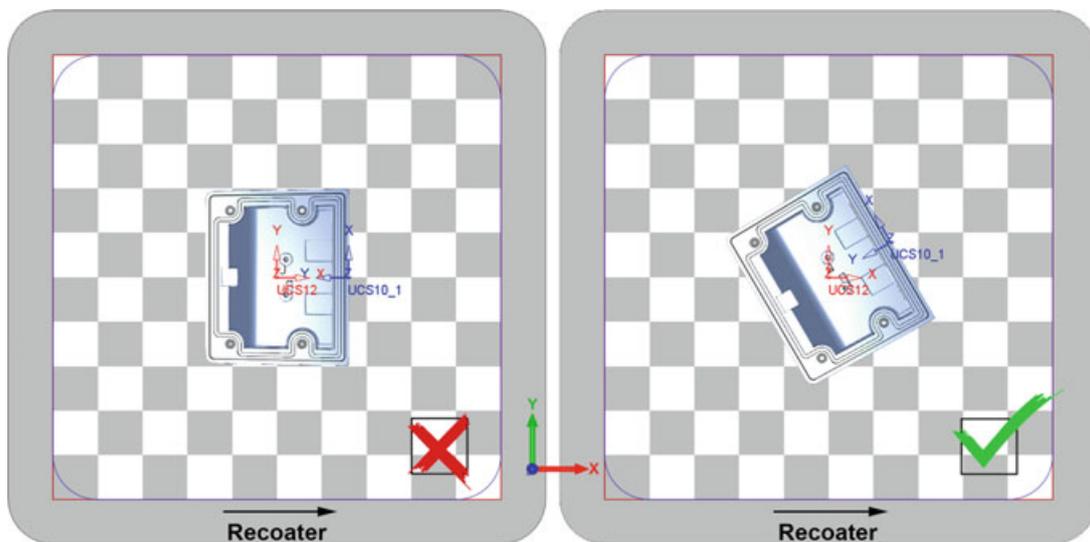


Figura 2.19 Evitare il posizionamento di parti parallele alla lame del recoater

Altra indicazione riportata è quella di evitare il posizionamento di parti una dietro l'altra. Infatti, se una parte si distorce ed entra in contatto con il recoater, la costruzione potrebbe continuare anche se il recoater o la parte potrebbero danneggiarsi. L'effetto di questo può essere un deterioramento nella diffusione della polvere dietro l'area di collisione. Perciò, se possibile, quando si annidano le parti sulla piastra di costruzione, è consigliabile aggiungere un po' di spazio dopo le parti lungo l'asse di ricopertura come mostrato in Figura 2.20.

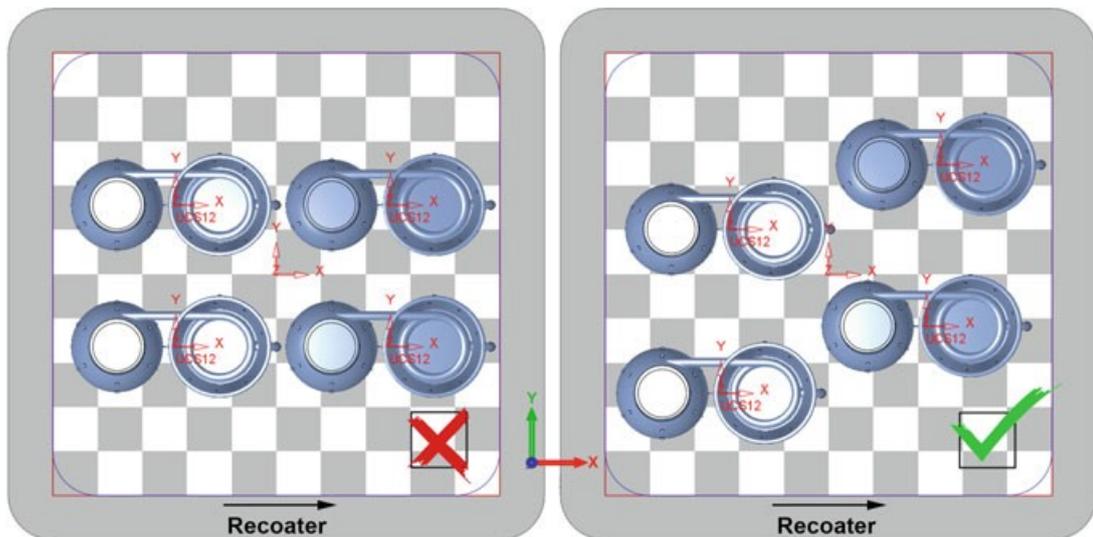


Figura 2.20 Evitare parti allineate direttamente una dietro l'altra

È consigliabile anche evitare il possibile contatto simultaneo del recoater con più parti. Questo contatto simultaneo porterebbe alla formazione di geometrie distorte e può essere evitato spostando le parti sulla piattaforma di stampa di pochi millimetri, distanza necessaria per ridurre il rischio di contatto simultaneo. Anche in questo caso la Figura 2.21 riporta l'indicazione consigliata.

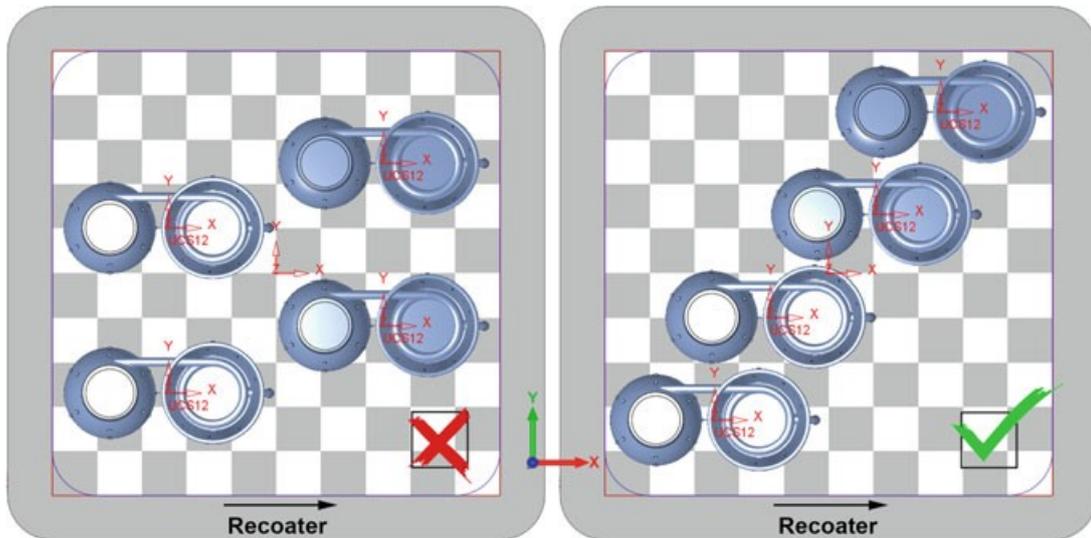


Figura 2.21 Evitare che più parti colpiscano contemporaneamente la lama del recoater

L'ultima indicazione riportata è relativa alla realizzazione di parti o aree con altezze considerevoli. Queste parti dovrebbero essere posizionate vicino al recoater in quanto su alcune stampanti non è possibile inserire abbastanza polvere nella macchina per stampare parti molto alte o per realizzare la stampa di una camera di costruzione completa. Perciò, per stampare parti così alte, potrebbe essere necessario mettere in pausa la macchina mentre la polvere viene aggiunta a metà percorso. Tuttavia, alcune stampanti consentono di ridurre la quantità di polvere depositata in ogni strato. In questo modo viene utilizzata una quantità normale di polvere durante la stampa di minuterie e, una volta terminate, la qualità di polvere per strato viene ridotta, fino al punto in cui si ha abbastanza polvere per stampare l'intera parte senza bisogno di mettere in pausa e ricaricare la macchina. L'indicazione è rappresentata mediante la Figura 2.22.

Va sottolineato che l'eventuale pausa, infatti, è indesiderabile in quanto le parti, durante il tempo necessario per ricaricare il sistema, tendono ad avere un certo ritiro dovuto al raffreddamento.

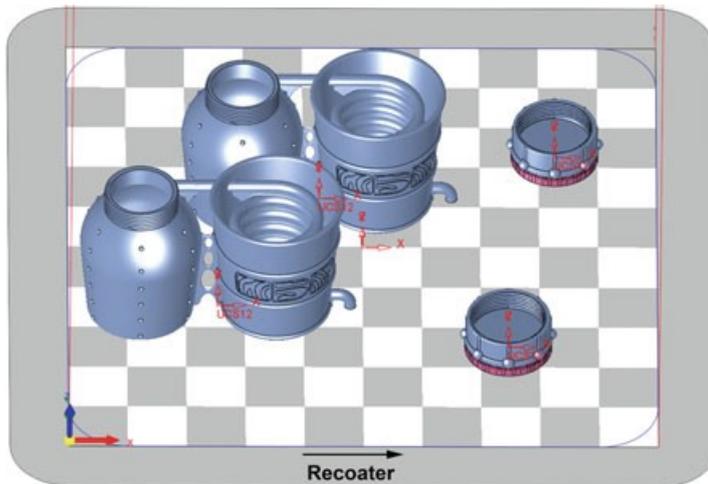


Figura 2.22 Posizionamento delle parti più alte vicino alla lama del recoater

La tecnologia di produzione additiva è effettivamente una tecnologia ideale alla produzione simultanea in quanto si possono ottenere risparmi significativi in termini di costi e tempo producendo più parti in un'unica configurazione e ottenendo un utilizzo efficiente del volume della macchina.

Come riporta in [19] vi sono due principali modalità per inserire le parti nella camera di stampa. La prima è quella di disporre su un solo strato le parti mentre la seconda è quella di disporle su più strati, come viene mostrato in Figura 2.23. Alcuni processi AM, come FDM, SLM e EBM non permettono la sovrapposizione delle parti in quanto la necessità di strutture di supporto causerebbe danni superficiali e aumenterebbe il tempo e la difficoltà di post-processing per rimuovere queste strutture. Altri processi come SLS non necessitano di strutture di supporto e permettono di posizionare le parti una sopra l'altra per formare strati di parti nello spazio di costruzione della macchina AM. In questi processi le materie prime fungono da supporto per gli strati di materiale aggiunti successivamente. Per la perfetta riuscita dell'operazione è necessario comunque mantenere abbastanza separazione tra le parti in quanto il calore generato o il legante depositato possono causare deformazioni della parte.

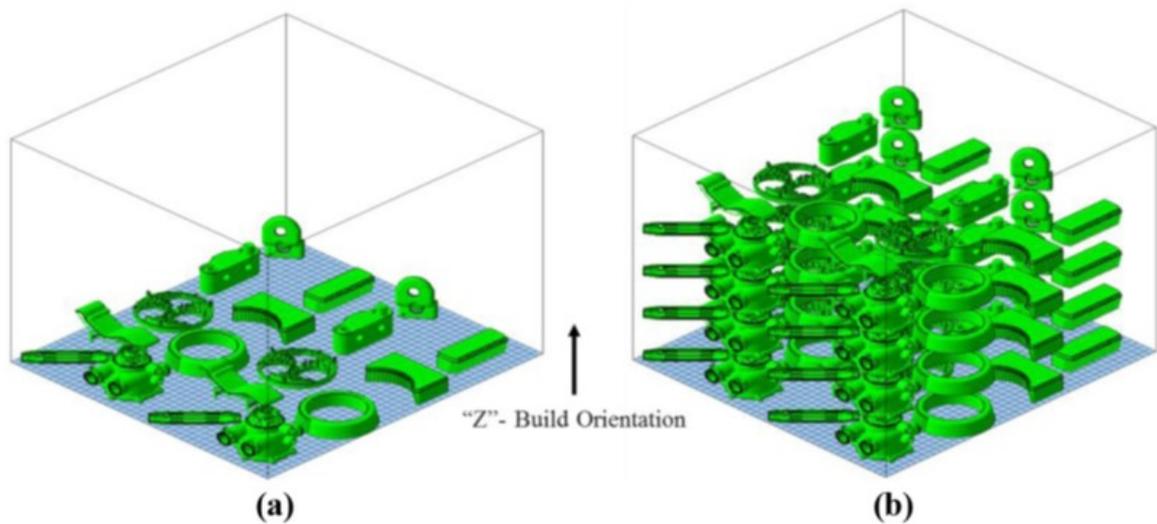


Figura 2.23 Inserimento di parti nella camera di stampa in uno strato (a) e in più strati (b)

Per migliorare l'utilizzo della macchina e diminuire il costo di produzione è meglio inserire il maggior numero di parti possibile nell'involucro di costruzione della macchina AM. In alcuni casi questo è realizzato posizionando tutte le parti manualmente ma eseguire manualmente questo posizionamento richiede tempo e diventa sempre più complicato quando si posiziona un grande lotto di parti o parti con geometrie molto complesse.

Il primo problema ad essere ottimizzato è quello della disposizione a singolo strato delle parti in quanto è la base per qualsiasi imballaggio. Viene sottolineato che, se le parti fossero imballate in più strati con strutture di supporto intermedie tra gli strati, la qualità della produzione non sarebbe garantita a causa del danneggiamento delle superfici a contatto con le strutture di supporto. Si noteranno deformazioni causate dagli effetti della gravità e dalla diffusione del calore e inoltre la complessa rimozione delle strutture di supporto comporterà un costo maggiore per le fasi di post-processing.

Intuitivamente il problema del posizionamento dei componenti può essere visto come un problema bidimensionale. Tuttavia, i modelli che dovranno essere posizionati sono modelli CAD 3D che possono traslare e ruotare in tutto lo spazio 3D. Questo porta ad affermare che i gradi di libertà dei modelli da posizionare sono sei, come mostrato in Figura 2.24, sebbene la traslazione lungo la direzione negativa dell'asse di costruzione in una macchina AM non sia consentito.

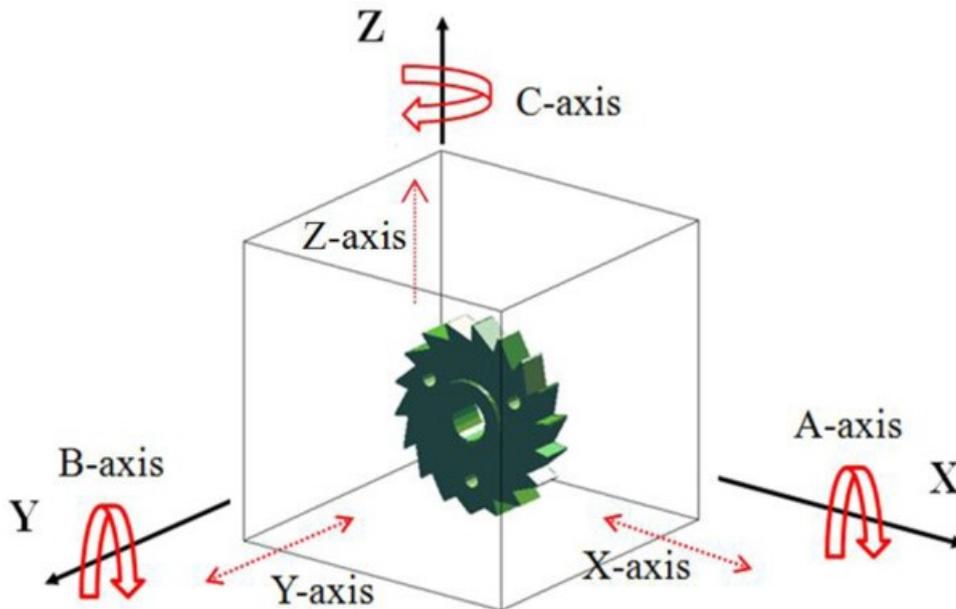


Figura 2.24 Gradi di libertà di un modello CAD 3D all'interno della camera di stampa

La traslazione di un modello CAD 3D lungo l'asse di costruzione di solito è insignificante e causerebbe costi aggiuntivi o addirittura problemi relativi alla qualità, poiché sono necessarie strutture di supporto per sostenere la base del modello. Pertanto, un modello CAD 3D ha in realtà cinque gradi di libertà effettivi, tre rotazioni e due traslazioni lungo gli assi x e y. Perciò per il problema di posizionamento delle parti di un lotto sono necessari cinque parametri per descrivere completamente posizione e orientamento di ogni singola parte.

La pianificazione del layout dello spazio di lavoro in AM dovrebbe seguire due regole principali: ottenere un'elevata compattezza per migliorare l'utilizzo della macchina e ottenere una combinazione ottimale di orientamenti di costruzione delle parti che può garantire elevata qualità delle parti stampate. Pertanto, un buon metodo di posizionamento dovrebbe essere in grado sia di ottenere un'elevata compattezza delle parti sia di scegliere l'orientamento di costruzione ottimale per ogni parte.

Come riportato in [20] quando in uno stesso lotto si ha la presenza di parti identiche è necessario tenere in considerazione che l'orientamento di stampa influisce su molti fattori, argomento ampiamente discusso in questo elaborato. Perciò, se due o più parti identiche sono stampate in diversi orientamenti, ci si può aspettare che ciascuna parte mostri diverse qualità superficiali, precisioni dimensionali e proprietà meccaniche. Questo è di particolare interesse negli ambiti in cui le parti devono essere sottoposte a un processo di certificazione lungo e costoso per soddisfare rigorosi requisiti come, per esempio, le parti di aeromobili realizzate con tecnologia SLM. Infatti, una modifica del percorso di produzione porta a proprietà della parte diverse per cui la data parte dovrà subire un nuovo processo di certificazione. Probabilmente il costo di nuove certificazioni per ogni diverso orientamento fa aumentare il costo di realizzazione del pezzo e riduce i benefici apportati dalle tecnologie additive. Per limitare questo problema le parti con geometrie identiche è preferibile che siano posizionate tutte negli stessi orientamenti di costruzione.

2.6 Ulteriori criteri considerabili

Potrebbero essere considerati altri due ulteriori criteri per la scelta dell'orientamento ottimale.

Il primo criterio è relativo alla presenza di supporti con accessibilità limitata. Questo criterio è molto interessante in quanto permette di valutare direttamente se i supporti utilizzati nelle parti sono effettivamente rimovibili con le tecniche utilizzate nelle fasi di post processing. Le principali tecniche utilizzate sono:

- Rimozioni manuale
- Asportazione di truciolo
- Scioglimento
- Waterjet
- Trattamenti elettrochimici

Nel caso si utilizzino supporti solubili o si utilizzi un attacco elettrochimico si ha la necessità di valutare che i supporti vengano in contatto con la soluzione utilizzata per il processo mentre negli altri casi per valutare se i supporti sono effettivamente rimovibili è necessario valutare la dimensione degli utensili utilizzati e verificare l'effettiva accessibilità. Nella Figura 2.25 è riportata la rappresentazione di una parte con supporti difficilmente rimovibili.

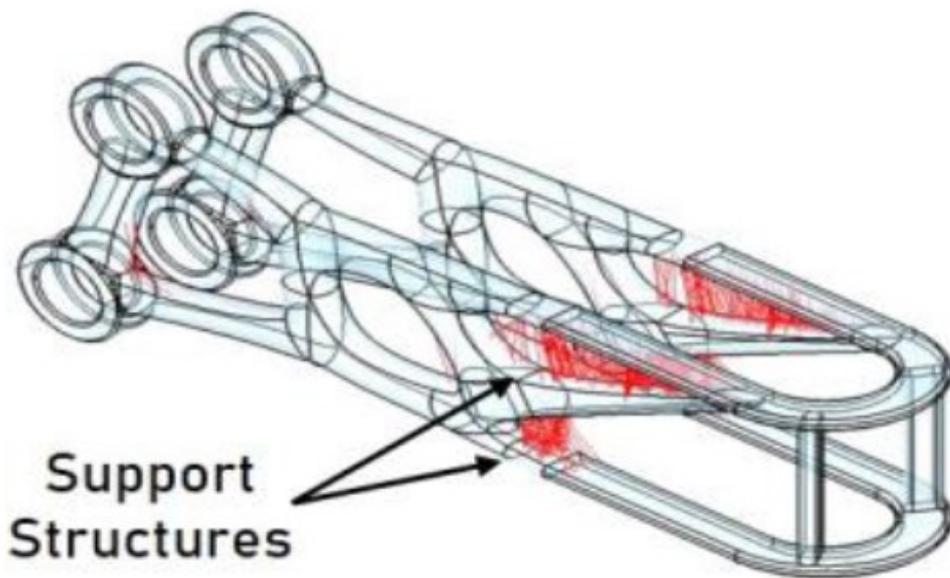


Figura 2.25 Presenza di supporti di difficile rimozione

Il secondo criterio di particolare interesse riguarda la presenza di superfici di riferimento. Queste superfici dovrebbero essere posizionate con direzione verticale per evitare che subiscano deformazioni e siano realizzate in maniera opportuna. Potrebbe essere comunque necessario un'ulteriore lavorazione nella fase di post processing per ottenere le tolleranze richieste e quindi in questo caso prevedere la presenza di materiale aggiuntivo.

3 Metodo

Il metodo sviluppato per l'ottimizzazione della direzione di stampa in processi additivi viene presentato nel seguente capitolo. È diviso in diverse fasi, presentate nei seguenti sottocapitoli, in Figura 3.1 sono riportati i passaggi fondamentali. I dati inseriti all'interno del metodo vengono calcolati utilizzando il programma Netfabb. Il metodo viene poi implementato utilizzando il programma di calcolo Excel e vengono riportate le tabelle utilizzate nel programma.

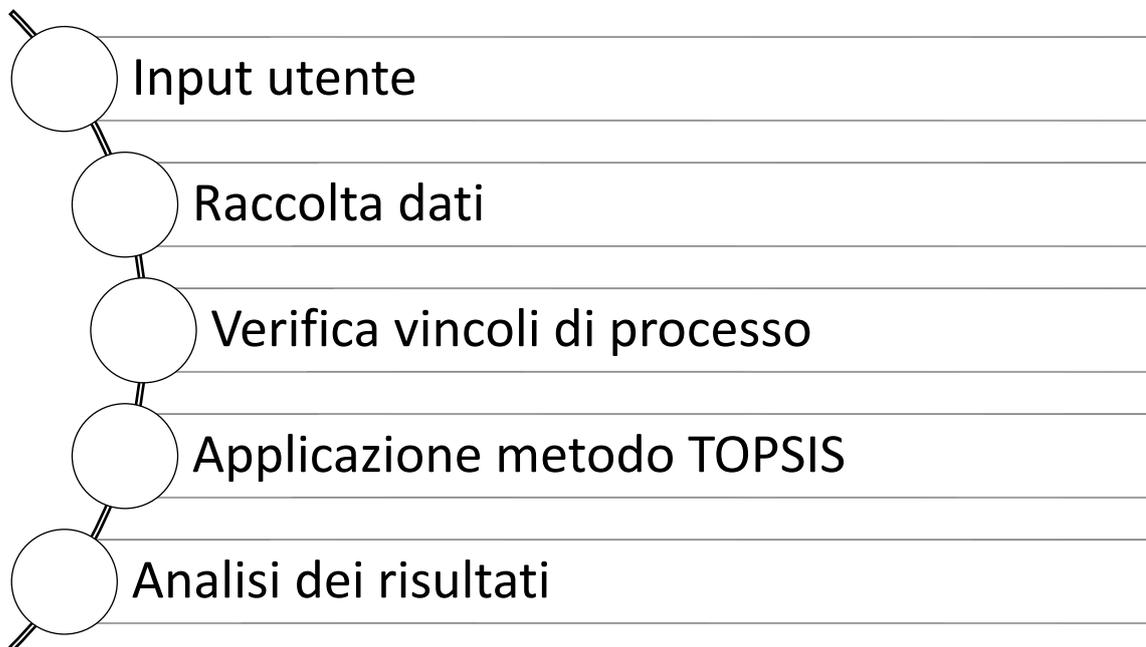


Figura 3.1 Passaggi fondamentali del metodo

3.1 Input utente

Il metodo parte dalle informazioni richieste all'utente, base su cui fare tutte le considerazioni successive. I principali dati richiesti all'utente sono:

- File .stp della parte
- Tecnologia di stampa e stampante utilizzata
- Materiale della parte

- Angolo di accuratezza per il calcolo delle direzioni
- Direzione di applicazione del carico
- Vincoli di processo
- Numero minimo di parte per piatto di stampa
- Preferenze riguardo i pesi da applicare

Il file .stp della parte è necessario in quanto contiene tutte le informazioni riguardanti la geometria della parte da realizzare e sarà utilizzato per calcolare successivamente tutti i valori richiesti all'interno del programma di calcolo.

Altro elemento fondamentale è la scelta della tecnologia di stampa con cui realizzare la parte. La scelta della stampante utilizzata è direttamente collegata al concetto espresso nel capitolo 2.4.3, ovvero è necessario poter realizzare una parte all'interno della camera di stampa. Perciò con la scelta della stampante si identificano in automatico i parametri relativi alle dimensioni del piatto di stampa e all'altezza della camera di stampa.

Altro parametro di elevata importanza è la scelta dell'angolo di accuratezza per il calcolo delle direzioni. Questo parametro è necessario perché, come illustrato in precedenza, i possibili orientamenti di una parte sono infiniti per cui permette di limitare lo studio a un numero finito di alternative. L'angolo con cui viene valutata l'accuratezza può essere anche elevato, ottenendo una bassa precisione; una volta identificate le direzioni ottimali è possibile applicare una seconda volta il metodo andando a studiare gli intorni delle direzioni ottimali trovate con un'accuratezza angolare più bassa.

La direzione di applicazione del carico viene utilizzata per fornire all'utente un'indicazione riguardo l'anisotropia che si manifesterà nelle parti realizzate con diversi orientamenti. Tale parametro serve per guidare la scelta in base alle eventuali necessità di resistenza meccanica in una determinata direzione. Nel metodo vengono utilizzate delle valutazioni per indicare se la parte sarà realizzata con una direzione ottimale per resistere al carico applicato. La valutazione viene valutata in tre gradi: migliore, peggiore e intermedia.

I vincoli di processo sono necessari per permettere al metodo di non considerare come ottimali quelle direzioni di stampa che non soddisfano alcuni vincoli. I principali vincoli di processo utilizzati sono:

- Larghezza del piatto di stampa
- Lunghezza del piatto di stampa
- Altezza volume di stampa
- Tempo di produzione
- Costo di produzione

Larghezza e lunghezza del piatto di stampa sono determinati una volta scelta la stampante utilizzata per il processo, così come l'altezza del volume di stampa. Gli altri due vincoli utilizzati permettono all'utente di inserire valori target entro cui valutare le direzioni ottimali. Questo è di particolare interesse nel caso in cui l'utente abbia richieste particolari come, ad esempio, la necessità di realizzare una parte in breve tempo oppure la creazione un prototipo con il minimo costo possibile.

Il numero minimo di parti per piatto di stampa è il parametro che permette di valutare la stampa di un lotto di parti. Impostando il valore minimo di parti l'utente richiede al metodo di proporre solo quelle soluzioni che permettono di ottenere un numero di parti maggiore di quello impostato. Il valore del numero di parti per piatto di stampa viene valutato dividendo l'area del piatto di stampa per l'area proiettata di ogni singolo orientamento. Se il valore è minore rispetto al valore minimo accettabile impostato dall'utente allora l'orientamento non è considerato ottimale.

Le preferenze riguardo i pesi da applicare vengono espresse dall'utente attraverso quattro macroaree, sono: rapidità, economicità, produttività e resistenza meccanica. L'utente esprime una valutazione da zero a dieci per ogni area e in questo modo vengono automaticamente identificati i pesi da applicare al metodo. Le macroaree sono state identificate in quanto facilmente valutabili anche da un utente con poca esperienza.

3.2 Raccolta dati

La prima fase del metodo consiste nella raccolta dei dati relativi ad ogni orientamento analizzato. Questo è realizzato mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo, viene riportata in Tabella 3.1 la tabella utilizzata per la raccolta dei dati.

Criterio	Tempo totale	Costo totale	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Volume ingombro	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura	ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ³	%	

Tabella 3.1 Tabella per raccolta dati utilizzata nel metodo

Come è possibile notare in Tabella 3.1 vengono raccolti dati relativi a:

- Costo totale del processo
- Tempo totale del processo
- Larghezza e lunghezza sul piatto di stampa
- Altezza dei diversi orientamenti del pezzo
- Area delle superfici overhang
- Area proiettata nel piatto di stampa
- Volume di ingombro
- Densità di impacchettamento o Packing density
- Resistenza Meccanica

3.3 Verifica dei vincoli di processo

Il metodo procede andando ad analizzare i dati inseriti. In particolare, nella seconda fase i dati relativi ad ogni orientamento vengono paragonati a dei vincoli di processo. Come citato ampiamente nei capitoli precedenti i vincoli di processo sono quelli relativi alle dimensioni della stampante utilizzata e quelli relativi ai valori target, inseriti dall'utente nella fase di input, ai costi e ai tempi del processo.

Il metodo, quindi, valuta se i valori relativi ad ogni orientamento sono compresi all'interno del range accettabile. Se il risultato di questo confronto dà esito positivo nel file di calcolo viene riportata la valutazione 'OK', mentre in caso di esito negativo viene riportata la valutazione 'KO'. Gli orientamenti che ottengono valutazione positiva in tutti i confronti sono considerati ancora validi per le fasi successive, mentre, se nella valutazione degli orientamenti anche solo una valutazione è negativa, allora l'orientamento in questione viene escluso dai possibili orientamenti ottimali.

In Tabella 3.2 viene riportata la rappresentazione di un esempio che permette di visualizzare ciò che l'utente vede al termine del processo di valutazione.

			Criterio	Tempo totale	Costo totale	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza		
			Unità di misura	ore	EUR	mm	mm	mm		
			Parametro di input collegato	Target tempo di produzione	Target costo di produzione	Target larghezza piatto	Target lunghezza piatto	Target altezza volume di stampa	Valutazione	
x	y	z								
0	0	0	KO	OK	KO	OK	OK	OK	KO	
90	0	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
180	0	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
0	90	0	OK	KO	KO	KO	OK	OK	KO	

Tabella 3.2 Esempio verifica vincoli di processo

3.4 Applicazione metodo TOPSIS

La terza fase del metodo è la più importante poiché permette l'effettiva valutazione della direzione ottimale di stampa. Data la complessità della ricerca viene utilizzato un metodo di scelta multicriterio per individuare la soluzione ottimale tra quelle proposte. Il metodo scelto tra quelli disponibili è il TOPSIS, acronimo di Technique for the order of Preference by Similarity to Ideal Solution. Come suggerisce l'acronimo il metodo propone come ottimale l'alternativa che risulta avere distanza geometrica minore rispetto alla soluzione ideale positiva e distanza geometrica maggiore rispetto alla soluzione ideale negativa. Le due soluzioni ideali, positiva e negativa, sono individuate analizzando i dati posti all'interno della matrice.

Il metodo TOPSIS è uno dei metodi di scelta multicriterio, quindi destinato ad essere utilizzato come strumento dall'utente per raggiungere una decisione. Pertanto, l'utente deve comprendere i risultati, comprese eventuali limitazioni significative dell'analisi, e utilizzare i risultati, in misura maggiore o minore, per supportarli nel raggiungimento della sua decisione.

TOPSIS è stato scelto perché non necessita di input esterni da parte dell'utente in quanto i pesi utilizzati all'interno del metodo sono inseriti automaticamente una volta selezionata la tecnologia di stampa nella fase di input.

I dati raccolti nel primo step vengono inseriti all'interno di una matrice come quella riportata in Tabella 3.1. Successivamente si procede alla normalizzazione di tutti i vettori colonna: ciò è realizzato valutando prima il modulo delle singole colonne utilizzando la formula riportata in Eq. 3.1 e successivamente ogni coefficiente della colonna viene diviso per il modulo, come riportato in Eq. 3.2

Eq. 3.1
$$\text{modulo colonna } j = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}$$

Eq. 3.2
$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}$$

In Eq. 3.1 n indica il numero delle righe della colonna, a_{ij} il coefficiente relativo alla riga i -esima e alla colonna j -esima della matrice, mentre la sommatoria $\sum_{i=1}^n a_{ij}^2$ indica che ogni coefficiente della colonna j -esima viene elevato al quadrato e poi sommato a tutti gli altri n coefficienti appartenenti tutti alla stessa colonna j -esima. Nella Tabella 3.3 è riportato un esempio generico della normalizzazione di una matrice.

Matrice raccolta dati				
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Orientamento 1	9	90	45	5
Orientamento 2	6	56	65	7
Orientamento 3	5	78	85	2
Orientamento 4	3	85	57	9
Orientamento 5	9	56	26	4

Matrice normalizzata				
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Orientamento 1	0,59	0,54	0,34	0,38
Orientamento 2	0,39	0,34	0,49	0,53
Orientamento 3	0,33	0,47	0,64	0,15
Orientamento 4	0,20	0,51	0,43	0,68
Orientamento 5	0,59	0,34	0,20	0,30

Modulo colonna	15,23	166,38	131,91	13,23
----------------	-------	--------	--------	-------

Tabella 3.3 Esempio normalizzazione di una matrice

Una volta ottenuta la matrice con tutte le colonne normalizzate si procede alla moltiplicazione di ogni coefficiente normalizzato con il peso assegnato ad ogni criterio, ottenendo in questo modo una nuova matrice detta matrice pesata. L'Eq. 3.3 riporta questo passaggio. In cui b_{ij} è il valore normalizzato del coefficiente i -esimo della colonna j -esima, p_k è il peso del criterio k -esimo mentre c_{ij} è il valore del coefficiente della matrice pesata. Nella Tabella 3.4 viene riportato un esempio in cui è possibile notare il passaggio dalla matrice normalizzata a quella pesata.

Eq. 3.3

$$c_{ij} = b_{ij} \cdot p_k$$

Matrice pesata				
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Orientamento 1	0,59	0,54	0,34	0,38
Orientamento 2	0,39	0,34	0,49	0,53
Orientamento 3	0,33	0,47	0,64	0,15
Orientamento 4	0,20	0,51	0,43	0,68
Orientamento 5	0,59	0,34	0,20	0,30

Matrice pesata				
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Orientamento 1	0,24	0,08	0,12	0,04
Orientamento 2	0,16	0,05	0,17	0,05
Orientamento 3	0,13	0,07	0,23	0,02
Orientamento 4	0,08	0,08	0,15	0,07
Orientamento 5	0,24	0,05	0,07	0,03

Peso	0,4	0,15	0,35	0,1
------	-----	------	------	-----

Tabella 3.4 Esempio creazione matrice pesata

Dalla matrice pesata vengono individuate le soluzioni ideali. Per la soluzione ideale positiva vengono selezionati tutti i valori ottimali di ogni criterio, mentre per la soluzione ideale negativa vengono scelti i valori peggiori. Per facilitare la scelta viene individuato l'obiettivo di ogni criterio. I criteri, infatti, possono essere massimizzati o minimizzati. I criteri massimizzati forniranno il loro valore massimo alla soluzione ideale positiva e il loro valore minimo alla soluzione ideale negativa. Avverrà invece il contrario nei criteri da minimizzare, che forniranno il loro valore minore alla soluzione ideale positiva e il valore massimo alla soluzione ideale negativa. Viene riportato in Tabella 3.5 un esempio in cui vengono identificate le soluzioni ideali positiva e negativa partendo dalla matrice pesata.

	Matrice pesata			
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Orientamento 1	0,24	0,08	0,12	0,04
Orientamento 2	0,16	0,05	0,17	0,05
Orientamento 3	0,13	0,07	0,23	0,02
Orientamento 4	0,08	0,08	0,15	0,07
Orientamento 5	0,24	0,05	0,07	0,03
Obiettivo	Massimizzare	Massimizzare	Minimizzare	Massimizzare
Soluzione ideale positiva	0,24	0,08	0,07	0,07
Soluzione ideale negativa	0,08	0,05	0,23	0,02

Tabella 3.5 Esempio identificazione soluzione ideale positiva e negativa

Individuate le soluzioni ideali vengono create due ulteriori matrici in cui viene valutata la differenza tra i singoli coefficienti della matrice e i valori delle soluzioni ideali. La Eq. 3.4 indicano l'equazione utilizzata per valutare le differenze con la soluzione ideale positiva mentre la Eq. 3.5 indica l'equazione utilizzata per valutare le differenze con la soluzione ideale negativa. Nelle due equazioni c_{ij} indica il valore pesato della matrice, s_{ij}^+ e s_{ij}^- indicano rispettivamente i coefficienti delle soluzioni ideali positiva e negativa mentre d_{ij}^+ e d_{ij}^- indicano le differenze calcolate nelle singole celle delle due matrici.

Eq. 3.4 $d_{ij}^+ = (c_{ij} - s_{ij}^+)^2$

Eq. 3.5

$$d_{ij}^- = (c_{ij} - s_{ij}^-)^2$$

Viene successivamente calcolata la distanza geometrica di ogni alternativa dalla direzione ideale positiva e negativa. Per fare ciò viene ricavata la radice quadrata della sommatoria dei coefficienti delle righe delle due matrici precedentemente calcolate, come riportato nelle equazioni Eq. 3.6 ed Eq. 3.7. Il termine S_i^+ indica la distanza geometrica dalla soluzione ideale positiva della riga i-esima corrispondente alla alternativa i-esima, mentre, S_i^- indica la distanza geometrica dalla soluzione ideale negativa della riga i-esima corrispondente alla alternativa i-esima.

Eq. 3.6

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^+}$$

Eq. 3.7

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^-}$$

Nella Tabella 3.6 viene riportata la matrice relativa alle distanze geometriche dalla soluzione ideale positiva mentre nella Tabella 3.7 viene riportata la matrice relativa alle distanze geometriche dalla soluzione ideale negativa.

Matrice pesata				
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Orientamento 1	0,24	0,08	0,12	0,04
Orientamento 2	0,16	0,05	0,17	0,05
Orientamento 3	0,13	0,07	0,23	0,02
Orientamento 4	0,08	0,08	0,15	0,07
Orientamento 5	0,24	0,05	0,07	0,03

Soluzione ideale positiva					
	0,24	0,08	0,07	0,07	
Matrice distanza da soluzione ideale positiva					
	S_i^+				
Orientamento 1	0	0	0,002542	0,000914	0,05878613
Orientamento 2	0,006207	0,000940	0,010708	0,000229	0,13447413
Orientamento 3	0,011034	0,000117	0,024507	0,002800	0,19610857
Orientamento 4	0,024828	0,000020	0,006766	0	0,17780205
Orientamento 5	0	0,000940	0	0,001429	0,04866421

Tabella 3.6 Esempio realizzazione matrice distanza da soluzione ideale positiva

Matrice pesata				
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Orientamento 1	0,24	0,08	0,12	0,04
Orientamento 2	0,16	0,05	0,17	0,05
Orientamento 3	0,13	0,07	0,23	0,02
Orientamento 4	0,08	0,08	0,15	0,07
Orientamento 5	0,24	0,05	0,07	0,03

Soluzione ideale negativa					
	0,08	0,05	0,23	0,02	
Matrice distanza da soluzione ideale negativa					
	S_i^-				
Orientamento 1	0	0	0,011264	0,000514	0,19376758
Orientamento 2	0,006207	0,000000	0,002816	0,001429	0,10223287
Orientamento 3	0,002759	0,000393	0,000000	0,000000	0,05614295
Orientamento 4	0,000000	0,000684	0,005520	0	0,09488483
Orientamento 5	0	0,000000	0	0,000229	0,22262794

Tabella 3.7 Esempio realizzazione matrice distanza da soluzione ideale negativa

Dopo aver calcolato le distanze geometriche dalle due soluzioni ideali, per valutare l'alternativa ottimale tra quelle disponibili si utilizza l'equazione riportata in Eq. 3.8. L'alternativa ottimale è quella che ottiene un punteggio maggiore di V_i indicato come valutazione della alternativa i -esima.

Eq. 3.8

$$V_i = \frac{s_i^-}{s_i^+ + s_i^-}$$

Viene infine riportato in Tabella 3.8 la valutazione finale dell'esempio utilizzato per illustrare l'applicazione del metodo TOPSIS.

	s_i^+	s_i^-	Risultato	Valutazione
Orientamento 1	0,05878613	0,19376758	0,767233	
Orientamento 2	0,13447413	0,10223287	0,431896	
Orientamento 3	0,19610857	0,05614295	0,222567	
Orientamento 4	0,17780205	0,09488483	0,347963	
Orientamento 5	0,04866421	0,22262794	0,820621	Soluzione ottimale

Tabella 3.8 Esempio risultati finali

Si ricorda che gli orientamenti che non soddisfano i vincoli di processo sono esclusi dalla valutazione. Nel metodo proposto agli orientamenti esclusi viene attribuita una valutazione di 0.

3.5 Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati è la fase finale del metodo proposto. In questa fase l'utente visualizzerà su una apposita tabella, come quella riportata in Tabella 3.9, i risultati ottenuti dopo l'applicazione del metodo TOPSIS. In Tabella 3.9 viene riportato un caso di esempio che permette di capire ciò che effettivamente vedrà l'utente dopo l'analisi.

I risultati, come già indicato in precedenza, devono comunque essere analizzati dall'utente ed eventualmente potrebbe rendersi necessario un ulteriore studio di dettaglio per valutare se vi sono direzioni di particolare interesse all'interno degli intervalli ottenuti con l'ampiezza angolare impostata inizialmente.

Infatti, se l'ampiezza angolare fosse elevata, potrebbero essere escluse dallo studio le effettive direzioni ottimali e quindi uno studio accurato nell'intorno delle soluzioni ottimali ottenute dopo la prima applicazione del metodo può portare all'individuazione di nuovi orientamenti che potrebbero ottenere valutazioni migliori rispetto agli orientamenti inizialmente calcolati. L'utente, perciò, se ritiene necessaria una ulteriore analisi, può effettuare un nuovo studio con ampiezza angolare più piccola.

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,608	
90	0	0	0,678	Soluzione ottimale
180	0	0	0,000	KO
0	90	0	0,608	
0	180	0	0,608	
0	0	90	0,608	
0	0	180	0,608	
45	45	45	0,650	
45	45	135	0,650	
45	135	45	0,580	
135	45	45	0,658	
45	135	135	0,580	
135	45	135	0,658	
135	135	45	0,657	
135	135	135	0,657	

Tabella 3.9 Esempio tabella analisi direzioni

4 Caso studio

I casi di studio utilizzati per verificare e validare il metodo sono rappresentati da tre parti che verranno analizzate utilizzando quattro tecnologie di stampa e quattro materiali diversi. In particolare, le tecnologie e i materiali utilizzati per valutare gli orientamenti ottimali delle tre parti sono Selective Laser Melting SLM abbinata al materiale Inconel 718, Direct Energy Deposition DED abbinata al materiale AISI 316, Selective Laser Sintering SLS abbinata al materiale poliammide e Fused Deposition Modeling abbinata al materiale ABS.

Vengono ipotizzati due principali scenari. Il primo scenario è il caso in cui si preferisca la rapidità del processo rispetto agli altri criteri e il secondo scenario è il caso in cui si preferisca ottenere una parte con caratteristiche meccaniche ottimali. Nel capitolo inerenti i risultati vengono riportati i pesi utilizzati nei singoli casi di studio.

Le parti sono riconosciute in base al loro codice parte. La parte con codice 1 v1 è rappresentata in Figura 4.1 con la lettera a, la parte con codice 2 v2 è rappresentata con la lettera b mentre la parte con codice Penta valve v14 è rappresentata con la lettera c.

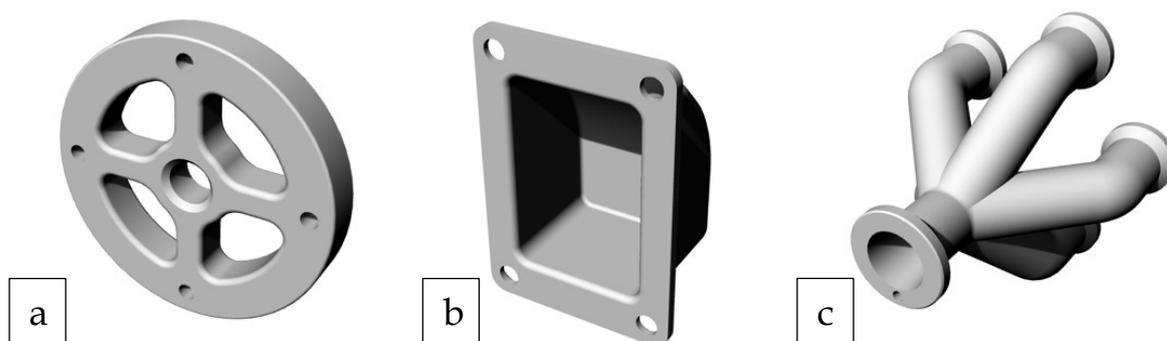


Figura 4.1 Vista assonometrica dei casi di studio: a) parte con codice 1 v1, b) parte con codice 2 v2, c) parte con codice Penta valve v14

In Tabella 4.1 vengono riportati l'elenco di tutti i codici parte e i dati di tutti i casi di studio, compresi tecnologie di stampa e materiali utilizzati. Viene anche riportato il volume della parte: dato che risulta utile per ottenere una stima delle dimensioni delle singole parti. Come è possibile notare dalla Tabella 4.1 i casi di studio analizzati sono dodici e verranno analizzati con i due scenari presentati pocanzi.

Codice parte	Tecnologia di stampa utilizzata	Materiale	Volume parte mm ³	Overhang Angle
1 v1	SLM	Inconel 718	78685,936	30°
1 v1	DED	AISI 316		Supporti assenti
1 v1	SLS	Poliammide PA		Supporti assenti
1 v1	FDM	ABS		40°
2 v2	SLM	Inconel 718	127038,229	30°
2 v2	DEM	AISI 316		Supporti assenti
2 v2	SLS	Poliammide PA		Supporti assenti
2 v2	FDM	ABS		40°
Penta valve v14	SLM	Inconel 718	4107,059	30°
Penta valve v14	DEM	AISI 316		Supporti assenti
Penta valve v14	SLS	Poliammide PA		Supporti assenti
Penta valve v14	FDM	ABS		40°

Tabella 4.1 Elenco dei casi di studio

Per quanto riguarda la valutazione della resistenza meccanica vengono ipotizzate forze e coppie applicati ad ogni caso di studio. In particolare, il caso di studio con codice parte 1 v1 è sottoposto ad una coppia con asse parallelo a quello della parte come riportato in Figura 4.2 con la lettera a. Il caso di studio con codice parte 2 v2 è sottoposto ad una forza che spinge contro la sua parete interna come mostrato in Figura 4.2 con la lettera b. Infine, il caso di studio con codice parte Penta valve v14 è soggetto ad una forza parallela al suo asse come mostrato in Figura 4.2 con la lettera c.

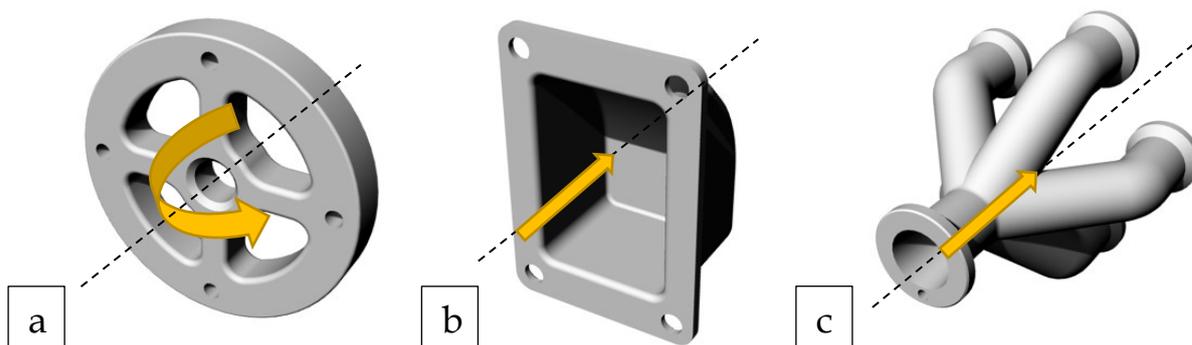


Figura 4.2 Forze e coppie applicate ai casi di studio: a) caso di studio 1 v1, b) caso di studio 2 v2, c) caso di studio Penta valve v14

Vengono riportati nella Tabella 4.2 i vincoli di processo utilizzati nei casi di studio per le tecnologie di stampa SLM, DED, SLS e FDM.

SLM		
Vincoli di processo	Valore minimo	Valore massimo
Tempo di produzione	0	60 ore
Costo di produzione	0	5500 EUR
Larghezza piatto (dimensione minore)	0	250 mm
Lunghezza piatto (dimensione maggiore)	0	250 mm
Altezza volume di stampa	0	325 mm

DED		
Vincoli di processo	Valore minimo	Valore massimo
Tempo di produzione	0	4 ore
Costo di produzione	0	350 EUR
Larghezza piatto (dimensione minore)	0	400 mm
Lunghezza piatto (dimensione maggiore)	0	600 mm
Altezza volume di stampa	0	400 mm

SLS		
Vincoli di processo	Valore minimo	Valore massimo
Tempo di produzione	0	9 ore
Costo di produzione	0	25 EUR
Larghezza piatto (dimensione minore)	0	340 mm
Lunghezza piatto (dimensione maggiore)	0	340 mm
Altezza volume di stampa	0	620 mm

FDM		
Vincoli di processo	Valore minimo	Valore massimo
Tempo di produzione	0	20 ore
Costo di produzione	0	35 EUR
Larghezza piatto (dimensione minore)	0	300 mm
Lunghezza piatto (dimensione maggiore)	0	300 mm
Altezza volume di stampa	0	300 mm

Tabella 4.2 Vincoli di processo utilizzati nel metodo

5 Risultati e discussione

Nel presente capitolo vengono riportati i risultati ottenuti applicando il metodo ai casi di studio presentati nel capitolo precedente.

Come precedentemente riportato i casi di studio vengono applicati a due scenari: uno in cui si preferisce la rapidità e l'altro dove viene favorita la resistenza meccanica. I pesi utilizzati in questi due scenari sono riportati in Tabella 5.1. Nella Figura 5.1 viene riportato un grafico radar che permette di visualizzare i valori a confronti dei pesi utilizzati nei due scenari.

Caso rapidità elevata	Valutazione	Peso
Rapidità	6	0,60
Economicità	2	0,20
Produttività	1	0,10
Resistenza meccanica	1	0,10

Caso resistenza elevata	Valutazione	Peso
Rapidità	1,33	0,13
Economicità	1,33	0,13
Produttività	1,33	0,13
Resistenza meccanica	6	0,60

Tabella 5.1 Valore dei pesi utilizzati nel metodo applicato ai casi di studio

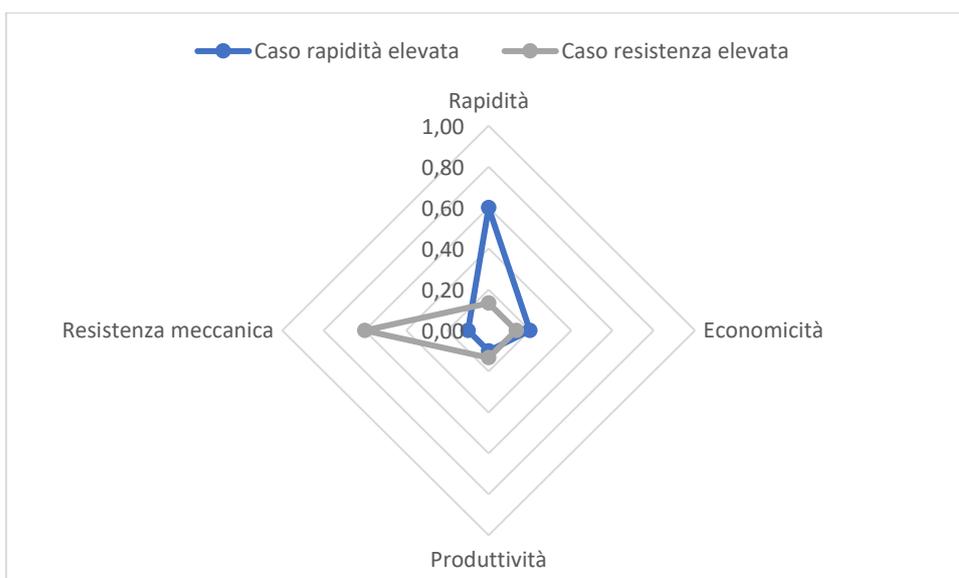


Figura 5.1 Grafico radar dei pesi utilizzati nei casi di studio

Come è possibile notare dalla Tabella 5.1 i criteri utilizzati sono in numero inferiore rispetto a quelli citati in precedenza. Questo è dovuto alla necessità di utilizzare criteri che non siano dipendenti l'uno dall'altro. I dati raccolti vengono utilizzati per valutare i quattro principali criteri che guideranno la scelta della direzione ottimale di stampa. Per completezza riportiamo i criteri utilizzati nel metodo e i criteri della fase di input ad essi collegati:

- Tempo totale del processo di stampa collegato al criterio di rapidità
- Costo totale del processo di stampa collegato al criterio di economicità
- Packing density collegato al criterio di produttività
- Resistenza meccanica collegato al criterio omonimo di resistenza meccanica.

Come è possibile notare dall'elenco i criteri utilizzati nel metodo sono direttamente collegati ai criteri della fase di input. Infatti, l'utente quando esprime i pesi per ogni criterio precedente identifica direttamente i pesi dei criteri utilizzati nel metodo.

Tempo e costo di stampa dovranno essere minimizzati mentre packing density e resistenza meccanica dovranno essere massimizzati nel metodo TOPSIS.

I dati relativi a ogni criterio sono stati raccolti utilizzando le funzioni di analisi presenti nel software Netfabb. Gli orientamenti sono riferimenti a rotazioni rispetto alla posizione presa come riferimento per ogni caso di studio. Vengono riportate le configurazioni iniziali di tutti i casi di studio. Nella Figura 5.2 è riportata la configurazione di riferimento del caso di studio 1 v1, nella Figura 5.3 è riportata la configurazione di riferimento del caso di studio 2 v2 e nella Figura 5.4 è riportata la configurazione di riferimento del caso di studio Penta valve v14. In ogni rappresentazione l'asse z è l'asse di stampa.

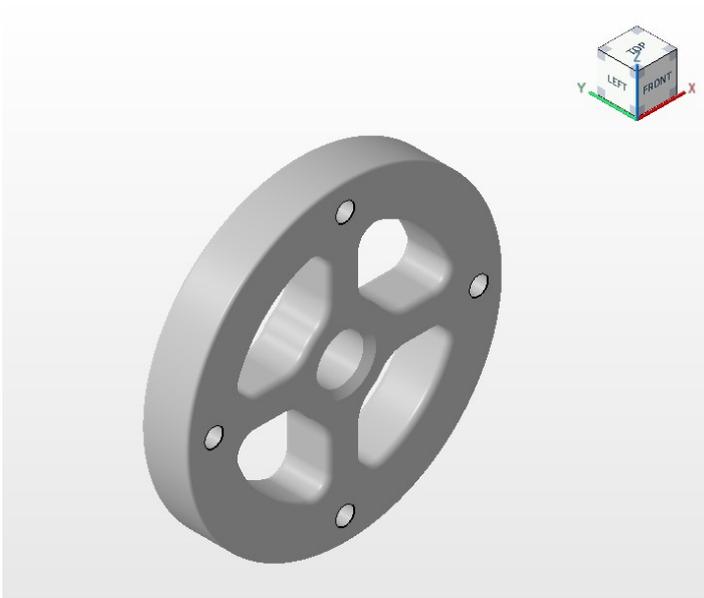


Figura 5.2 Configurazione di riferimento caso di studio 1 v1

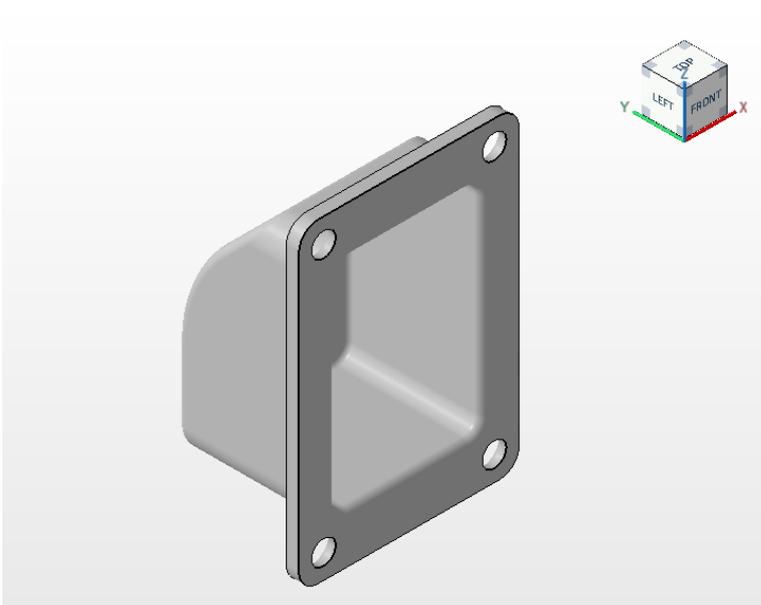


Figura 5.3 Configurazione di riferimento caso di studio 2 v2

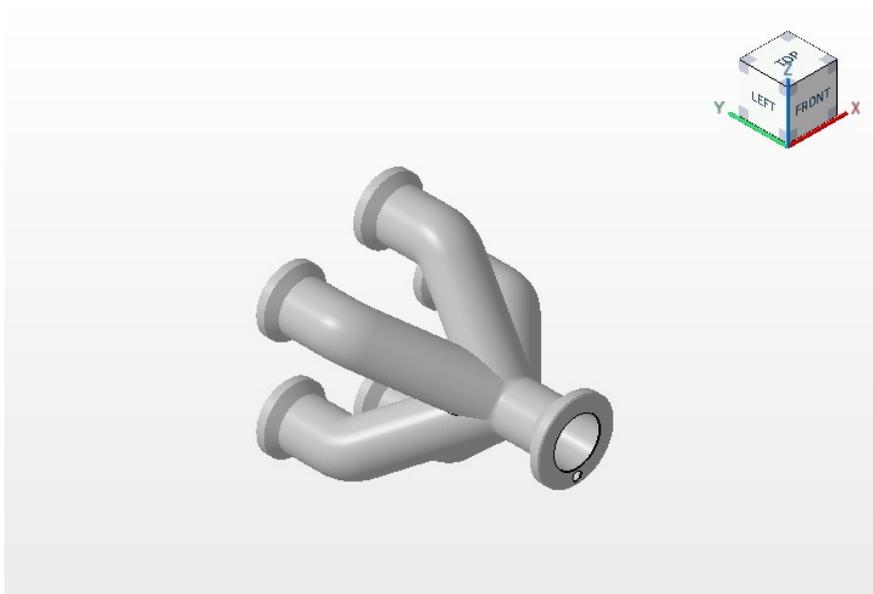


Figura 5.4 Configurazione di riferimento caso di studio Penta valve v14

Per visualizzare tutti gli orientamenti utilizzati per ogni componente vengono riportate nelle seguenti tabelle le rappresentazioni di tutti le direzioni utilizzate.

Viene riportato in Tabella 5.2 l'insieme di tutte le configurazioni possibili per il caso di studio 1 v1, in è riportato l'insieme delle configurazioni possibili per il caso di studio 2 v2 e in Tabella 5.4 è riportato l'insieme delle configurazioni possibili per il caso di studio Penta valve v14.

Orientamento $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$	Orientamento $90^\circ, 0^\circ, 0^\circ$	Orientamento $180^\circ, 0^\circ, 0^\circ$

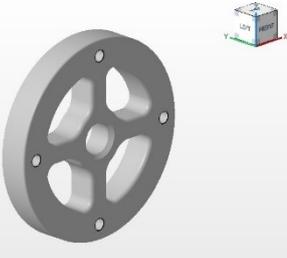
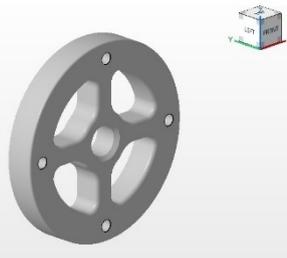
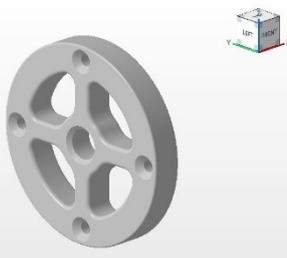
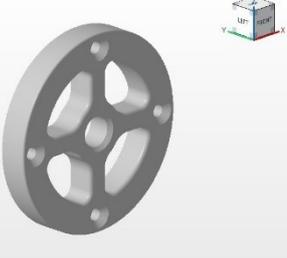
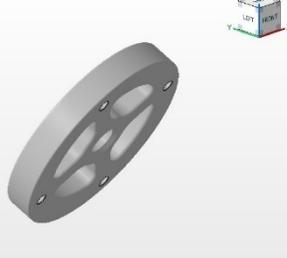
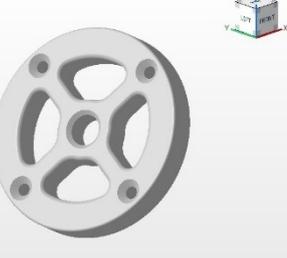
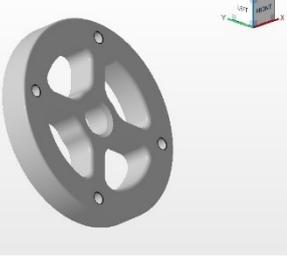
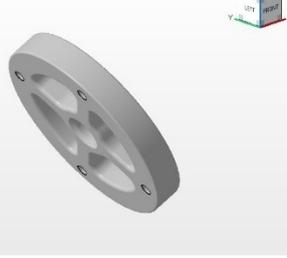
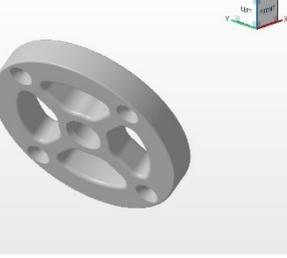
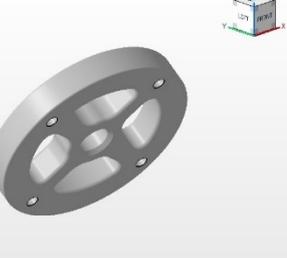
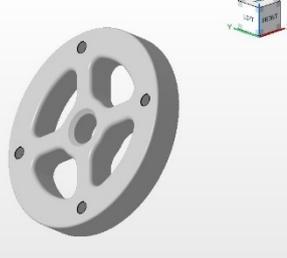
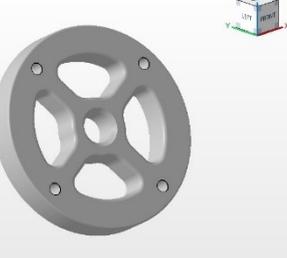
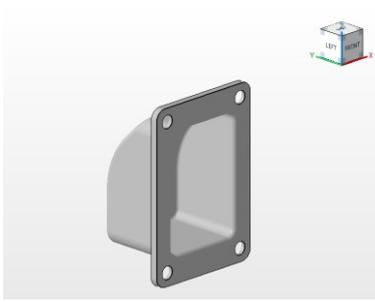
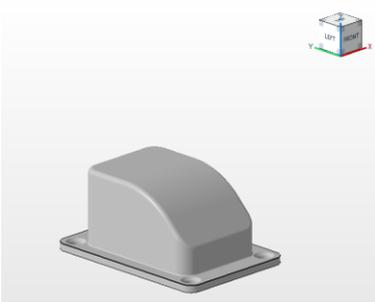
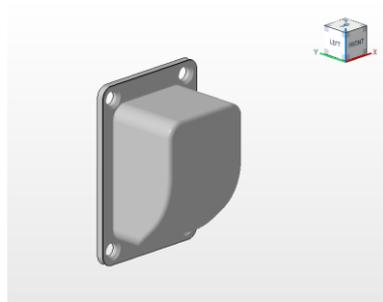
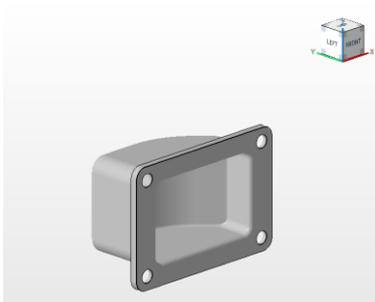
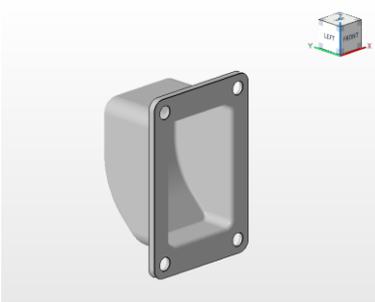
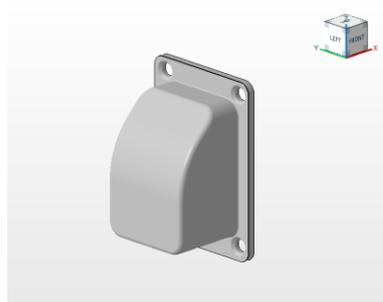
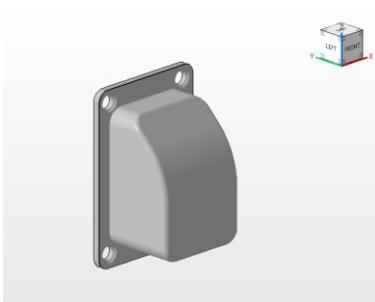
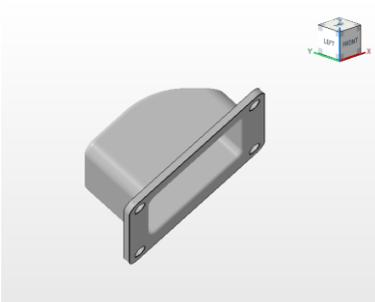
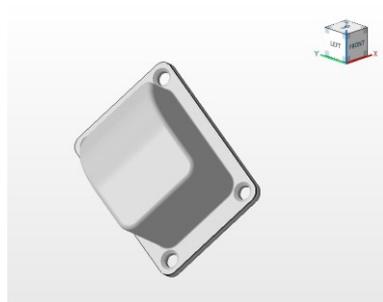
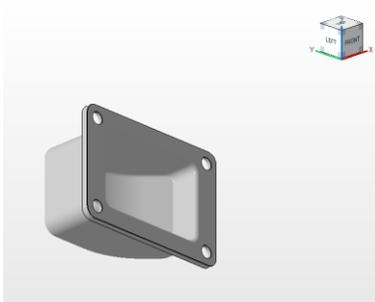
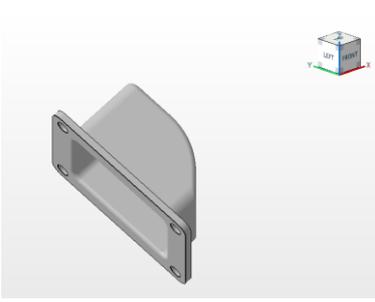
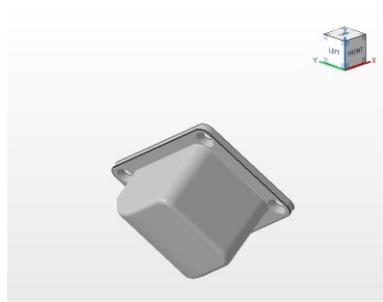
<p>Orientamento $0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$</p> 	<p>Orientamento $0^\circ, 180^\circ, 0^\circ$</p> 	<p>Orientamento $0^\circ, 0^\circ, 90^\circ$</p> 
<p>Orientamento $0^\circ, 0^\circ, 180^\circ$</p> 	<p>Orientamento $45^\circ, 45^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $45^\circ, 45^\circ, 135^\circ$</p> 
<p>Orientamento $45^\circ, 135^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $135^\circ, 45^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $45^\circ, 135^\circ, 135^\circ$</p> 
<p>Orientamento $135^\circ, 45^\circ, 135^\circ$</p> 	<p>Orientamento $135^\circ, 135^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $135^\circ, 135^\circ, 135^\circ$</p> 

Tabella 5.2 Insieme delle configurazioni utilizzate per il caso di studio 1 v1

<p>Orientamento 0°,0°,0°</p> 	<p>Orientamento 90°,0°,0°</p> 	<p>Orientamento 180°,0°,0°</p> 
<p>Orientamento 0°,90°,0°</p> 	<p>Orientamento 0°,180°,0°</p> 	<p>Orientamento 0°,0°,90°</p> 
<p>Orientamento 0°,0°,180°</p> 	<p>Orientamento 45°,45°,45°</p> 	<p>Orientamento 45°,45°,135°</p> 
<p>Orientamento 45°,135°,45°</p> 	<p>Orientamento 135°,45°,45°</p> 	<p>Orientamento 45°,135°,135°</p> 

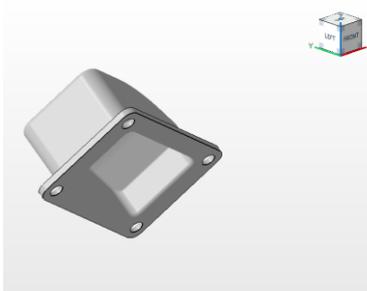
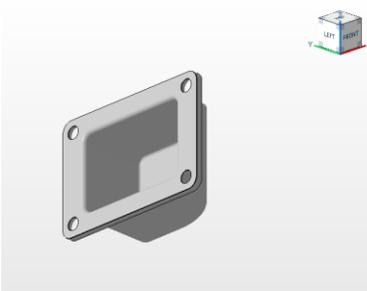
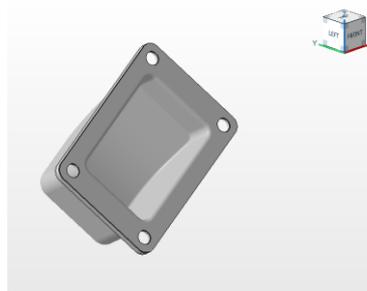
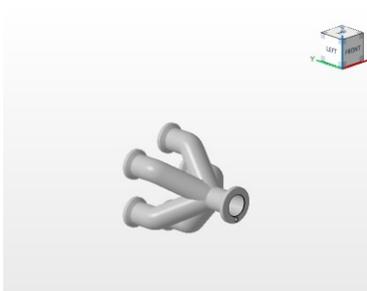
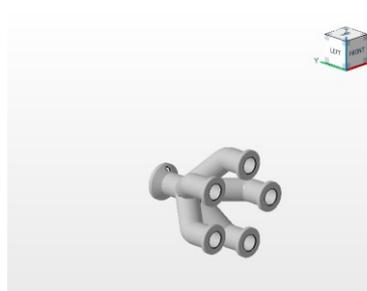
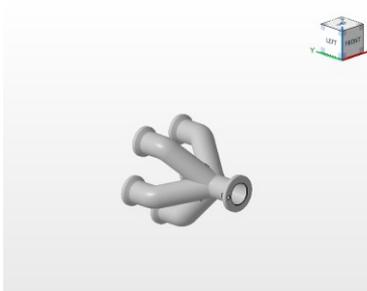
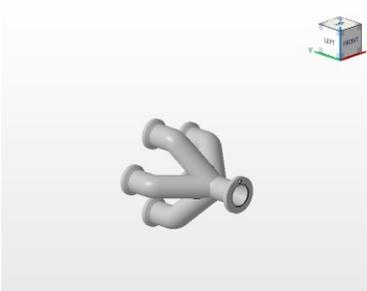
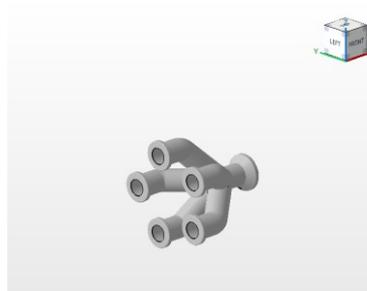
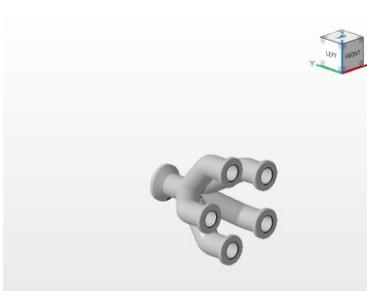
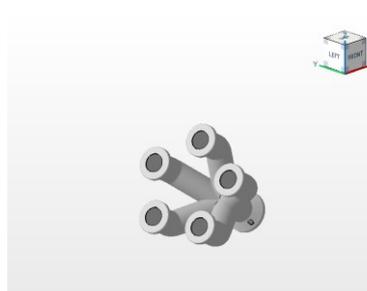
<p>Orientamento 135°,45°,135°</p> 	<p>Orientamento 135°,135°,45°</p> 	<p>Orientamento 135°,135°,135°</p> 
---	--	--

Tabella 5.3 Insieme delle configurazioni utilizzate per il caso di studio 2 v2

<p>Orientamento 0°,0°,0°</p> 	<p>Orientamento 90°,0°,0°</p> 	<p>Orientamento 180°,0°,0°</p> 
<p>Orientamento 0°,90°,0°</p> 	<p>Orientamento 0°,180°,0°</p> 	<p>Orientamento 0°,0°,90°</p> 
<p>Orientamento 0°,0°,180°</p> 	<p>Orientamento 45°,45°,45°</p> 	<p>Orientamento 45°,45°,135°</p> 

<p>Orientamento 45°,135°,45°</p> 	<p>Orientamento 135°,45°,45°</p> 	<p>Orientamento 45°,135°,135°</p> 
<p>Orientamento 135°,45°,135°</p> 	<p>Orientamento 135°,135°,45°</p> 	<p>Orientamento 135°,135°,135°</p> 

Tabella 5.4 Insieme delle configurazioni utilizzate per il caso di studio Penta valve v14

Vengono ora riportati i risultati ottenuti nei casi di studio. Per una migliore comprensione i risultati vengono riportati in due capitoli denominati con l'obiettivo dello scenario a cui fanno riferimento.

5.1 Scenario rapidità elevata

Seguendo i passaggi fondamentali del metodo sviluppato la prima fase è relativa alla raccolta dei dati e alla verifica vincoli di processo. In Tabella 5.5 vengono riportati i dati raccolti per il caso di studio con codice parte 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718. Successivamente in viene riportata Tabella 5.6 la verifica dei vincoli di processo e nella Tabella 5.7 vengono riportati gli input utilizzati per la verifica del caso di studio in questione.

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	44,5	€ 4.707	60	90	130	4771,60	4295,41	558403,30	162074,00	22,750%	10
90	0	0	47,1	€ 3.528	90	130	60	9178,20	11332,00	679920,00	218239,80	18,684%	4
180	0	0	54,6	€ 5.192	60	90	130	4532,00	4295,39	558400,70	249488,90	22,750%	10
0	90	0	57,1	€ 4.568	60	130	90	8732,60	5457,67	491190,30	290686,30	25,863%	4
0	180	0	54,6	€ 5.192	60	90	130	4532,00	4295,41	558403,30	249498,40	22,750%	10
0	0	90	44,5	€ 4.707	60	90	130	4771,60	4295,41	558403,30	162074,00	22,750%	10
0	0	180	44,5	€ 4.707	60	90	130	4771,60	4295,41	558403,30	162074,00	22,750%	10
45	45	45	26,9	€ 3.786	104,36	150,85	125,68	137,30	10291,99	1293497,30	12505,40	9,821%	7
45	45	135	26,9	€ 3.786	104,36	150,85	125,68	137,30	10291,99	1293497,30	12505,40	9,821%	7
45	135	45	26,0	€ 3.744	104,36	150,85	125,68	305,50	10292,70	1293586,54	4867,50	9,821%	7
135	45	45	26,4	€ 3.958	97,75	150,85	136,30	32,00	9208,19	1255076,30	2845,00	10,122%	7
45	135	135	26,0	€ 3.744	104,36	150,85	125,68	305,50	10292,65	1293580,25	4867,70	9,821%	7
135	45	135	26,4	€ 3.958	97,75	150,85	136,30	32,00	9208,25	1255084,44	2844,60	10,122%	7
135	135	45	26,5	€ 3.966	97,75	150,85	136	128,70	9210,99	1255457,94	4145,10	10,119%	7
135	135	135	26,5	€ 3.966	97,75	150,85	136	128,70	9211,04	1255464,75	4154,10	10,119%	7

Tabella 5.5 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718

Verifica vincoli di processo								
Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	
Parametro di input collegato			Target production time	Target cost	Larghezza piatto di stampa	Lunghezza piatto di stampa	Altezza volume di stampa	Valutazione
x	y	z						
0	0	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK
90	0	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK
180	0	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	90	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	180	0	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	0	90	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0	0	180	OK	OK	OK	OK	OK	OK
45	45	45	OK	OK	OK	OK	OK	OK
45	45	135	OK	OK	OK	OK	OK	OK
45	135	45	OK	OK	OK	OK	OK	OK
135	45	45	OK	OK	OK	OK	OK	OK
45	135	135	OK	OK	OK	OK	OK	OK
135	45	135	OK	OK	OK	OK	OK	OK
135	135	45	OK	OK	OK	OK	OK	OK
135	135	135	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabella 5.6 Verifica vincoli di processo caso di studio 2 v2 con tecnologia SLM e materiale Inconel 718

SLM			
Vincoli di processo	Valore minimo	Valore massimo	
Tempo di produzione	0	60	ore
Costo di produzione	0	5500	EUR
Larghezza piatto (dimensione minore)	0	250	mm
Lunghezza piatto (dimensione maggiore)	0	250	mm
Altezza volume di stampa	0	325	mm

Tabella 5.7 Vincoli di processo per caso di studio 2 v2 con tecnologia SLM e materiale Inconel 718

Completata la raccolta dei dati e la verifica dei vincoli di processo si procede alla normalizzazione della matrice con i criteri utilizzati nel metodo. Quando anche la normalizzazione della matrice è stata operata si procede alla creazione della matrice pesata. Quest'ultima è ottenuta moltiplicando ogni singolo coefficiente normalizzato per il peso a lui assegnato. Viene riportata in Tabella 5.8 la matrice pesata per il caso di studio analizzato. Come è possibile notare dalla Tabella 5.8 vengono in questo passaggio identificate le soluzioni ideali positive e negative in base agli obiettivi impostati inizialmente. Per identificare le soluzioni ideali positive e negative vengono selezionati i valori ottimali e pessimi, assegnati rispettivamente a soluzione ideale positiva e negativa.

			Criterio	Tempo totale processo	Costo totale processo	Packing density	Resistenza meccanica
			Unità di misura	ore	EUR	%	
			Pesi	0,60	0,20	0,10	0,10
x	y	z					
0	0	0	0,1760	0,0570	0,0309	0,0323	
90	0	0	0,1864	0,0427	0,0254	0,0129	
180	0	0	0,2161	0,0628	0,0309	0,0323	
0	90	0	0,2261	0,0553	0,0351	0,0129	
0	180	0	0,2161	0,0628	0,0309	0,0323	
0	0	90	0,1760	0,0570	0,0309	0,0323	
0	0	180	0,1760	0,0570	0,0309	0,0323	
45	45	45	0,1065	0,0458	0,0133	0,0226	
45	45	135	0,1065	0,0458	0,0133	0,0226	
45	135	45	0,1030	0,0453	0,0133	0,0226	
135	45	45	0,1044	0,0479	0,0137	0,0226	
45	135	135	0,1030	0,0453	0,0133	0,0226	
135	45	135	0,1044	0,0479	0,0137	0,0226	
135	135	45	0,1050	0,0480	0,0137	0,0226	
135	135	135	0,1050	0,0480	0,0137	0,0226	
Obiettivo			Minimizzare	Minimizzare	Massimizzare	Massimizzare	
Soluzione ideale positiva			0,1030	0,0427	0,0351	0,0323	
Soluzione ideale negativa			0,2261	0,0628	0,0133	0,0129	

Tabella 5.8 Matrice pesata caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718

Il metodo prosegue calcolando la distanza geometrica dei singoli orientamenti dalle soluzioni ideali. In Tabella 5.9 viene riportata la tabella contenente i dati relativi alle distanze geometriche degli orientamenti dalla soluzione ideale positiva mentre in Tabella 5.10 viene riportata la tabella contenente i dati relativi alle distanze geometriche degli orientamenti dalla soluzione ideale negativa.

			Distanza da soluzione ideale positiva				S_i^+
Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Packing density	Resistenza meccanica	
Unità di misura			ore	EUR	%		
x	y	z					
0	0	0	0,005326153	0,000203639	0,000022019	0,000000000	0,074510477
90	0	0	0,006942208	0,000000000	0,000117097	0,000389610	0,086307099
180	0	0	0,012776483	0,000405416	0,000022017	0,000000000	0,114908291
0	90	0	0,015156586	0,000158539	0,000000000	0,000389610	0,125318534
0	180	0	0,012777467	0,000405441	0,000022019	0,000000000	0,114912691
0	0	90	0,005326153	0,000203639	0,000022019	0,000000000	0,074510477
0	0	180	0,005326153	0,000203639	0,000022019	0,000000000	0,074510477
45	45	45	0,000012247	0,000009749	0,000584696	0,000097403	0,026534781
45	45	135	0,000012247	0,000009749	0,000584696	0,000097403	0,026534781
45	135	45	0,000000000	0,000006812	0,000584745	0,000097403	0,026248034
135	45	45	0,000001985	0,000027154	0,000562985	0,000097403	0,026258831
45	135	135	0,000000000	0,000006812	0,000584741	0,000097403	0,026247970
135	45	135	0,000001985	0,000027153	0,000562989	0,000097403	0,026258906
135	135	45	0,000004019	0,000028070	0,000563205	0,000097403	0,026319127
135	135	135	0,000004035	0,000028077	0,000563209	0,000097403	0,026319638

Tabella 5.9 Distanze da soluzione ideale positiva caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718

			Distanza da soluzione ideale negativa				S_i^-
Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Packing density	Resistenza meccanica	
Unità di misura			ore	EUR	%		
x	y	z					
0	0	0	0,002513176	0,000034402	0,000379825	0,000389610	0,057593521
90	0	0	0,001583417	0,000405441	0,000178500	0,000000000	0,046554892
180	0	0	0,000101586	0,000000000	0,000379831	0,000389610	0,029513175
0	90	0	0,000000000	0,000056917	0,000584745	0,000000000	0,025331052
0	180	0	0,000101498	0,000000000	0,000379825	0,000389610	0,029511583
0	0	90	0,002513176	0,000034402	0,000379825	0,000389610	0,057593521
0	0	180	0,002513176	0,000034402	0,000379825	0,000389610	0,057593521
45	45	45	0,014307145	0,000289449	0,000000000	0,000097403	0,121218798
45	45	135	0,014307145	0,000289449	0,000000000	0,000097403	0,121218798
45	135	45	0,015156586	0,000307148	0,000000000	0,000097403	0,124744284
135	45	45	0,014811646	0,000222745	0,000000206	0,000097403	0,123012195
45	135	135	0,015156563	0,000307148	0,000000000	0,000097403	0,124744192
135	45	135	0,014811691	0,000222746	0,000000206	0,000097403	0,123012379
135	135	45	0,014667006	0,000220149	0,000000202	0,000097403	0,122412253
135	135	135	0,014666007	0,000220131	0,000000202	0,000097403	0,122408099

Tabella 5.10 Distanze da soluzione ideale negativa caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718

Valutate a questo punto tutte le distanze geometriche dalle soluzioni ideali il metodo procede andando a formulare le valutazioni finali. Viene quindi utilizzata l'equazione Eq. 3.8 per formulare le valutazioni di ogni singolo orientamento. L'orientamento con la valutazione maggiore risulterà essere quello ottimale. In Tabella 5.11 viene riportato l'esito della valutazione finale.

x	y	z	Risultati	Valutazioni
0	0	0	0,4359711	
90	0	0	0,3504004	
180	0	0	0,2043545	
0	90	0	0,1681455	
0	180	0	0,2043395	
0	0	90	0,4359711	
0	0	180	0,4359711	
45	45	45	0,8204119	
45	45	135	0,8204119	
45	135	45	0,8261631	
135	45	45	0,8240862	
45	135	135	0,8261634	Soluzione ottimale
135	45	135	0,8240860	
135	135	45	0,8230425	
135	135	135	0,8230348	

Tabella 5.11 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718

Come è possibile osservare in Tabella 5.11 la soluzione ottimale risulta essere quello con orientamento $(45^\circ, 135^\circ, 135^\circ)$. È di notevole importanza notare che l'orientamento che risulta come ottimale ha una valutazione molto simile a quella di un altro orientamento, questo è dovuto al fatto che i due orientamenti sono gli stessi ma con rotazione di 90° rispetto all'asse z. Si potrebbe procedere comunque ad uno studio di dettaglio nell'intorno delle soluzioni con valutazioni maggiori per trovare l'effettiva direzione di stampa ottimale. Viene riportato in Figura 5.5 una rappresentazione dell'orientamento ottimale ottenuto applicando il metodo sviluppato.

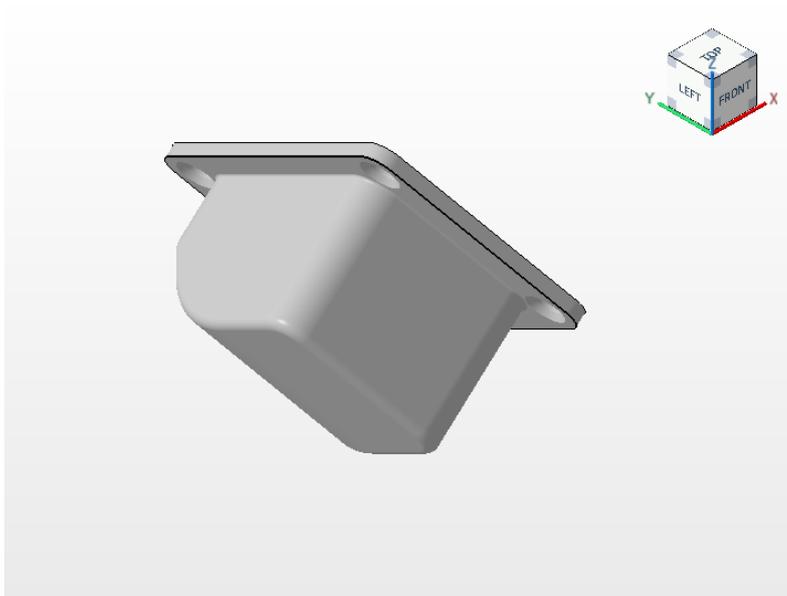


Figura 5.5 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718

Vengono di seguito riportati i risultati ottenuti applicando il metodo agli altri casi di studio. In Tabella 5.12 vengono riportati i risultati per il caso di studio con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316.

x	y	z	Risultati	Valutazioni
0	0	0	0,868	
90	0	0	0,337	
180	0	0	0,868	Soluzione ottimale
0	90	0	0,503	
0	180	0	0,868	
0	0	90	0,868	
0	0	180	0,868	
45	45	45	0,307	
45	45	135	0,307	
45	135	45	0,307	
135	45	45	0,311	
45	135	135	0,307	
135	45	135	0,311	
135	135	45	0,311	
135	135	135	0,311	

Tabella 5.12 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316

Come è possibile notare dalla Tabella 5.12 la soluzione ottimale risulta essere quella con orientamento $(180^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$. Anche in questo caso va sottolineato che un ulteriore studio di dettaglio fornirà maggiori informazioni che permetteranno di valutare l'effettivo orientamento ottimale. Viene riportato in Figura 5.6 una rappresentazione dell'orientamento ottimale.

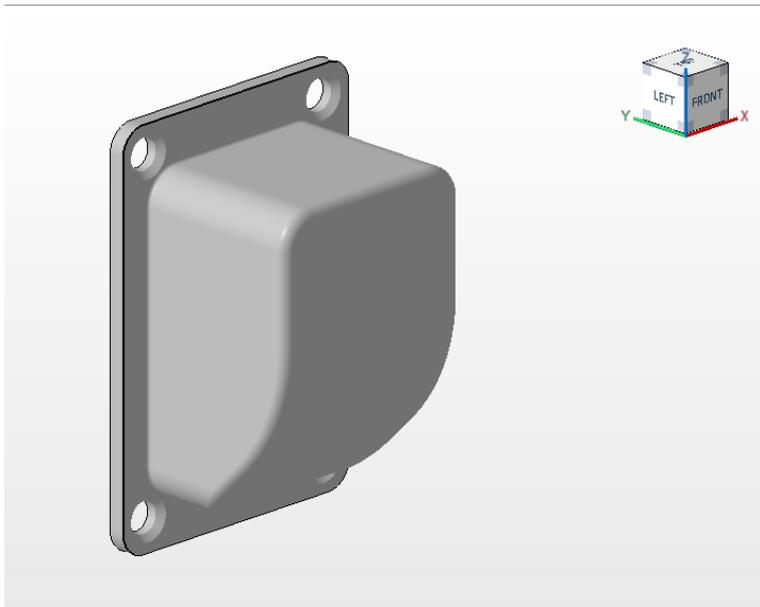


Figura 5.6 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316

In Tabella 5.13 vengono riportati i risultati per il caso di studio con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS.

x	y	z	Risultati	Valutazioni
0	0	0	0,529	
90	0	0	0,223	
180	0	0	0,321	
0	90	0	0,171	
0	180	0	0,321	
0	0	90	0,529	
0	0	180	0,528	
45	45	45	0,745	
45	45	135	0,745	
45	135	45	0,786	
135	45	45	0,751	
45	135	135	0,786	
135	45	135	0,751	
135	135	45	0,788	
135	135	135	0,788	Soluzione ottimale

Tabella 5.13 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS

Come è possibile notare dalla Tabella 5.13 la soluzione ottimale risulta essere quella con orientamento $(135^\circ, 135^\circ, 135^\circ)$. Viene riportato in Figura 5.7 una rappresentazione dell'orientamento ottimale.

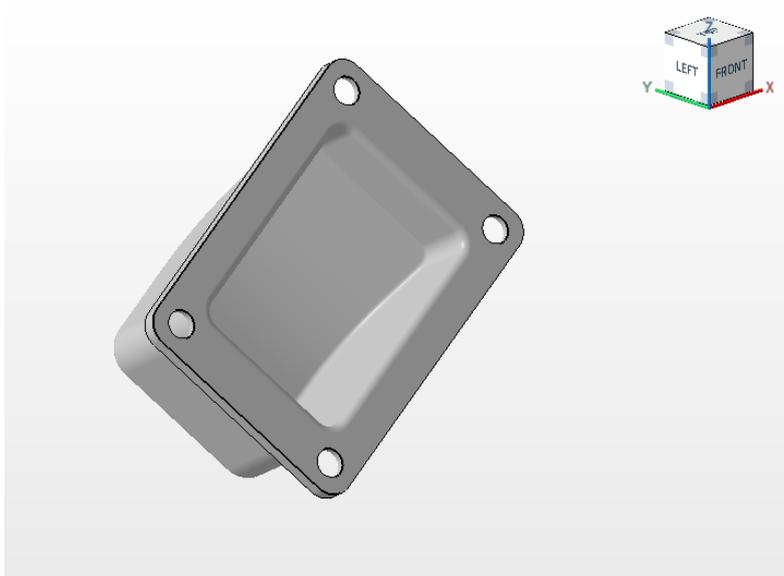


Figura 5.7 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS

Vengono infine riportati in Tabella 5.14 i risultati per il caso di studio con tecnologia di stampa SLS e materiale poliammide.

x	y	z	Risultati	Valutazioni
0	0	0	0,497	
90	0	0	0,613	Soluzione ottimale
180	0	0	0,497	
0	90	0	0,606	
0	180	0	0,497	
0	0	90	0,497	
0	0	180	0,497	
45	45	45	0,202	
45	45	135	0,202	
45	135	45	0,202	
135	45	45	0,176	
45	135	135	0,202	
135	45	135	0,176	
135	135	45	0,176	
135	135	135	0,176	

Tabella 5.14 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale poliammide

Come è possibile notare dalla Tabella 5.14 la soluzione ottimale risulta essere quella con orientamento $(90^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$. Viene riportato in Figura 5.8 una rappresentazione dell'orientamento ottimale.

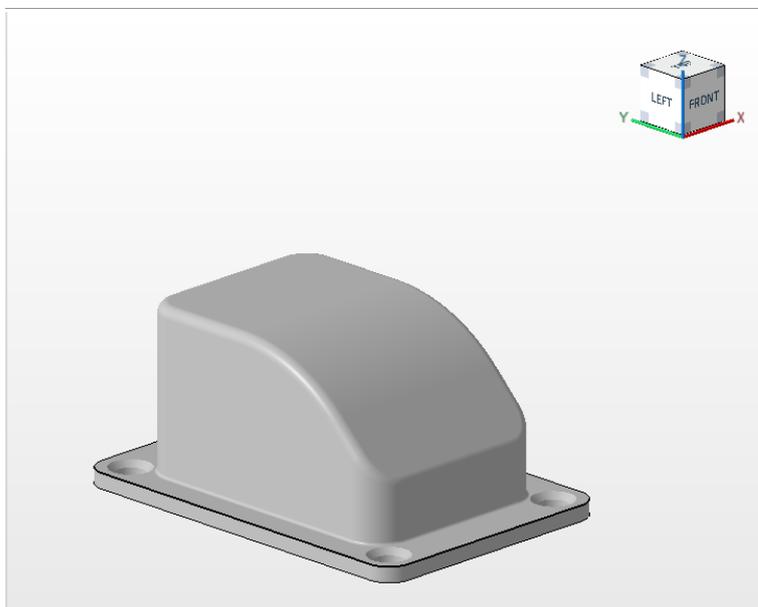


Figura 5.8 Orientamento ottimale caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale poliammide

Per gli ulteriori casi di studio denominati con il codice parte 1 v1 e il codice parte Penta valve v14 sono riportati in seguito i risultati sotto forma di tabelle. Nella Tabella 5.15 vengono riportati i risultati per il caso di studio 1 v1 e viene riportata una rappresentazione grafica dell'orientamento ottimale per ogni tecnologia di stampa.

Tutti i dati e risultati dei casi di studio 1 v1 sono riportati nelle tabelle in appendice.

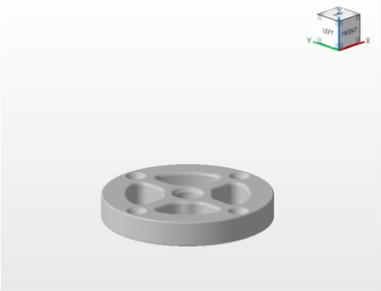
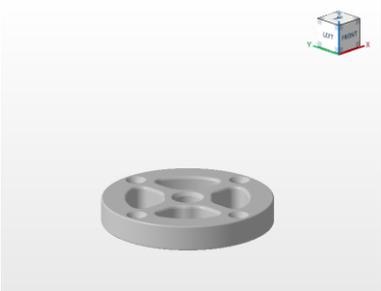
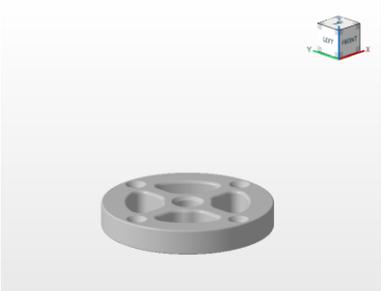
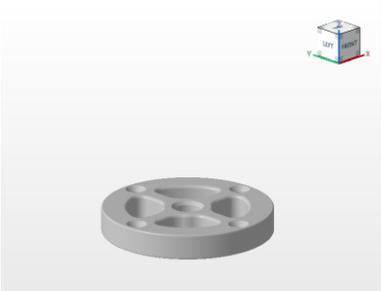
<p>Caso di studio: 1 v1 Tecnologia di stampa: SLM Materiale: Inconel 718 Scenario: rapidità elevata Soluzione: (90°,0°,0°) Valutazione: 1.000</p>	
<p>Caso di studio: 1 v1 Tecnologia di stampa: DED Materiale: AISI 316 Scenario: rapidità elevata Soluzione: (90°,0°,0°) Valutazione: 1.000</p>	
<p>Caso di studio: 1 v1 Tecnologia di stampa: FDM Materiale: ABS Scenario: rapidità elevata Soluzione: (90°,0°,0°) Valutazione: 1.000</p>	
<p>Caso di studio: 1 v1 Tecnologia di stampa: SLS Materiale: Poliammide Scenario: rapidità elevata Soluzione: (90°,0°,0°) Valutazione: 1.000</p>	

Tabella 5.15 Risultati caso di studio 1 v1 scenario rapidità elevata

Nella Tabella 5.16 vengono infine riportati i risultati inerenti al caso di studio Penta valve v14. Tutti i dati e risultati dei casi di studio Penta valve v14 sono riportati nelle tabelle in appendice.

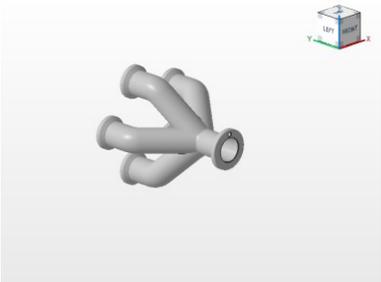
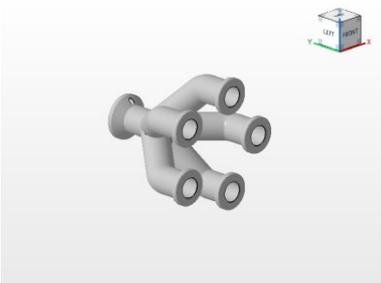
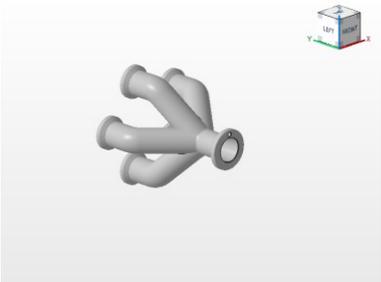
<p>Caso di studio: Penta valve v14 Tecnologia di stampa: SLM Materiale: Inconel 718 Scenario: rapidità elevata Soluzione: (90°,0°,0°) Valutazione: 0.582</p>	
<p>Caso di studio: Penta valve v14 Tecnologia di stampa: DED Materiale: AISI 316 Scenario: rapidità elevata Soluzione: (0°,180°,0°) Valutazione: 0.983</p>	
<p>Caso di studio: Penta valve v14 Tecnologia di stampa: FDM Materiale: ABS Scenario: rapidità elevata Soluzione: (180°,0°,0°) Valutazione: 0.540</p>	
<p>Caso di studio: Penta valve v14 Tecnologia di stampa: SLS Materiale: Poliammide Scenario: rapidità elevata Soluzione: (0°,180°,0°) Valutazione: 0.943</p>	

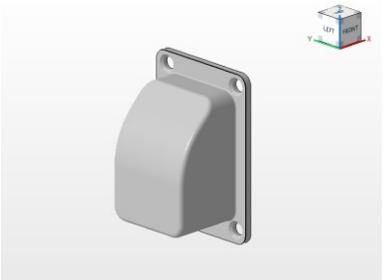
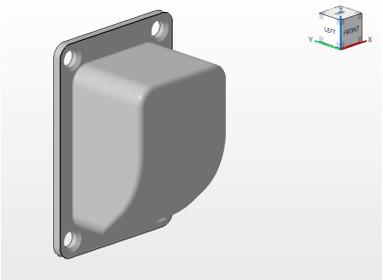
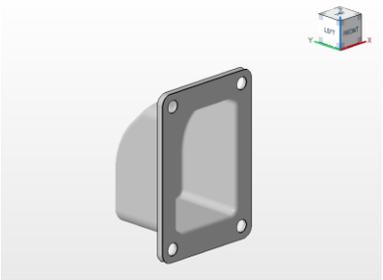
Tabella 5.16 Risultati caso di studio Penta valve v14 scenario rapidità elevata

5.2 Scenario resistenza meccanica elevata

Il secondo scenario analizzato nel caso di studio prevede la necessità di massimizzare la resistenza meccanica della parte.

Vengono proposte delle tabelle riassuntive che permettono di identificare i risultati ottenuti con l'applicazione del metodo ai casi di studio.

Nella Tabella 5.17 vengono riportati i risultati ottenuti per il caso di studio 2 v2. Tutti i dati e risultati dei casi di studio 2 v2 sono riportati nelle tabelle in appendice.

<p>Caso di studio: 2 v2</p> <p>Tecnologia di stampa: SLM</p> <p>Materiale: Inconel 718</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (0°,0°,90°)</p> <p>Valutazione: 0.860</p>	
<p>Caso di studio: 2 v2</p> <p>Tecnologia di stampa: DED</p> <p>Materiale: AISI 316</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (180°,0°,0°)</p> <p>Valutazione: 0.959</p>	
<p>Caso di studio: 2 v2</p> <p>Tecnologia di stampa: FDM</p> <p>Materiale: ABS</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (0°,0°,0°)</p> <p>Valutazione: 0.934</p>	

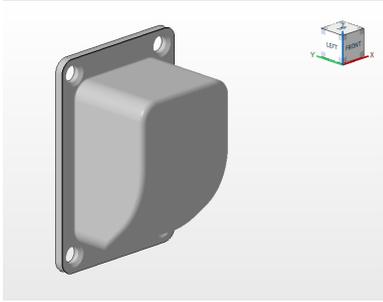
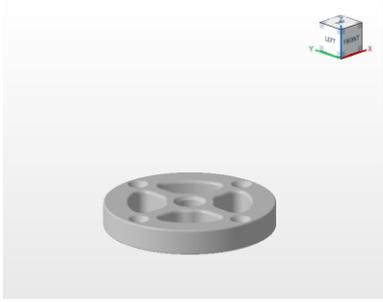
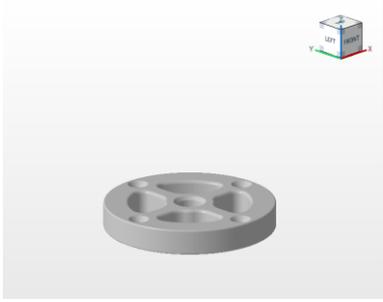
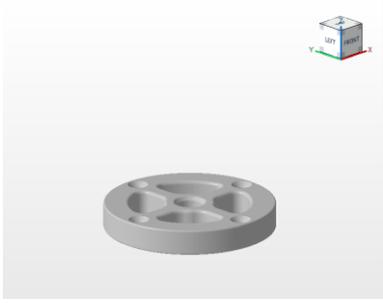
<p>Caso di studio: 2 v2</p> <p>Tecnologia di stampa: SLS</p> <p>Materiale: Poliammide</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (180°,0°,0°)</p> <p>Valutazione: 0.902</p>	
--	--

Tabella 5.17 Risultati caso di studio 2 v2 scenario resistenza meccanica elevata

Nella Tabella 5.18 vengono riportati i risultati ottenuti per il caso di studio 1 v1. Tutti i dati e risultati dei casi di studio 1 v1 sono riportati nelle tabelle in appendice.

<p>Caso di studio: 1 v1</p> <p>Tecnologia di stampa: SLM</p> <p>Materiale: Inconel 718</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (90°,0°,0°)</p> <p>Valutazione: 1.000</p>	
<p>Caso di studio: 1 v1</p> <p>Tecnologia di stampa: DED</p> <p>Materiale: AISI 316</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (90°,0°,0°)</p> <p>Valutazione: 1.000</p>	
<p>Caso di studio: 1 v1</p> <p>Tecnologia di stampa: FDM</p> <p>Materiale: ABS</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (90°,0°,0°)</p> <p>Valutazione: 1.000</p>	

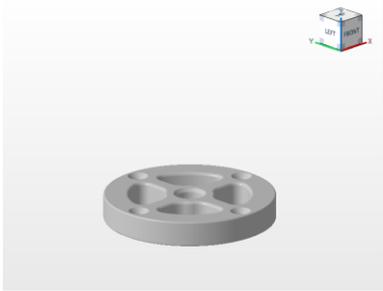
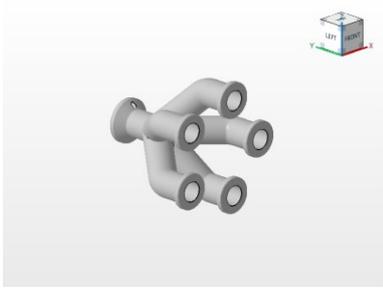
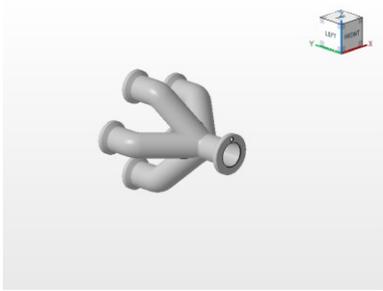
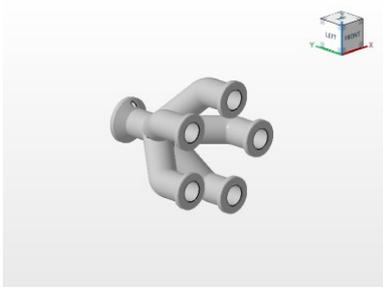
<p>Caso di studio: 1 v1 Tecnologia di stampa: SLS Materiale: Poliammide Scenario: resistenza meccanica elevata Soluzione: (90°,0°,0°) Valutazione: 1.000</p>	
---	--

Tabella 5.18 Risultati caso di studio 1 v1 scenario resistenza meccanica elevata

Vengono infine riportati nella Tabella 5.19 i risultati ottenuti per il caso di studio Penta valve v14. Tutti i dati e risultati dei casi di studio Penta valve v14 sono riportati nelle tabelle in appendice.

<p>Caso di studio: Penta valve v14 Tecnologia di stampa: SLM Materiale: Inconel 718 Scenario: resistenza meccanica elevata Soluzione: (180°,0°,0°) Valutazione: 0.956</p>	
<p>Caso di studio: Penta valve v14 Tecnologia di stampa: DED Materiale: AISI 316 Scenario: resistenza meccanica elevata Soluzione: (0°,180°,0°) Valutazione: 0.996</p>	
<p>Caso di studio: Penta valve v14 Tecnologia di stampa: FDM Materiale: ABS Scenario: resistenza meccanica elevata Soluzione: (180°,0°,0°) Valutazione: 0.962</p>	

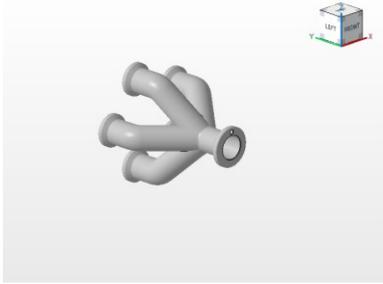
<p>Caso di studio: Penta valve v14</p> <p>Tecnologia di stampa: SLS</p> <p>Materiale: Poliammide</p> <p>Scenario: resistenza meccanica elevata</p> <p>Soluzione: (0°,180°,0°)</p> <p>Valutazione: 0.993</p>	
---	--

Tabella 5.19 Risultati caso di studio Penta valve v14 scenario resistenza meccanica elevata

Conclusa la presentazione dei risultati è necessario fare una analisi dei risultati ottenuti. Come è possibile notare dalle tabelle riassuntive sopra riportate si può notare come nello scenario in cui viene preferita la rapidità del processo sono favorite quelle direzioni che hanno valori minimi relativi al tempo e costi di stampa, infatti, questi due criteri sono quelli a cui viene assegnato un peso maggiore. Al contrario nello scenario in cui viene favorita la resistenza meccanica le direzioni ottimali sono quelle in cui le fibre delle parti hanno direzione parallela alla direzione del carico in modo che siano in grado di sostenere il carico in maniera ottimale.

Va sottolineato che in alcuni casi di studio le direzioni ottimali non tendono a variare se non per rotazioni attorno all'asse z o ribaltamenti.

6 Conclusioni

Il lavoro di tesi si poneva come obiettivo quello di sviluppare un metodo che permettesse di ottimizzare la scelta delle direzioni di stampa nei processi additivi. Si può affermare che l'obiettivo è stato raggiunto. È stato possibile identificare le direzioni di stampa ottimali per ogni caso di studio utilizzando il metodo sviluppato. Va sottolineato che il metodo viene applicato nei casi di studio una sola volta dunque, se necessario, potrebbe essere ripetuto il procedimento per ottenere risultati più accurati. Viene evidenziato che dopo l'applicazione del metodo non è sempre possibile arrivare ad un'unica soluzione e in questo caso è necessaria un'ulteriore analisi con maggiore sensibilità per determinare la soluzione del problema.

Le principali criticità riscontrate sono relative alla raccolta dei dati per ogni orientamento dei casi di studio. Questo perché non sono stati riscontrati software che permettessero di valutare tutti i criteri tenuti in considerazione nel metodo, inoltre, non è stato possibile identificare tutte le direzioni che in fase iniziale erano state selezionate.

La difficoltà relativa alle direzioni necessarie per applicare il metodo è stata superata con l'utilizzo del programma Netfabb di Autodesk e impostando manualmente le direzioni di interesse per il metodo. Questa soluzione risulta molto laboriosa poiché le direzioni richieste sono ottenute ruotando ogni componente del caso di studio mediante l'apposito comando, successivamente vengono utilizzati i comandi di analisi presenti nel software per ricavare i dati e infine il componente viene ruotato nuovamente con angolazioni negative per riportarlo alla configurazione iniziale.

Le difficoltà incontrate evidenziano come in letteratura e anche nel mercato di software per la scelta delle direzioni di stampa non vi sia la presenza di un metodo che tenga in considerazione un numero elevato di parametri e che valuti il numero di direzioni in base alla richiesta dell'utente. In effetti il numero di orientamenti ottimali proposti varia in base al punteggio che il software assegna a ogni singolo orientamento, non è quindi possibile capire dove siano le zone con i punteggi più alti.

Va poi evidenziato come i software disponibili necessitino di una certa esperienza per essere utilizzati specificatamente per quel che riguarda la scelta dei pesi da assegnare ad ogni criterio. Molti software permettono la personalizzazione dei pesi, ma pochi guidano un utente con poca esperienza nella scelta di essi una volta scelta la tecnologia di stampa e il materiale.

Viene comunque evidenziata anche nel metodo proposto una certa limitazione, in particolare nella fase di raccolta dei dati che non avviene in maniera automatica, ma deve essere fatta manualmente.

I possibili sviluppi futuri sono, senza dubbio, l'implementazione del metodo mediante l'utilizzo di un software che permetta in maniera autonoma di identificare tutti i dati necessari al funzionamento del metodo. Un ulteriore sviluppo è relativo all'utilizzo di criteri che non sono stati considerati nel metodo in questione, poiché non valutabili con i software a disposizione. I criteri che andrebbero integrati nel metodo dovrebbero essere relativi a:

- Qualità della parte dovuto prevalentemente a steric effect e errori volumetrici
- Qualità dei dettagli come la presenza di eventuali caratteri nella parte oppure la qualità dei fori
- Rimozione dei supporti

Altra considerazione va fatta per quanto riguarda le tecnologie di stampa e i materiali utilizzati. Nei casi di studio vengono proposte quattro tecnologie associate ad ulteriori quattro materiali, potrebbe perciò essere stimolante sviluppare altri casi di studio con nuove tecnologie e materiali.

Viene inoltre ritenuta di particolare interesse la valutazione dei dati usando un software diverso da Netfabb, utilizzato nel caso di studio, per osservare se le direzioni effettivamente ottimali sono le stesse oppure se il nuovo software troverà altre direzioni ottimali.

7 Bibliografia

- [1] C.W. Hull, Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. US Patent Office (1984).
- [2] 3D Systems' First 3D Printer named Historic Mechanical Engineering Landmark by ASME, Press Releases, Latest News and Other Related Resources, 2016.
- [3] Malone E, Lipson H. Fab@Home: The Personal Desktop Fabricator Kit. In: Proceedings of the 17th Solid Freeform Fabrication Symposium; 2006, August 2006, Austin, TX.
- [4] Wolf M. Article in Forbes, 3D Printing With Paper At Your Local Office Supply Store? Yep, If Mcor Has Its Way. Forbes; 2013, March.
- [5] Grimm T. User's Guide to Rapid Prototyping. SME; 2004. ISBN 978-0-87263-697-2, p.163.
- [6] Yuchu Qin, Qunfen Qi, Peizhi Shi, Paul J. Scott, Xiangqian Jiang. Status, issues, and future of computer-aided part orientation for additive manufacturing. Published 15 May 2021, p.3.
- [7] Taufik M, Jain PK. Role of build orientation in layered manufacturing: a review. Published January 2014. International Journal of Manufacturing Technology and Management.
- [8] Di Angelo L, Di Stefano P, Guardiani E. Search for the optimal build direction in additive manufacturing technologies: A review. Published 14 July 2020. Journal of Manufacturing and Material Process.
- [9] M. Simonelli, Y.Y. Tse, C. Tuck, Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V, Materials Science and Engineering: A, Volume 616, 2014.
- [10] Pages 1-11, Ruben Wauthle, Bey Vrancken, Britt Beynaerts, Karl Jorissen, Jan Schrooten, Jean-Pierre Kruth, Jan Van Humbeeck, Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures, Additive Manufacturing, Volume 5, 2015, Pages 77-84.

- [11] Xu, F.; Wong, Y.; Loh, H.; Fuh, J.; Miyazawa, T. Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. *Rapid Prototyp. J.* 1997, 3, 76–88.
- [12] Nicola Garzaniti, Alessandro Golkar, Clément Fortin. Optimization of Multi-part 3D Printing Build Strategies for Lean Product and Process Development. 15th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM), Jul 2018, Turin, Italy. pp.488-497.
- [13] Olaf Diegel, Axel Nordin, Damien Motte. A practical guide to design for additive manufacturing. Springer. 2019.
- [14] Zhang, Y., Bernard, A., Harik, R. et al. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *J Intell Manuf* 28, 1393–1407 (2017).
- [15] Aravind Shanmugasundaram, Sunil and Razmi, Jafar and Mian, Md Jamal and Ladani, Leila. Mechanical Anisotropy and Surface Roughness in Additively Manufactured Parts Fabricated by Stereolithography (SLA) Using Statistical Analysis. *Materials* vol.13, 2020, art.nr. 2496.
- [16] P. M. Pandey, K. Thrimurthulu & N. Venkata Reddy (2004): Optimal part deposition orientation in FDM by using a multicriteria genetic algorithm, *International Journal of Production Research*.
- [17] Medellin-Castillo, H.I., Zaragoza-Siqueiros, J. Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review. *Chin. J. Mech. Eng.* 32, 53 (2019).
- [18] Krishnan, Kumar & Gurunathan, Saravana Kumar. (2015). An experimental and theoretical investigation of surface roughness of poly-jet printed parts. *Virtual and Physical Prototyping*.
- [19] Yicha, Zhang & Bernard, Alain & Harik, Ramy & Fadel, Georges. (2017). A New Method for Single-Layer-Part Nesting in Additive Manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*.
- [20] Valeriya Griffiths, James P. Scanlan, Murat H. Eres, Antonio Martinez-Sykora, Phani Chinchapatnam, Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM), *European Journal of Operational Research*, Volume 273, Issue 1, 2019, Pages 334-352.

8 Appendice

Vengono riportati nel capitolo appendice tutte le tabelle relative ai dati e ai risultati ottenuti nei casi di studio per entrambi gli scenari.

8.1 Tabelle raccolta dati e risultati scenario rapidità elevata

Vengono di seguito riportate le tabelle e i risultati per lo scenario rapidità elevata.

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
90	0	0	5,8	€ 20	100	100	15	4731,50	5343,83	80157,45	14029,70	98,164%	10
180	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	90	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	180	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	0	90	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	0	180	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
45	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,20	5008,59	467652,05	8219,00	16,826%	7
45	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,20	5008,57	467650,18	8219,30	16,826%	7
45	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	314,30	5008,60	467652,98	12199,40	16,826%	7
135	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,80	5008,60	467652,98	8266,80	16,826%	7
45	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	314,30	5008,59	467652,05	12199,40	16,826%	7
135	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,80	5008,62	467654,85	8267,50	16,826%	7
135	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	315,00	5008,58	467651,11	12347,40	16,826%	7
135	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	315,00	5008,59	467652,05	12347,70	16,826%	7

Tabella 8.1 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,420	
90	0	0	1,000	Soluzione ottimale
180	0	0	0,420	
0	90	0	0,420	
0	180	0	0,420	
0	0	90	0,420	
0	0	180	0,420	
45	45	45	0,179	
45	45	135	0,179	
45	135	45	0,165	
135	45	45	0,179	
45	135	135	0,165	
135	45	135	0,179	
135	135	45	0,165	
135	135	135	0,165	

Tabella 8.2 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario rapidità elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
90	0	0	2,8	€ 243	100	100	15	0,00	5343,83	80157,45	0,00	98,164%	10
180	0	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	90	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	180	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	0	90	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	0	180	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
45	45	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	6,5
45	45	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,57	467650,18	0,00	16,826%	6,5
45	135	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	6,5
135	45	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	6,5
45	135	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	6,5
135	45	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,62	467654,85	0,00	16,826%	6,5
135	135	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,58	467651,11	0,00	16,826%	6,5
135	135	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	6,5

Tabella 8.3 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,337	
90	0	0	1,000	Soluzione ottimale
180	0	0	0,337	
0	90	0	0,337	
0	180	0	0,337	
0	0	90	0,337	
0	0	180	0,337	
45	45	45	0,237	
45	45	135	0,237	
45	135	45	0,237	
135	45	45	0,237	
45	135	135	0,237	
135	45	135	0,237	
135	135	45	0,237	
135	135	135	0,237	

Tabella 8.4 Risultati caso di studio 1v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario rapidità elevata

x	y	z	Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
0	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	52,484%	0
90	0	0	5,8	€ 20	100	100	15	4872,00	5343,83	80157,45	14411,40	98,164%	10
180	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	2312,00	1499,23	149923,00	28277,70	52,484%	0
0	90	0	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	52,484%	0
0	180	0	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	52,484%	0
0	0	90	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	52,484%	0
0	0	180	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	52,484%	0
45	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1775,30	5008,59	467652,05	49158,20	16,826%	5
45	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1775,30	5008,57	467650,18	49158,40	16,826%	5
45	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1898,80	5008,60	467652,98	54472,70	16,826%	5
135	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1774,10	5008,60	467652,98	49139,50	16,826%	5
45	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1898,80	5008,59	467652,05	54472,90	16,826%	5
135	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1774,10	5008,62	467654,85	49138,90	16,826%	5
135	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1899,60	5008,58	467651,11	54516,20	16,826%	5
135	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1899,60	5008,59	467652,05	54516,80	16,826%	5

Tabella 8.5 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,308	
90	0	0	1,000	Soluzione ottimale
180	0	0	0,308	
0	90	0	0,308	
0	180	0	0,308	
0	0	90	0,308	
0	0	180	0,308	
45	45	45	0,308	
45	45	135	0,308	
45	135	45	0,298	
135	45	45	0,308	
45	135	135	0,298	
135	45	135	0,308	
135	135	45	0,298	
135	135	135	0,298	

Tabella 8.6 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario rapidità elevata

x	y	z	Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
0	0	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
90	0	0	6,0	€ 11	100	100	15	0,00	5343,83	80157,45	0,00	98,164%	10
180	0	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	90	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	180	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	0	90	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	0	180	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
45	45	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	7,5
45	45	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,57	467650,18	0,00	16,826%	7,5
45	135	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	7,5
135	45	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	7,5
45	135	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	7,5
135	45	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,62	467654,85	0,00	16,826%	7,5
135	135	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,58	467651,11	0,00	16,826%	7,5
135	135	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	7,5

Tabella 8.7 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,313	Soluzione ottimale
90	0	0	1,000	
180	0	0	0,313	
0	90	0	0,313	
0	180	0	0,313	
0	0	90	0,313	
0	0	180	0,313	
45	45	45	0,146	
45	45	135	0,146	
45	135	45	0,146	
135	45	45	0,146	
45	135	135	0,146	
135	45	135	0,146	
135	135	45	0,146	
135	135	135	0,146	

Tabella 8.8 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario rapidità elevata

x	y	z	Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
0	0	0	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	708,10	743,45	29239,89	6246,20	14,046%	10
90	0	0	6,4	€ 1.169	37,94	39,33	38,00	76,50	758,79	28834,02	219,20	14,244%	4
180	0	0	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	707,00	743,40	29237,92	6221,40	14,047%	10
0	90	0	7,6	€ 1.225	38,00	39,33	37,94	663,60	891,95	33840,58	7082,50	12,136%	10
0	180	0	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	707,00	743,40	29237,92	6221,40	14,047%	10
0	0	90	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	708,10	743,41	29238,32	6246,10	14,047%	10
0	0	180	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	708,10	743,41	29238,32	6246,10	14,047%	10
45	45	45	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	372,10	979,98	41335,56	3289,80	9,936%	7
45	45	135	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	372,10	979,97	41335,13	3226,70	9,936%	7
45	135	45	7,6	€ 1.261	38,95	45,84	39,80	363,40	941,96	37490,01	4046,10	10,955%	7
135	45	45	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	372,10	979,99	41335,98	3256,00	9,936%	7
45	135	135	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	370,50	979,99	41335,98	3265,70	9,936%	7
135	45	135	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	370,50	979,99	41335,98	3226,70	9,936%	7
135	135	45	7,6	€ 1.261	38,95	45,84	39,80	361,70	941,97	37490,41	4100,70	10,955%	7
135	135	135	7,6	€ 1.261	38,95	45,84	39,80	361,70	941,97	37490,41	4100,60	10,955%	7

Tabella 8.9 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,500	Soluzione ottimale
90	0	0	0,611	
180	0	0	0,501	
0	90	0	0,442	
0	180	0	0,501	
0	0	90	0,500	
0	0	180	0,500	
45	45	45	0,233	
45	45	135	0,233	
45	135	45	0,267	
135	45	45	0,232	
45	135	135	0,232	
135	45	135	0,232	
135	135	45	0,266	
135	135	135	0,266	

Tabella 8.10 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718
scenario rapidità elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,45	29239,89	0,00	14,046%	10
90	0	0	2,5	€ 149	37,94	39,33	38,00	0,00	758,79	28834,02	0,00	14,244%	3
180	0	0	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	90	0	2,5	€ 149	38,00	39,33	37,94	0,00	891,95	33840,58	0,00	12,136%	10
0	180	0	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	0	90	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
0	0	180	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
45	45	45	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,98	41335,56	0,00	9,936%	6,5
45	45	135	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,97	41335,13	0,00	9,936%	6,5
45	135	45	2,5	€ 149	38,95	45,84	39,80	0,00	941,96	37490,01	0,00	10,955%	6,5
135	45	45	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	6,5
45	135	135	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	6,5
135	45	135	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	6,5
135	135	45	2,5	€ 149	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	6,5
135	135	135	2,5	€ 149	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	6,5

Tabella 8.11 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316
scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,983	
90	0	0	0,288	
180	0	0	0,983	Soluzione ottimale
0	90	0	0,838	
0	180	0	0,983	Soluzione ottimale
0	0	90	0,983	
0	0	180	0,983	
45	45	45	0,437	
45	45	135	0,437	
45	135	45	0,464	
135	45	45	0,437	
45	135	135	0,437	
135	45	135	0,437	
135	135	45	0,464	
135	135	135	0,464	

Tabella 8.12 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316
scenario rapidità elevata

x	y	z	Criterio		Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
			Tempo totale processo	Costo totale processo									
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
0	0	0	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1029,30	743,45	29239,89	8648,70	14,046%	10
90	0	0	0,9	€ 15,0	37,94	39,33	38,00	76,50	758,79	28834,02	219,20	14,244%	0
180	0	0	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1028,60	743,40	29237,92	8622,70	14,047%	10
0	90	0	1,3	€ 15,5	38,00	39,33	37,94	1079,10	891,95	33840,58	10623,20	12,136%	10
0	180	0	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1028,60	743,40	29237,92	8622,90	14,047%	10
0	0	90	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1029,30	743,41	29238,32	8648,70	14,047%	10
0	0	180	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1029,30	743,41	29238,32	8648,90	14,047%	10
45	45	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1019,50	979,98	41335,56	9804,90	9,936%	5
45	45	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1019,50	979,97	41335,13	9804,80	9,936%	5
45	135	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,84	39,80	893,90	941,96	37490,01	9931,40	10,955%	5
135	45	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1020,60	979,99	41335,98	9814,50	9,936%	5
45	135	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1020,60	979,99	41335,98	9814,50	9,936%	5
135	45	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1020,60	979,99	41335,98	9814,50	9,936%	5
135	135	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,84	39,80	894,80	941,97	37490,41	9964,80	10,955%	5
135	135	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,84	39,80	894,80	941,97	37490,41	9965,30	10,955%	5

Tabella 8.13 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS
scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,496	Soluzione ottimale
90	0	0	0,573	
180	0	0	0,497	
0	90	0	0,433	
0	180	0	0,497	
0	0	90	0,496	
0	0	180	0,496	
45	45	45	0,271	
45	45	135	0,271	
45	135	45	0,274	
135	45	45	0,271	
45	135	135	0,271	
135	45	135	0,271	
135	135	45	0,273	
135	135	135	0,273	

Tabella 8.14 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario rapidità elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,45	29239,89	0,00	14,046%	10
90	0	0	6,22	€ 7,11	37,94	39,33	38,00	0,00	758,79	28834,02	0,00	14,244%	5
180	0	0	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	90	0	6,22	€ 7,11	38,00	39,33	37,94	0,00	891,95	33840,58	0,00	12,136%	10
0	180	0	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	0	90	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
0	0	180	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
45	45	45	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,98	41335,56	0,00	9,936%	7,5
45	45	135	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,97	41335,13	0,00	9,936%	7,5
45	135	45	6,25	€ 7,22	38,95	45,84	39,80	0,00	941,96	37490,01	0,00	10,955%	7,5
135	45	45	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	7,5
45	135	135	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	7,5
135	45	135	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	7,5
135	135	45	6,25	€ 7,22	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	7,5
135	135	135	6,25	€ 7,22	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	7,5

Tabella 8.15 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario rapidità elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,951	
90	0	0	0,384	
180	0	0	0,951	Soluzione ottimale
0	90	0	0,782	
0	180	0	0,951	Soluzione ottimale
0	0	90	0,951	
0	0	180	0,951	
45	45	45	0,384	
45	45	135	0,384	
45	135	45	0,436	
135	45	45	0,384	
45	135	135	0,384	
135	45	135	0,384	
135	135	45	0,436	
135	135	135	0,436	

*Tabella 8.16 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide
scenario rapidità elevata*

8.2 Tabelle raccolta dati e risultati scenario resistenza meccanica elevata

Vengono di seguito riportate le tabelle e i risultati per lo scenario resistenza meccanica elevata.

		Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica	
		ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%		
x	y	z											
0	0	0	44,5	€ 4.707	60	90	130	4771,60	4295,41	558403,30	162074,00	22,750%	10
90	0	0	47,1	€ 3.528	90	130	60	9178,20	11332,00	679920,00	218239,80	18,684%	4
180	0	0	54,6	€ 5.192	60	90	130	4532,00	4295,39	558400,70	249488,90	22,750%	10
0	90	0	57,1	€ 4.568	60	130	90	8732,60	5457,67	491190,30	290686,30	25,863%	4
0	180	0	54,6	€ 5.192	60	90	130	4532,00	4295,41	558403,30	249498,40	22,750%	10
0	0	90	44,5	€ 4.707	60	90	130	4771,60	4295,41	558403,30	162074,00	22,750%	10
0	0	180	44,5	€ 4.707	60	90	130	4771,60	4295,41	558403,30	162074,00	22,750%	10
45	45	45	26,9	€ 3.786	104,36	150,85	125,68	137,30	10291,99	1293497,30	12505,40	9,821%	7
45	45	135	26,9	€ 3.786	104,36	150,85	125,68	137,30	10291,99	1293497,30	12505,40	9,821%	7
45	135	45	26,0	€ 3.744	104,36	150,85	125,68	305,50	10292,70	1293586,54	4867,50	9,821%	7
135	45	45	26,4	€ 3.958	97,75	150,85	136,30	32,00	9208,19	1255076,30	2845,00	10,122%	7
45	135	135	26,0	€ 3.744	104,36	150,85	125,68	305,50	10292,65	1293580,25	4867,70	9,821%	7
135	45	135	26,4	€ 3.958	97,75	150,85	136,30	32,00	9208,25	1255084,48	2844,60	10,122%	7
135	135	45	26,5	€ 3.966	97,75	150,85	136	128,70	9210,99	1255457,94	4145,10	10,119%	7
135	135	135	26,5	€ 3.966	97,75	150,85	136	128,70	9211,04	1255464,75	4154,10	10,119%	7

Tabella 8.17 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,860	Soluzione ottimale
90	0	0	0,166	
180	0	0	0,806	
0	90	0	0,211	
0	180	0	0,806	
0	0	90	0,860	Soluzione ottimale
0	0	180	0,860	Soluzione ottimale
45	45	45	0,494	
45	45	135	0,494	
45	135	45	0,496	
135	45	45	0,495	
45	135	135	0,496	
135	45	135	0,495	
135	135	45	0,495	
135	135	135	0,495	

Tabella 8.18 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	3,0	€ 305	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
90	0	0	3,0	€ 305	90	130	60	0,00	11332,00	679920,00	0,00	18,684%	3
180	0	0	3,0	€ 305	60	90	130	0,00	4295,39	558400,70	0,00	22,750%	10
0	90	0	3,0	€ 305	60	130	90	0,00	5457,67	491190,30	0,00	25,863%	3
0	180	0	3,0	€ 305	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
0	0	90	3,0	€ 305	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
0	0	180	3,0	€ 305	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
45	45	45	3,0	€ 305	104,36	150,85	125,68	0,00	10291,99	1293497,30	0,00	9,821%	6,5
45	45	135	3,0	€ 305	104,36	150,85	125,68	0,00	10291,99	1293497,30	0,00	9,821%	6,5
45	135	45	3,0	€ 305	104,36	150,85	125,68	0,00	10292,70	1293586,54	0,00	9,821%	6,5
135	45	45	3,0	€ 305	97,75	150,85	136,30	0,00	9208,19	1255076,30	0,00	10,122%	6,5
45	135	135	3,0	€ 305	104,36	150,85	125,68	0,00	10292,65	1293580,25	0,00	9,821%	6,5
135	45	135	3,0	€ 305	97,75	150,85	136,30	0,00	9208,25	1255084,48	0,00	10,122%	6,5
135	135	45	3,0	€ 305	97,75	150,85	136	0,00	9210,99	1255457,94	0,00	10,119%	6,5
135	135	135	3,0	€ 305	97,75	150,85	136	0,00	9211,04	1255464,75	0,00	10,119%	6,5

Tabella 8.19 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,959	Soluzione ottimale
90	0	0	0,110	
180	0	0	0,959	
0	90	0	0,183	
0	180	0	0,959	
0	0	90	0,959	
0	0	180	0,959	
45	45	45	0,477	
45	45	135	0,477	
45	135	45	0,477	
135	45	45	0,478	
45	135	135	0,477	
135	45	135	0,478	
135	135	45	0,478	
135	135	135	0,478	

Tabella 8.20 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	14,6	€ 29	60	90	130	5106,20	4295,41	558403,30	171422,90	22,750%	10
90	0	0	17,0	€ 32	90	130	60	9940,60	11332,00	679920,00	244129,20	18,684%	0
180	0	0	17,7	€ 32	60	90	130	4797,50	4295,39	558400,70	258502,80	22,750%	10
0	90	0	19,0	€ 34	60	130	90	9137,50	5457,67	491190,30	298746,00	25,863%	0
0	180	0	17,7	€ 32	60	90	130	4797,50	4295,41	558403,30	258461,70	22,750%	10
0	0	90	14,6	€ 29	60	90	130	5106,20	4295,41	558403,30	171423,10	22,750%	10
0	0	180	14,6	€ 29	60	90	130	5106,20	4295,41	558403,30	171427,40	22,750%	10
45	45	45	10,7	€ 24	104,36	150,85	125,68	1201,40	10291,99	1293497,30	62794,30	9,821%	5
45	45	135	10,7	€ 24	104,36	150,85	125,68	1201,40	10291,99	1293497,30	62790,60	9,821%	5
45	135	45	9,5	€ 23	104,36	150,85	125,68	1227,80	10292,70	1293586,54	28811,30	9,821%	5
135	45	45	10,6	€ 24	97,75	150,85	136,30	963,10	9208,19	1255076,30	59255,30	10,122%	5
45	135	135	9,5	€ 23	104,36	150,85	125,68	1227,80	10292,65	1293580,25	28816,00	9,821%	5
135	45	135	10,6	€ 24	97,75	150,85	136,30	963,10	9208,25	1255084,48	59254,80	10,122%	5
135	135	45	9,5	€ 23	97,75	150,85	136	1139,60	9210,99	1255457,94	27989,10	10,119%	5
135	135	135	9,5	€ 23	97,75	150,85	136	1139,60	9211,04	1255464,75	27987,30	10,119%	5

Tabella 8.21 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,934	Soluzione ottimale
90	0	0	0,076	
180	0	0	0,902	
0	90	0	0,124	
0	180	0	0,902	
0	0	90	0,934	
0	0	180	0,934	
45	45	45	0,496	
45	45	135	0,496	
45	135	45	0,498	
135	45	45	0,496	
45	135	135	0,498	
135	45	135	0,496	
135	135	45	0,498	
135	135	135	0,498	

Tabella 8.22 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	8,0	€ 19	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
90	0	0	6,8	€ 16	90	130	60	0,00	11332,00	679920,00	0,00	18,684%	5
180	0	0	8,0	€ 19	60	90	130	0,00	4295,39	558400,70	0,00	22,750%	10
0	90	0	7,3	€ 17	60	130	90	0,00	5457,67	491190,30	0,00	25,863%	5
0	180	0	8,0	€ 19	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
0	0	90	8,0	€ 19	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
0	0	180	8,0	€ 19	60	90	130	0,00	4295,41	558403,30	0,00	22,750%	10
45	45	45	7,9	€ 19	104,36	150,85	125,68	0,00	10291,99	1293497,30	0,00	9,821%	7,5
45	45	135	7,9	€ 19	104,36	150,85	125,68	0,00	10291,99	1293497,30	0,00	9,821%	7,5
45	135	45	7,9	€ 19	104,36	150,85	125,68	0,00	10292,70	1293586,54	0,00	9,821%	7,5
135	45	45	8,1	€ 20	97,75	150,85	136,30	0,00	9208,19	1255076,30	0,00	10,122%	7,5
45	135	135	7,9	€ 19	104,36	150,85	125,68	0,00	10292,65	1293580,25	0,00	9,821%	7,5
135	45	135	8,1	€ 20	97,75	150,85	136,30	0,00	9208,25	1255084,48	0,00	10,122%	7,5
135	135	45	8,1	€ 20	97,75	150,85	136	0,00	9210,99	1255457,94	0,00	10,119%	7,5
135	135	135	8,1	€ 20	97,75	150,85	136	0,00	9211,04	1255464,75	0,00	10,119%	7,5

Tabella 8.23 Raccolta dati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,902	
90	0	0	0,173	
180	0	0	0,902	Soluzione ottimale
0	90	0	0,257	
0	180	0	0,902	
0	0	90	0,902	
0	0	180	0,902	
45	45	45	0,450	
45	45	135	0,450	
45	135	45	0,450	
135	45	45	0,451	
45	135	135	0,450	
135	45	135	0,451	
135	135	45	0,451	
135	135	135	0,451	

Tabella 8.24 Risultati caso di studio 2 v2 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
90	0	0	5,8	€ 20	100	100	15	4731,50	5343,83	80157,45	14029,70	98,164%	10
180	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	90	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	180	0	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	0	90	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
0	0	180	6,6	€ 20	15	100	100	1644,30	1499,23	149923,00	19505,50	52,484%	4
45	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,20	5008,59	467652,05	8219,00	16,826%	7
45	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,20	5008,57	467650,18	8219,30	16,826%	7
45	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	314,30	5008,60	467652,98	12199,40	16,826%	7
135	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,80	5008,60	467652,98	8266,80	16,826%	7
45	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	314,30	5008,59	467652,05	12199,40	16,826%	7
135	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	217,80	5008,62	467654,85	8267,50	16,826%	7
135	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	315,00	5008,58	467651,11	12347,40	16,826%	7
135	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	315,00	5008,59	467652,05	12347,70	16,826%	7

Tabella 8.25 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,158	Soluzione ottimale
90	0	0	1,000	
180	0	0	0,158	
0	90	0	0,158	
0	180	0	0,158	
0	0	90	0,158	
0	0	180	0,158	
45	45	45	0,430	
45	45	135	0,430	
45	135	45	0,429	
135	45	45	0,430	
45	135	135	0,429	
135	45	135	0,430	
135	135	45	0,429	
135	135	135	0,429	

Tabella 8.26 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718 scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
90	0	0	2,8	€ 243	100	100	15	0,00	5343,83	80157,45	0,00	98,164%	10
180	0	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	90	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	180	0	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	0	90	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
0	0	180	2,8	€ 243	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	3
45	45	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	6,5
45	45	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,57	467650,18	0,00	16,826%	6,5
45	135	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	6,5
135	45	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	6,5
45	135	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	6,5
135	45	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,62	467654,85	0,00	16,826%	6,5
135	135	45	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,58	467651,11	0,00	16,826%	6,5
135	135	135	2,8	€ 243	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	6,5

Tabella 8.27 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,128	
90	0	0	1,000	Soluzione ottimale
180	0	0	0,128	
0	90	0	0,128	
0	180	0	0,128	
0	0	90	0,128	
0	0	180	0,128	
45	45	45	0,453	
45	45	135	0,453	
45	135	45	0,453	
135	45	45	0,453	
45	135	135	0,453	
135	45	135	0,453	
135	135	45	0,453	
135	135	135	0,453	

Tabella 8.28 Risultati caso di studio 1v1 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316 scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	0,000%	0
90	0	0	5,8	€ 20	100	100	15	4872,00	5343,83	80157,45	14411,40	0,000%	10
180	0	0	6,6	€ 20	15	100	100	2312,00	1499,23	149923,00	28277,70	0,000%	0
0	90	0	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	0,000%	0
0	180	0	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	0,000%	0
0	0	90	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	0,000%	0
0	0	180	6,6	€ 20	15	100	100	2313,90	1499,23	149923,00	28290,70	0,000%	0
45	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1775,30	5008,59	467652,05	49158,20	0,000%	5
45	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1775,30	5008,57	467650,18	49158,40	0,000%	5
45	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1898,80	5008,60	467652,98	54472,70	0,000%	5
135	45	45	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1774,10	5008,60	467652,98	49139,50	0,000%	5
45	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1898,80	5008,59	467652,05	54472,90	0,000%	5
135	45	135	7,3	€ 21	64,15	100,84	93,37	1774,10	5008,62	467654,85	49138,90	0,000%	5
135	135	45	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1899,60	5008,58	467651,11	54516,20	0,000%	5
135	135	135	7,5	€ 21	64,15	100,84	93,37	1899,60	5008,59	467652,05	54516,80	0,000%	5

Tabella 8.29 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,076	
90	0	0	1,000	Soluzione ottimale
180	0	0	0,076	
0	90	0	0,076	
0	180	0	0,076	
0	0	90	0,076	
0	0	180	0,076	
45	45	45	0,484	
45	45	135	0,484	
45	135	45	0,484	
135	45	45	0,484	
45	135	135	0,484	
135	45	135	0,484	
135	135	45	0,484	
135	135	135	0,484	

Tabella 8.30 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
90	0	0	6,0	€ 11	100	100	15	0,00	5343,83	80157,45	0,00	98,164%	10
180	0	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	90	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	180	0	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	0	90	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
0	0	180	7,4	€ 15	15	100	100	0,00	1499,23	149923,00	0,00	52,484%	5
45	45	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	7,5
45	45	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,57	467650,18	0,00	16,826%	7,5
45	135	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	7,5
135	45	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,60	467652,98	0,00	16,826%	7,5
45	135	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	7,5
135	45	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,62	467654,85	0,00	16,826%	7,5
135	135	45	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,58	467651,11	0,00	16,826%	7,5
135	135	135	7,3	€ 15	64,15	100,84	93,37	0,00	5008,59	467652,05	0,00	16,826%	7,5

Tabella 8.31 Raccolta dati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,191	
90	0	0	1,000	Soluzione ottimale
180	0	0	0,191	
0	90	0	0,191	
0	180	0	0,191	
0	0	90	0,191	
0	0	180	0,191	
45	45	45	0,396	
45	45	135	0,396	
45	135	45	0,396	
135	45	45	0,396	
45	135	135	0,396	
135	45	135	0,396	
135	135	45	0,396	
135	135	135	0,396	

Tabella 8.32 Risultati caso di studio 1 v1 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	708,10	743,45	29239,89	6246,20	14,046%	10
90	0	0	6,4	€ 1.169	37,94	39,33	38,00	76,50	758,79	28834,02	219,20	14,244%	4
180	0	0	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	707,00	743,40	29237,92	6221,40	14,047%	10
0	90	0	7,6	€ 1.225	38,00	39,33	37,94	663,60	891,95	33840,58	7082,50	12,136%	10
0	180	0	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	707,00	743,40	29237,92	6221,40	14,047%	10
0	0	90	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	708,10	743,41	29238,32	6246,10	14,047%	10
0	0	180	7,4	€ 1.244	37,94	38,00	39,33	708,10	743,41	29238,32	6246,10	14,047%	10
45	45	45	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	372,10	979,98	41335,56	3289,80	9,936%	7
45	45	135	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	372,10	979,97	41335,13	3226,70	9,936%	7
45	135	45	7,6	€ 1.261	38,95	45,84	39,80	363,40	941,96	37490,01	4046,10	10,955%	7
135	45	45	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	372,10	979,99	41335,98	3256,00	9,936%	7
45	135	135	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	370,50	979,99	41335,98	3265,70	9,936%	7
135	45	135	7,7	€ 1.311	38,95	45,97	42,18	370,50	979,99	41335,98	3226,70	9,936%	7
135	135	45	7,6	€ 1.261	38,95	45,84	39,80	361,70	941,97	37490,41	4100,70	10,955%	7
135	135	135	7,6	€ 1.261	38,95	45,84	39,80	361,70	941,97	37490,41	4100,60	10,955%	7

Tabella 8.33 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718
scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,956	
90	0	0	0,112	
180	0	0	0,956	Soluzione ottimale
0	90	0	0,932	
0	180	0	0,956	
0	0	90	0,956	
0	0	180	0,956	
45	45	45	0,492	
45	45	135	0,492	
45	135	45	0,496	
135	45	45	0,492	
45	135	135	0,492	
135	45	135	0,492	
135	135	45	0,496	
135	135	135	0,496	

Tabella 8.34 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLM e materiale Inconel 718
scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,45	29239,89	0,00	14,046%	10
90	0	0	2,5	€ 149	37,94	39,33	38,00	0,00	758,79	28834,02	0,00	14,244%	3
180	0	0	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	90	0	2,5	€ 149	38,00	39,33	37,94	0,00	891,95	33840,58	0,00	12,136%	10
0	180	0	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	0	90	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
0	0	180	2,5	€ 149	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
45	45	45	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,98	41335,56	0,00	9,936%	6,5
45	45	135	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,97	41335,13	0,00	9,936%	6,5
45	135	45	2,5	€ 149	38,95	45,84	39,80	0,00	941,96	37490,01	0,00	10,955%	6,5
135	45	45	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	6,5
45	135	135	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	6,5
135	45	135	2,5	€ 149	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	6,5
135	135	45	2,5	€ 149	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	6,5
135	135	135	2,5	€ 149	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	6,5

Tabella 8.35 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316
scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,996	
90	0	0	0,083	
180	0	0	0,996	Soluzione ottimale
0	90	0	0,958	
0	180	0	0,996	Soluzione ottimale
0	0	90	0,996	
0	0	180	0,996	
45	45	45	0,496	
45	45	135	0,496	
45	135	45	0,498	
135	45	45	0,496	
45	135	135	0,496	
135	45	135	0,496	
135	135	45	0,498	
135	135	135	0,498	

Tabella 8.36 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa DED e materiale AISI 316
scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1029,30	743,45	29239,89	8648,70	14,046%	10
90	0	0	0,9	€ 15,0	37,94	39,33	38,00	76,50	758,79	28834,02	219,20	14,244%	0
180	0	0	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1028,60	743,40	29237,92	8622,70	14,047%	10
0	90	0	1,3	€ 15,5	38,00	39,33	37,94	1079,10	891,95	33840,58	10623,20	12,136%	10
0	180	0	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1028,60	743,40	29237,92	8622,90	14,047%	10
0	0	90	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1029,30	743,41	29238,32	8648,70	14,047%	10
0	0	180	1,2	€ 15,4	37,94	38,00	39,33	1029,30	743,41	29238,32	8648,90	14,047%	10
45	45	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1019,50	979,98	41335,56	9804,90	9,936%	5
45	45	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1019,50	979,97	41335,13	9804,80	9,936%	5
45	135	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,84	39,80	893,90	941,96	37490,01	9931,40	10,955%	5
135	45	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1020,60	979,99	41335,98	9814,50	9,936%	5
45	135	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1020,60	979,99	41335,98	9814,50	9,936%	5
135	45	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,97	42,18	1020,60	979,99	41335,98	9814,50	9,936%	5
135	135	45	1,3	€ 15,4	38,95	45,84	39,80	894,80	941,97	37490,41	9964,80	10,955%	5
135	135	135	1,3	€ 15,4	38,95	45,84	39,80	894,80	941,97	37490,41	9965,30	10,955%	5

Tabella 8.37 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,962	
90	0	0	0,070	
180	0	0	0,962	Soluzione ottimale
0	90	0	0,947	
0	180	0	0,962	
0	0	90	0,962	
0	0	180	0,962	
45	45	45	0,497	
45	45	135	0,497	
45	135	45	0,498	
135	45	45	0,497	
45	135	135	0,497	
135	45	135	0,497	
135	135	45	0,498	
135	135	135	0,498	

Tabella 8.38 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa FDM e materiale ABS scenario resistenza meccanica elevata

Criterio			Tempo totale processo	Costo totale processo	Larghezza su piatto	Lunghezza su piatto	Altezza	Area superfici overhang	Area proiettata nel piatto di stampa	Volume ingombro	Volume dei supporti	Packing density	Resistenza meccanica
Unità di misura			ore	EUR	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	%	
x	y	z											
0	0	0	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,45	29239,89	0,00	14,046%	10
90	0	0	6,22	€ 7,11	37,94	39,33	38,00	0,00	758,79	28834,02	0,00	14,244%	5
180	0	0	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	90	0	6,22	€ 7,11	38,00	39,33	37,94	0,00	891,95	33840,58	0,00	12,136%	10
0	180	0	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,40	29237,92	0,00	14,047%	10
0	0	90	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
0	0	180	6,25	€ 7,19	37,94	38,00	39,33	0,00	743,41	29238,32	0,00	14,047%	10
45	45	45	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,98	41335,56	0,00	9,936%	7,5
45	45	135	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,97	41335,13	0,00	9,936%	7,5
45	135	45	6,25	€ 7,22	38,95	45,84	39,80	0,00	941,96	37490,01	0,00	10,955%	7,5
135	45	45	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	7,5
45	135	135	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	7,5
135	45	135	6,29	€ 7,35	38,95	45,97	42,18	0,00	979,99	41335,98	0,00	9,936%	7,5
135	135	45	6,25	€ 7,22	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	7,5
135	135	135	6,25	€ 7,22	38,95	45,84	39,80	0,00	941,97	37490,41	0,00	10,955%	7,5

Tabella 8.39 Raccolta dati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata

x	y	z	Risultati	Valutazione
0	0	0	0,993	
90	0	0	0,119	
180	0	0	0,993	Soluzione ottimale
0	90	0	0,939	
0	180	0	0,993	Soluzione ottimale
0	0	90	0,993	
0	0	180	0,993	
45	45	45	0,491	
45	45	135	0,491	
45	135	45	0,495	
135	45	45	0,491	
45	135	135	0,491	
135	45	135	0,491	
135	135	45	0,495	
135	135	135	0,495	

Tabella 8.40 Risultati caso di studio Penta valve v14 con tecnologia di stampa SLS e materiale Poliammide scenario resistenza meccanica elevata