



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA MECCANICA INDUSTRIALE

**DIREZIONE DI STAMPA DI COMPONENTI NELLA
MANIFATTURA ADDITIVA: REVISIONE DELLA
LETTERATURA**

**PART BUILD ORIENTATION IN ADDITIVE
MANUFACTURING: LITERATURE REVIEW**

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

NICOLINO BELLACHIOMA

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

I. Sommario

I. Sommario	i
II. Elenco delle figure	iii
III. Elenco delle tabelle	iv
Abstract	1
1 Introduzione	2
2 Stato dell'arte	4
2.1 Cenni storici ed evoluzione della produzione additiva	4
3 Metodo	12
3.1 Prisma Flow Diagram	12
3.2 Procedimento di revisione	14
3.2.1 Scelta del database e strategia di ricerca	15
3.2.2 Prima fase di selezione	16
3.2.3 Seconda fase di selezione	18
4 Caso studio	19
4.1 Keywords e sinonimi	19
4.2 Stringhe utilizzate e classificazione dei dati	21
4.3 Fase di screening	23
5 Analisi e discussione dei risultati	28
5.1 Analisi rispetto all'anno di pubblicazione	29
5.2 Analisi rispetto alla casa editrice e alla rivista	30
5.3 Analisi degli articoli	32
5.3.1 Clustering dei criteri di analisi	34
5.3.2 Tecnologia di riferimento	35
5.3.3 Criterio di orientamento	38
5.3.4 Metodo di ottimizzazione e utilizzo di algoritmi	53
5.3.5 Perimetro del metodo	57
6 Conclusioni	63
7 Bibliografia	65
8 Appendice	71
8.1 Elenco delle stringhe utilizzate per la ricerca su Scopus	71

II. Elenco delle figure

Figura 2.1 Esempio di configurazione per la tecnologia SL.....	6
Figura 2.2 Esempio di configurazione per la tecnologia SLS	7
Figura 2.3 Esempio di configurazione per la tecnologia FDM	9
Figura 3.1 Prisma Flow Diagram che comprende studi precedenti, ricerche da database, registri ed altre fonti.....	13
Figura 4.1 Esempio di ricerca priva di risultati: stringa 26	21
Figura 4.2 Esempio di ricerca che ha prodotto risultati: Stringa 1	22
Figura 4.3 Particolare del foglio di lavoro utilizzato per la fase di screening	22
Figura 4.4 Estratto del database dei dati "open access" filtrati sulle keywords	24
Figura 4.5 Articolo accessibile direttamente in Scopus	25
Figura 4.6 Articolo accessibile dal link di pubblicazione	25
Figura 4.7 Esempio di articolo non accessibile	26
Figura 4.8 Diagramma di flusso del metodo PRISMA applicato al caso di studio.....	27
Figura 5.1 Grafico della distribuzione degli articoli per anno di pubblicazione	29
Figura 5.2 Grafico relativo alle tecnologie di riferimento negli articoli selezionati.....	35
Figura 5.3 Parametri assegnati alle diverse tecnologie nell'articolo [21].....	37
Figura 5.4 Grafico dei criteri di orientamento utilizzati negli articoli selezionati	39
Figura 5.5 Ottimizzazione considerando la minimizzazione di superfici disconnesse. Nella configurazione a) si ha una riduzione del tempo di produzione del 69% rispetto alla configurazione b)	41
Figura 5.6 Particolare dell'articolo [52] per definire la zone di deposizione, la zona di volo, il contorno e l'inversione di direzione	42
Figura 5.7 Staicase effect	45
Figura 5.8 Errore volumetrico.....	46
Figura 5.9 Tecnologia FDM con piattaforma di supporto flessibile	50
Figura 5.10 Risultati della correzione del modello per l'articolo [10]. Da sinistra a destra: input dei modelli non corretti con le corrispondenti stampe non riuscite, modelli corretti, e le loro stampe di successo. Il materiale aggiunto e rimosso viene evidenziato.	52

III. Elenco delle tabelle

Tabella 3-1 Fasi del metodo utilizzato nel processo di revisione.....	15
Tabella 5-1 Case editrici di provenienza degli articoli	30
Tabella 5-2 Riviste di provenienza degli articoli	31
Tabella 8-1 Elenco articoli selezionati e clustering dei criteri di analisi.....	79

Abstract

La stampa additiva, comunemente nota come stampa 3D, è una tecnologia innovativa che crea oggetti tridimensionali mediante l'aggiunta successiva di strati di materiale, rappresentando un cambiamento significativo rispetto ai metodi di produzione tradizionali. Questo processo inizia con la progettazione digitale tramite software di modellazione 3D e la successiva suddivisione del modello in strati sottili attraverso il processo di slicing. La stampa 3D offre vantaggi significativi, tra cui la riduzione del materiale utilizzato, la libertà di progettazione e la capacità di creare forme complesse. Tuttavia, la determinazione dell'orientamento di stampa è cruciale per ottimizzare le proprietà meccaniche, la qualità superficiale e l'efficienza del processo.

L'obiettivo di questa tesi è esaminare come il problema dell'orientamento di stampa sia stato affrontato nella letteratura scientifica, analizzando le metodologie proposte, i criteri di ottimizzazione, i metodi e gli algoritmi utilizzati. Utilizzando il metodo PRISMA per la revisione della letteratura e il database Scopus, sono stati selezionati e analizzati 60 articoli, evidenziando similitudini e particolarità tra le diverse metodologie.

L'analisi mette a disposizione degli utenti un gran numero di informazioni sui criteri di orientamento e i metodi di ottimizzazione maggiormente utilizzati negli articoli. Nonostante le limitazioni dovute alla selezione del database e all'accessibilità degli articoli, questa tesi fornisce una panoramica utile per orientarsi nella scelta dei criteri di ottimizzazione e per sviluppare metodi che considerino i vari fattori influenzanti il processo di stampa additiva. Future ricerche potrebbero ampliare l'analisi includendo ulteriori database e strategie per superare le limitazioni di accesso alle pubblicazioni, ottenendo così una visione più completa del panorama scientifico.

1 Introduzione

La stampa additiva, comunemente nota come stampa 3D, è una tecnologia di produzione innovativa che crea oggetti tridimensionali mediante l'aggiunta successiva di strati di materiale. Questa tecnologia rappresenta un cambiamento significativo rispetto ai metodi di produzione tradizionali, che spesso implicano la rimozione di materiale (come la fresatura e la tornitura) o la formazione di oggetti attraverso stampi.

La stampa 3D consente di creare oggetti partendo da un modello CAD 3D ottenuto mediante apposito programma o tramite scansione 3D. Questo aspetto rende tale tecnologia particolarmente innovativa rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali in quanto consente di creare forme complesse lasciando massima libertà al progettista o disegnatore.

Rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali, la stampa additiva offre significativi vantaggi in termini di riduzione del materiale utilizzato. Nella produzione strato per strato, infatti, si utilizza solo la quantità di materiale necessaria per ogni singolo strato. Sebbene in alcuni casi sia necessario aggiungere strati di supporto, questi vengono eliminati durante le fasi di rifinitura, portando comunque a un risparmio complessivo di materiale.

Il processo di produzione additiva inizia con la progettazione digitale tramite software di modellazione 3D. Successivamente, il modello viene "affettato" in strati molto sottili attraverso un processo chiamato slicing, dove ogni strato rappresenta una sezione orizzontale dell'oggetto finale. Infine, una stampante 3D costruisce l'oggetto, depositando il materiale esattamente dove richiesto dalle specifiche del modello digitale.

Molti fattori devono essere considerati e determinati prima della fase di produzione, tra i quali uno dei più importanti è l'orientamento di stampa. La letteratura scientifica dimostra infatti che questo aspetto è cruciale per le proprietà meccaniche finali, la durata e il costo del processo, la qualità superficiale dell'oggetto stampato, l'efficienza del processo e l'ottimizzazione del consumo di materiale.

La scelta dell'orientamento di stampa richiede un'elevata competenza da parte degli operatori, i quali spesso si basano più sulla propria esperienza e conoscenza che sulle informazioni presenti in letteratura o sui sistemi CAM disponibili sul mercato per prendere decisioni.

Lo sviluppo di un metodo efficace per determinare il miglior orientamento di stampa è cruciale per ottimizzare questa tecnologia. Questo processo deve iniziare con una revisione approfondita della letteratura scientifica, in modo da raccogliere il maggior numero possibile di informazioni utili.

L'obiettivo di questa tesi è esaminare come il problema dell'orientamento di stampa sia stato affrontato nel corso degli anni nella letteratura scientifica. Verranno analizzate le caratteristiche principali dei vari metodi proposti, comprese le tecnologie considerate, i criteri di ottimizzazione, i metodi di ottimizzazione, gli algoritmi utilizzati e i parametri impiegati.

In particolare, è stata condotta un'analisi del database documentale "Scopus" utilizzando il metodo PRISMA per la revisione della letteratura. Questo approccio garantisce trasparenza, riproducibilità e la possibilità di aggiornamenti continui nel tempo.

Questa analisi offre una panoramica completa degli studi effettuati sugli effetti della direzione di stampa e sui criteri utilizzati per la sua ottimizzazione, fornendo una solida base per sviluppare un metodo che consideri i vari fattori che influenzano l'intero processo di stampa additiva.

2 Stato dell'arte

La letteratura scientifica abbonda di articoli che trattano l'orientamento di stampa, i suoi effetti sull'intero processo e i criteri per la sua scelta e ottimizzazione. Sebbene la maggior parte degli articoli abbiano carattere generale e non distinguano le diverse tecnologie, si ritiene opportuno ripercorrere brevemente la storia della nascita della produzione additiva e l'evoluzione della tecnologia per fornire un contesto completo.

2.1 Cenni storici ed evoluzione della produzione additiva

Nel 1945, il visionario scrittore di fantascienza Murray Leinster descrisse nel suo racconto "Things Pass By" un processo innovativo per creare oggetti, dove la plastica veniva estrusa nel vuoto da un braccio meccanico che seguiva disegni scansionati tramite fotocellule.

Leinster prevedeva che questo metodo avrebbe potuto eliminare la necessità delle macchine tradizionali grazie alla sua eccezionale precisione, consentendo persino la costruzione di navi e case. Sebbene tale tecnologia non esistesse ancora all'epoca, la sua intuizione era sorprendentemente vicina alle future realizzazioni nel campo della produzione additiva.

I primi tentativi di sviluppare un sistema per creare oggetti mediante deposizione stratificata di materiale risalgono al 1971, quando Johannes F. Gottwald brevettò il "Liquid Metal Recorder". Questo dispositivo era in grado di estrarre metallo liquido e formare oggetti stratificando il materiale secondo un disegno predeterminato. Il Liquid Metal Recorder rappresenta il primo dispositivo per la prototipazione rapida e un pionieristico tentativo di estendere il concetto di "stampa" oltre l'inchiostro, utilizzando l'iniezione di materiale.

Nel 1981, Hideo Kodama pubblicò un articolo in cui propose due possibili varianti del dispositivo brevettato da Gottwald, sostituendo il metallo liquido con plastiche termoindurenti. Kodama riuscì a stampare un modello composto da strati, ciascuno

dei quali rappresentava una sezione trasversale della struttura. Questo processo consentiva la prototipazione rapida attraverso la fotopolimerizzazione dei materiali utilizzati.

Nonostante l'ampia risonanza e la presentazione della domanda di brevetto, Kodama non completò l'iter, rinunciando così anche alla commercializzazione della sua invenzione.

Nel 1984 Bill Masters brevettò il suo "computer automated manufacturing process and system", che è tutt'ora listato agli uffici brevetti statunitensi come il primo brevetto riguardante la stampa 3D, questo fu il primo brevetto di tre che costituiscono le basi fondanti della manifattura additiva.

Solo poche settimane dopo, tre ricercatori francesi, Alain Le Méhauté, Olivier de Witte e Jean Claude André, ottennero il primo brevetto relativo alla stereolitografia. La svolta avvenne quando decisero di utilizzare un solo fotone anziché due nel processo di fotopolimerizzazione dei monomeri liquidi. Inoltre, durante i loro esperimenti, compresero l'importanza di utilizzare un supporto per modellare i materiali polimerizzati con un fascio di luce UV.

Sempre nello stesso anno Chuck Hull depositò il brevetto di un sistema di produzione a mezzo di stereolitografia. Nel 1986 Hull fu cofondatore della società "3D System" e nel 1987 commercializzò la prima stampante denominata SLA-1 basata sull'utilizzo di un laser UV per polimerizzare in maniera selettiva il materiale fotosensibile punto per punto, strato per strato fino ad ottenere un oggetto fisico sulla base di disegni di un file CAD.

L'evoluzione tecnologica apportata da Hull, oltre all'ideazione e al perfezionamento della stereolitografia, fu la possibilità di creare modelli 3D attraverso dati digitali, ossia tramite file STL (Standard Triangulation Language). L'introduzione dei concetti di *slicing*, calcolo del riempimento delle parti stampate e file .STL posarono le basi per la manifattura additiva odierna e sono tutt'oggi di uso comune tra gli utilizzatori di questa tecnologia. Il sistema della stereolitografia permetteva di abbattere i tempi di fabbricazione di oggetti complessi, perciò la stampa 3D era inizialmente conosciuta con il nome di prototipazione rapida.

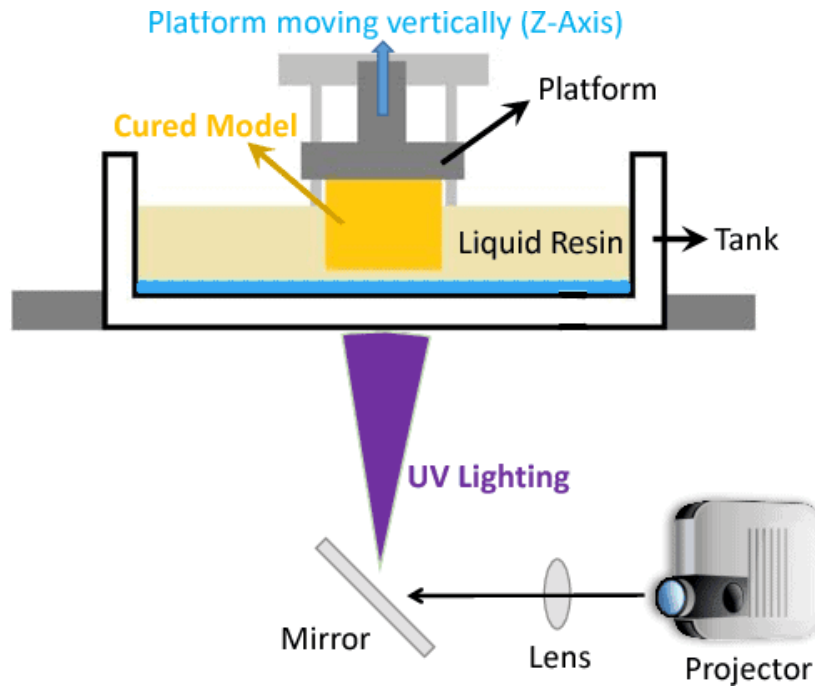


Figura 2.1 Esempio di configurazione per la tecnologia SL

Una stampante SLA è composta da quattro sezioni primarie: un serbatoio riempito di resina liquida polimerizzabile, una piattaforma perforata immersa nel serbatoio di resina che può muoversi generalmente lungo l'asse Z, un laser ultravioletto ad alta potenza e un'unità di controllo computerizzata che controlla sia il movimento della piattaforma che movimenti del fascio UV.

Il laser UV, diretto secondo le coordinate definite in base al progetto, stende il primo strato della stampa nella resina fotosensibile. In qualsiasi punto colpito dal laser, il liquido si solidifica. Dopo il primo strato, la piattaforma viene sollevata in base allo spessore dello strato (circa 0,1 mm) e la resina aggiuntiva viene lasciata scorrere al di sotto della porzione già stampata. Il laser, quindi, solidifica il successivo strato e il processo viene ripetuto fino al completamento dell'intera sezione. La resina che non viene toccata dal laser rimane e può essere riutilizzata. Dopo aver completato la sezione, la piattaforma si solleva dal serbatoio di resina e la resina in eccesso viene scaricata. Alla fine del processo, il modello viene rimosso dalla piattaforma, lavato dalla resina in eccesso con alcool e quindi posto in un forno UV per l'indurimento finale. La polimerizzazione post-stampa consente agli oggetti

di raggiungere la massima resistenza possibile e diventare più stabili. Le strutture di supporto vengono rimosse durante il processo di post-elaborazione.

Nel 1987 Carl Deckard brevettò una tecnologia del tutto innovativa che invece di trasformare materiali liquidi in solidi si basava sulla sinterizzazione laser selettiva (Selective Laser Sintering o SLS), cioè aggregava polveri termoplastiche (il nylon) utilizzando un raggio laser.

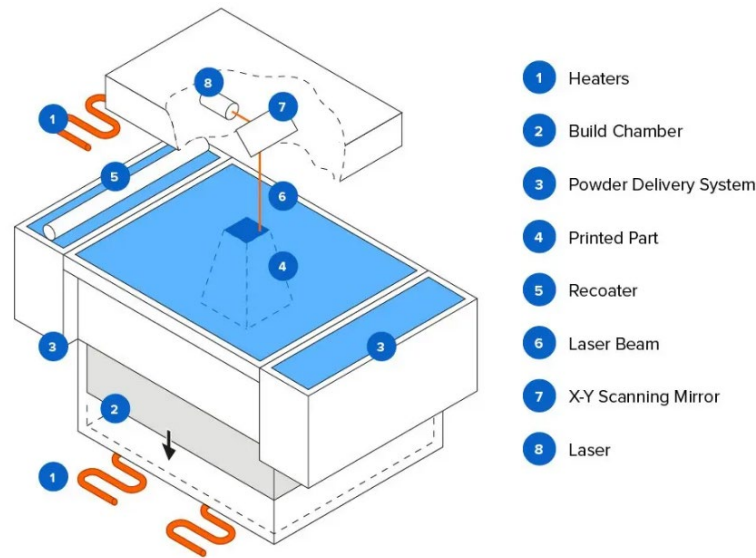


Figura 2.2 Esempio di configurazione per la tecnologia SLS

In una stampante SLS un sottile strato di polvere viene depositato sulla piattaforma all'interno della camera di stampa. La stampante riscalda preventivamente la polvere fino al raggiungimento di una temperatura di poco inferiore al punto di fusione del materiale grezzo. In questo modo, il laser può facilmente aumentare la temperatura di aree specifiche del letto di polvere, mentre traccia il modello per realizzare una parte solida.

Il laser scansiona una sezione trasversale del modello 3D, riscaldando la polvere appena al di sotto o esattamente al punto di fusione del materiale. Ciò consente di fondere le particelle tra loro in maniera meccanica, così da creare parti solide. La polvere non fusa sostiene le parti durante la stampa ed elimina la necessità di strutture di supporto dedicate. La piattaforma si abbassa leggermente all'interno

della camera di stampa, di solito intorno ai 50-200 micron, e il processo si ripete per ogni strato, fino al completamento delle parti.

Al completamento della stampa, la camera di stampa deve raffreddarsi leggermente all'interno dell'alloggiamento di stampa e successivamente al di fuori della stampante per garantire proprietà meccaniche ottimali ed evitare la deformazione delle parti.

Le parti completate devono essere rimosse dalla camera di stampa, separate e pulite dalla polvere in eccesso. La polvere può essere riciclata e le parti stampate possono essere sottoposte a ulteriore post-elaborazione mediante sabbiatura o lucidatura. Poiché la polvere non fusa sostiene le parti durante il processo di stampa, non sono necessarie ulteriori strutture di supporto. Ciò rende la SLS ideale per geometrie complesse che includono dettagli interni, sottosquadri, pareti sottili e dettagli in negativo.

Nel 1989, dopo aver casualmente ottenuto un oggetto composto da piccoli strati di plastica fusa con l'ausilio di una pistola a caldo, i coniugi Scott e Lisa Crump brevettarono una delle tecnologie oggi più utilizzate nel campo della manifattura additiva e cioè la modellazione a deposizione fusa (Fused Deposition Modeling o FDM). Nello stesso anno i Crump fondano la società Stratasys che divenne in breve tempo leader nel settore della manifattura additiva.

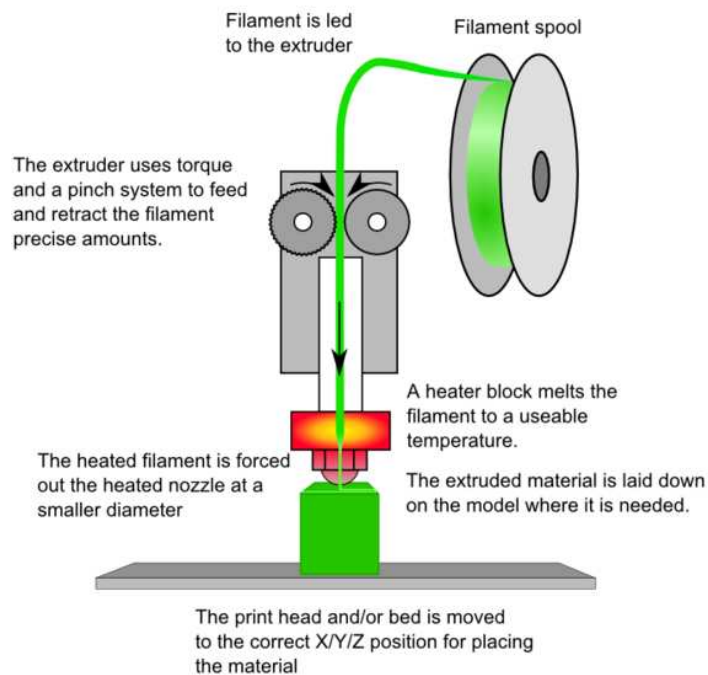


Figura 2.3 Esempio di configurazione per la tecnologia FDM

In una stampante FDM la bobina di filamento termoplastico scelto per la stampa viene dapprima caricata nella stampante 3D. Prima dell'avvio del processo di stampa è necessario che l'ugello raggiunga la temperatura necessaria alla fusione del materiale termoplastico.

Alla base dell'estrusione c'è un piatto dove viene costruito il prototipo, il sistema è a 3 assi X, Y e Z. Il materiale fuso viene depositato strato su strato e durante il processo si raffredda per dare solidità al modello. Quando uno strato è finito, la piattaforma si abbassa e l'estrusore passa alla costruzione dello strato successivo. Questo processo si ripete per tutta l'altezza del prototipo.

L'utilizzo di un materiale termoplastico consente agli oggetti creati di essere sciolti e raffreddati più volte, aspetto molto importante qualora i test da effettuare sul pezzo non possano prescindere da questa caratteristica.

Nel 1991 fu ideata da Michael Feygine e immessa sul mercato dalla Helisys Inc. la tecnologia di prototipazione rapida denominata LOM (Laminate Object Manufacturing). 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.

Nel 1994 la società Solidscape introdusse una stampante a cera, la ModelMaker. Questa tecnologia permetteva di ottenere un duplicato di uno stampo, di solito di metallo, come l'oro o l'argento. Questa tecnica di stampa viene oggi utilizzata soprattutto per produrre una grande quantità di pezzi personalizzati, indicati per replicare dei prodotti in ogni minimo dettaglio ed ha semplificato molto i processi di produzione, realizzando i prototipi in modo preciso e rapido.

Nel 2003 Arcam lanciò sul mercato un innovativo sistema di stampa per polveri metalliche, l'Electron Beam Melting (EBM). Questa tecnologia permette di ottenere oggetti metallici ad elevata resistenza andando a caricare i serbatoi della stampante con polvere metallica. Questa viene depositata in sottili strati che vengono preriscaldati prima di essere fusi dal fascio di elettroni. In particolare, questa fase garantisce un maggiore supporto alle aree di sbalzo del pezzo stampato in 3D. La macchina quindi ripete questi passaggi il numero di volte necessario a ottenere il pezzo intero.

Negli stessi anni venne alla luce anche un'altra tecnologia per la stampa di metalli come la SLM (Selective Laser Melting) di Eos. Questa stampante fa parte della famiglia delle tecnologia a letto di polvere o PBF e fonde le polveri metalliche in una massa solida ed omogenea grazie ad un laser ad altissima potenza, secondo il disegno 3D inserito.

Tra 2005 e 2006 vennero commercializzate le prime stampanti per uso hobbistico grazie a due progetti open source: il progetto RepRap e il progetto Fab@home.

Nel 2011, la scadenza del brevetto della tecnologia FDM rese le relative conoscenze accessibili al pubblico, fungendo da catalizzatore per la creatività e l'open sourcing. Oggi, questa tecnologia è utilizzata in una vasta gamma di applicazioni che vanno dalla prototipazione rapida alla produzione di componenti finali, grazie alla sua capacità di creare forme complesse con precisione e velocità. La manifattura additiva viene utilizzata in campo medico per la creazione di protesi, impianti medici e modelli anatomici per la pianificazione chirurgica, viene utilizzata nel campo delle costruzioni, dell'industria alimentare e farmaceutica e sta prendendo sempre più piede nelle industrie aerospaziale e automobilistica sfruttando la stampa 3D per

produrre componenti leggeri e resistenti, migliorando l'efficienza e le prestazioni dei veicoli.

Altre tecnologie presenti in questo elaborato sono la WAAM e la DED. La Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) appartiene alla categoria delle tecnologie di stampa 3D a deposizione diretta di energia (DED). La tecnologia DED è una tecnica avanzata di stampa 3D in metallo che prevede il deposito di materiale metallico, che può essere in polvere o in filo, su un piano di lavoro mediante un ugello montato su un braccio multiasse. Durante questo processo, una fonte di energia altamente focalizzata, come un raggio laser o elettronico, viene utilizzata per fondere il materiale metallico mentre viene depositato, garantendo la solidificazione immediata del materiale e la costruzione strato per strato dell'oggetto desiderato.

Nel caso specifico della WAAM, l'energia necessaria per fondere il materiale viene fornita da un arco elettrico, una tecnica che si ispira alla saldatura ad arco tradizionale. Questo metodo utilizza un filo metallico come materiale di apporto, che viene fuso dall'arco elettrico e depositato sul piano di lavoro. Il braccio multiasse muove l'ugello in modo preciso, consentendo la deposizione controllata del materiale e la costruzione di geometrie complesse.

La WAAM si distingue per la sua capacità di produrre componenti metallici di grandi dimensioni e di alta qualità, con un'efficienza superiore rispetto ad altre tecniche di stampa 3D in metallo. L'uso dell'arco elettrico come fonte di calore offre vantaggi significativi in termini di velocità di deposizione e flessibilità nei materiali utilizzati. Tuttavia, come tutte le tecnologie DED, la WAAM richiede un controllo rigoroso dei parametri di processo per garantire la qualità del prodotto finale e minimizzare le imperfezioni.

3 Metodo

In questo capitolo verrà descritto il principio che ha guidato la scelta del metodo di ricerca utilizzato per la revisione sistematica della letteratura scientifica riguardante l'orientamento di stampa e la sua ottimizzazione. Verranno inoltre spiegati i criteri adottati per la selezione degli articoli considerati pertinenti agli obiettivi prefissati per questo elaborato.

Il processo di revisione sistematica è stato svolto cercando di mantenere un livello di oggettività adeguato e si è basato sul PRISMA FLOW DIAGRAM.

3.1 Prisma Flow Diagram

Una revisione sistematica è una metodologia di ricerca utilizzata per raccogliere, analizzare e sintetizzare in modo critico tutte le evidenze disponibili su una determinata questione o argomento, seguendo un approccio strutturato e rigoroso. L'obiettivo principale di una revisione sistematica è fornire una panoramica esaustiva delle conoscenze esistenti, identificando eventuali lacune e guidando future ricerche.

Alla base di una revisione c'è l'identificazione chiara di un determinato argomento che guida l'intero processo e il metodo con cui il processo viene condotto.

Il metodo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) è una linea guida utilizzata per migliorare la trasparenza e la completezza dei rapporti delle revisioni sistematiche e delle meta-analisi. PRISMA è stato sviluppato per aiutare i ricercatori a riportare in modo chiaro e completo i processi e i risultati delle loro revisioni, consentendo così ai lettori di valutare la validità e l'affidabilità delle conclusioni tratte.

Il diagramma di flusso permette di delineare le diverse fasi del processo di ricerca, evidenziando in particolare il numero iniziale di articoli, il numero di articoli esclusi nelle varie fasi di selezione con le relative motivazioni, e il numero di articoli inclusi nella revisione sistematica e nella meta-analisi.

Il PRISMA FLOW DIAGRAM è composto da 3 macro fasi:

- 1. Identificazione:** in questa fase vengono individuati gli articoli candidati alla revisione sistematica partendo dagli studi inclusi nella ricerca, dai database consultati e da eventuali fonti aggiuntive.
- 2. Screening:** in questa fase gli articoli vengono valutati per la selezione e l'eleggibilità. I criteri di inclusione ed esclusione devono essere chiaramente definiti e riproducibili, e le motivazioni per l'esclusione devono essere documentate.
- 3. Inclusione:** in questa fase vengono elencati gli articoli che hanno superato la fase di eleggibilità e che saranno inclusi nella revisione sistematica.

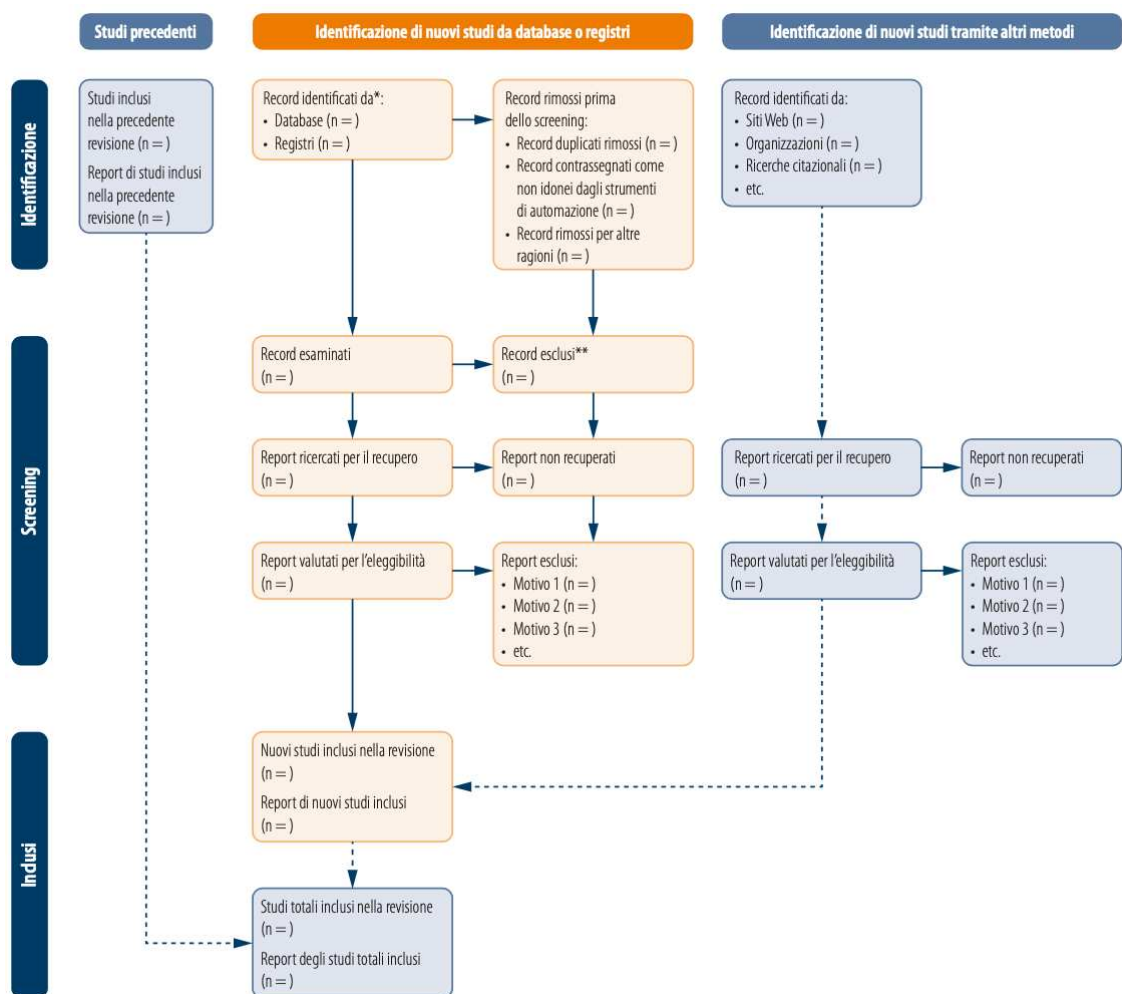


Figura 3.1 Prisma Flow Diagram che comprende studi precedenti, ricerche da database, registri ed altre fonti

Nella versione più dettagliata del diagramma di flusso PRISMA, i documenti della fase iniziale di identificazione derivano da studi precedentemente condotti sullo stesso tema, da documenti presenti in database specifici e da altri contenitori informativi. Il metodo PRISMA è infatti particolarmente indicato anche per revisioni sistematiche che si aggiornano nel tempo.

Nella prima fase è possibile rimuovere i duplicati generati durante la ricerca oppure seguendo determinati criteri di selezione che non dipendono strettamente dal contenuto dei singoli documenti.

Nella seconda fase avviene la vera e propria selezione in base a criteri di esclusione specifici. Nel caso di esclusione devono essere specificate le motivazioni. In questa fase, in via del tutto generale, oltre a definire criteri di esclusione oggettivi, si esegue una prima selezione leggendo gli abstract e una selezione più rigorosa leggendo il documento per intero.

Il numero "n" indica che non è necessario elencare tutti gli articoli che vengono esclusi ma è sufficiente riportare il numero di articoli scartati per ogni motivo di esclusione.

Nella terza fase vengono inseriti gli articoli che hanno superato la fase di screening e che saranno oggetto della revisione sistematica.

3.2 Procedimento di revisione

Come indicato nel paragrafo precedente, il metodo di revisione adottato si basa sul PRISMA Flow Diagram, pur presentando alcune variazioni sostanziali. Queste differenze non compromettono l'oggettività e la riproducibilità del metodo applicato.

Rispetto al diagramma in *Figura 3.1* il presente elaborato ha utilizzato un solo database e non ha considerato eventuali revisioni precedenti o ulteriori contenitori informativi.

Le fasi che hanno caratterizzato il procedimento di revisione sono riportate nella *Tabella 3-1*

FASE	DETTAGLIO
Scelta del database e strategia di ricerca	Sito Scopus e ricerca tramite Article Title, Abstract e Keywords
Prima fase di selezione	Verifica di presenza delle keywords nel titolo
Seconda fase di selezione	Lettura degli abstract e degli articoli completi
Definizione dei criteri di raggruppamento	Raggruppamento degli articoli per criteri di similitudine e presentazione dei risultati

Tabella 3-1 Fasi del metodo utilizzato nel processo di revisione

Nel processo di revisione si è ricorso all'utilizzo di fogli di lavoro Excel e degli strumenti presenti in questo software per l'applicazione dei criteri di esclusione specifici che saranno elencati nei paragrafi successivi.

3.2.1 Scelta del database e strategia di ricerca

La ricerca degli articoli e dei documenti utili per la revisione è stata effettuata su Scopus. Si tratta di una delle più grandi banche dati di letteratura scientifica peer-reviewed, che comprende articoli di riviste, atti di conferenze e capitoli di libri.

Grazie alla sua vasta gamma di funzionalità per ricercatori e accademici, Scopus è particolarmente adatto per il caso in esame.

Considerando l'enorme quantità di documenti disponibili su Scopus, è essenziale configurare fin dall'inizio un filtro di ricerca che permetta di restringere i risultati ai più pertinenti per il contesto di ricerca analizzato. Il sito consente di filtrare la ricerca secondo diversi criteri, nel caso in esame si è scelto il filtro "Article title, Abstract, Keywords".

Scopus è una piattaforma in lingua inglese, quindi i criteri di ricerca devono essere formulati in inglese. Le parole chiave scelte devono essere inserite tra virgolette. Per restringere ulteriormente i risultati, il sito consente di utilizzare più parole nella stessa ricerca, collegate da operatori logici come ad esempio AND o OR. Utilizzando più parole separate dall'operatore logico "AND" si sono create delle stringhe di ricerca.

Una singola stringa di ricerca può portare a pochi risultati in termini di articoli eleggibili e in alcuni casi a nessun articolo. Per ampliare il set di documenti su cui

applicare i successivi criteri di eleggibilità si è ricorso all'utilizzo di sinonimi che combinati tra loro portano ad un aumento significativo delle stringhe di ricerca e ad conseguente aumento del numero di articoli nella fase che nel diagramma di flusso PRISMA è nota come "identificazione".

Il sito utilizzato consente di salvare ed esportare i risultati ottenuti in vari modi, per gli utilizzi successivi si è scelto di salvare i dati nel formato .CSV. Per ogni stringa di ricerca si è creato un corrispondente file dati .CSV. Successivamente i file sono stati convertiti e modificati in fogli di lavoro Excel, ad ogni stringa di ricerca si è associato un foglio di lavoro Excel.

I dati ottenuti dalle diverse stringhe di ricerca sono stati infine raccolti in un unico foglio di lavoro, che è diventato il database principale degli articoli da sottoporre a criteri di selezione specifici. Questo database è stato organizzato con cura per garantire che tutti i documenti rilevanti fossero inclusi e pronti per la valutazione.

Prima di procedere con la fase di screening, sono stati applicati alcuni criteri di esclusione per ottimizzare il set di dati e garantire la qualità delle informazioni raccolte. In particolare, nella prima fase, sono stati eliminati i documenti duplicati e quelli privi di DOI (Document Object Identifier), poiché tali documenti non potevano essere identificati in modo univoco. Questo processo di pulizia è stato essenziale per assicurare che solo gli articoli più pertinenti e verificabili fossero inclusi nel database.

Inoltre, per mantenere una traccia precisa della provenienza di ogni documento, nel file Excel è stata aggiunta una colonna specifica. Questa colonna registra la stringa di ricerca di riferimento utilizzata per trovare ciascun documento, facilitando così il processo di revisione e permettendo di risalire facilmente alle condizioni originali di ricerca per ogni articolo incluso nel database.

3.2.2 Prima fase di selezione

Dopo aver completato la fase di "identificazione" degli articoli, ci si trova con un ampio numero di documenti che necessitano di essere sottoposti a un processo di selezione accurato. Questo processo deve avvalersi di criteri di scelta che siano oggettivi e ripetibili per garantire l'affidabilità dei risultati.

Il primo passo importante da sottolineare in questo processo è la distinzione tra articoli ad accesso libero e articoli a pagamento o ad accesso ristretto. Non tutti i

documenti identificati sono liberamente accessibili, e per questo motivo si è deciso di dividere gli articoli in due categorie distinte: quelli che presentano il marker "open access" e quelli che non lo presentano. Questa suddivisione iniziale è fondamentale poiché consente di semplificare la selezione successiva. Infatti, per gli articoli del primo gruppo, non è necessario verificare la loro disponibilità, poiché è garantita dal loro stesso status di accesso libero.

In questa fase preliminare, i criteri di selezione adottati sono basati essenzialmente su due aspetti chiave per entrambi i gruppi di articoli:

1. **Pertinenza dell'argomento trattato:** Si verifica se l'argomento dell'articolo è rilevante e strettamente correlato all'ambito di ricerca specifico che si sta indagando. Questo passaggio è cruciale per assicurarsi che gli articoli selezionati contribuiscano effettivamente al progresso della ricerca in questione.
2. **Presenza di parole chiave nel titolo:** Si controlla se almeno una delle parole chiave predefinite è presente nel titolo dell'articolo. Questo criterio è indispensabile per filtrare gli articoli che, nonostante possano contenere le parole chiave nel testo, non trattano in modo sufficientemente diretto l'argomento di interesse.

L'adozione di questi due criteri di selezione è necessaria poiché la combinazione delle parole chiave utilizzate per la ricerca può includere articoli che, pur contenendo le parole chiave, appartengono a campi di ricerca completamente diversi da quello industriale e produttivo. Ad esempio, si potrebbero trovare articoli relativi all'edilizia, alla farmaceutica, alla medicina o alla produzione alimentare, che non sono pertinenti all'argomento specifico di interesse. Inoltre, l'assenza di parole chiave nel titolo dell'articolo suggerisce che l'argomento trattato non è strettamente correlato alla ricerca da eseguire, rendendo tale articolo meno rilevante.

Una volta applicati questi criteri iniziali, si ottengono due insiemi distinti di articoli. Questi insiemi possono quindi essere sottoposti a ulteriori fasi di selezione, con criteri ancora più stringenti, al fine di identificare esclusivamente gli articoli che sono strettamente pertinenti all'argomento di ricerca desiderato. Questo processo iterativo di selezione garantisce che il materiale raccolto sia di alta qualità e rilevanza per la ricerca in corso.

3.2.3 Seconda fase di selezione

Dopo aver applicato i primi due criteri di selezione, si ottengono due set di dati che sono attinenti all'argomento trattato e contengono nel titolo almeno una delle parole chiave predefinite. Questi due gruppi di articoli possono essere ulteriormente esaminati per selezionare solo quelli pertinenti alla ricerca perseguita.

Per fare questo, è necessario leggere gli abstract degli articoli e, in caso di dubbi, procedere con la lettura dell'intero articolo. Questo perché, sebbene l'ambito di ricerca sia corretto e il titolo possa suggerire che l'articolo centri perfettamente l'argomento di ricerca, in molti casi può accadere che la parola chiave presente nel titolo non sia poi trattata in maniera approfondita all'interno dell'articolo oppure che sia affrontata in termini diversi da quelli richiesti per la revisione da eseguire.

Nel primo gruppo, quello con il marker "open access", il processo è più snello poiché non c'è la necessità di verificare la possibilità di accedere alla lettura completa dell'articolo. La stessa cosa non può dirsi per il secondo gruppo, in cui tutti gli articoli sono provvisti di abstract ma non tutti sono accessibili. In questo caso, è stato necessario controllare per ogni articolo la possibilità di accedere alla sua lettura completa. Gli articoli non accessibili sono stati definitivamente scartati.

Al termine della seconda fase di selezione, si ottengono i dati definitivi che centrano l'argomento trattato e che saranno analizzati per estrapolare le informazioni necessarie.

4 Caso studio

Nel seguente capitolo verrà illustrata in dettaglio l'applicazione del metodo di ricerca proposto nel capitolo precedente e saranno descritti i vari passaggi che hanno portato alla determinazione del set finale di articoli utilizzati per gli scopi dell'elaborato. Sarà posta particolare attenzione all'utilizzo dei criteri di esclusione e a come essi abbiano agito nello scremare il set di dati iniziali.

In primo luogo, sarà spiegato come sono stati applicati i criteri di selezione preliminari per ottenere un gruppo iniziale di articoli attinenti all'argomento trattato. Successivamente, verrà descritto il processo di lettura degli abstract e, ove necessario, degli interi articoli per verificare la pertinenza effettiva dei contenuti rispetto alla ricerca perseguita. Verrà discusso come i criteri di esclusione siano stati fondamentali per eliminare gli articoli che, pur avendo parole chiave rilevanti nel titolo, non approfondiscono sufficientemente l'argomento o lo trattano in modo non pertinente ai fini della revisione.

Infine, sarà illustrato il processo di verifica dell'accessibilità degli articoli, con particolare attenzione alla distinzione tra quelli "open access" e quelli non liberamente accessibili. Sarà spiegato come gli articoli non accessibili siano stati definitivamente scartati, portando alla selezione finale dei documenti che centrano l'argomento trattato.

Alla fine di questo processo, si otterrà un set definitivo di articoli che saranno analizzati per definire i criteri presenti in letteratura per la determinazione dell'orientamento di stampa nei processi di additive manufacturing.

4.1 Keywords e sinonimi

Cercando di rispettare il processo spiegato nel capitolo precedente, si è iniziato impostando il sito Scopus come principale strumento di ricerca. Il criterio di ricerca selezionato è stato "article title, abstract, keywords" per garantire che i risultati fossero il più possibile rilevanti e completi.

Il primo passo è stato determinare almeno tre parole chiave che centrassero in maniera precisa l'argomento di interesse. La scelta delle parole chiave è stata fatta in modo da coprire diverse sfaccettature dell'argomento, garantendo così una ricerca esaustiva. Sul sito Scopus è possibile eseguire ricerche anche con parti di parole utilizzando il simbolo "*", che permette di includere varianti delle parole chiave scelte.

Nel caso specifico, volendo ricercare anche criteri di ottimizzazione, sono state utilizzate le seguenti parole chiave:

- 3d printing
- Part orientation
- Optim* (per indicare optimize, optimizing, optimal, optimization, etc)

Queste parole chiave sono state selezionate per coprire l'intero spettro del tema di ricerca. "3d printing" rappresenta il campo generale di interesse, "Optim*" riflette la necessità di trovare articoli che trattano dei criteri di ottimizzazione specifici, mentre "Part orientation" è stata inclusa per assicurarsi che gli articoli selezionati considerino specificamente l'orientamento di stampa.

Queste tre parole chiave hanno formato la prima stringa di ricerca. Sono state scritte tra virgolette e separate dall'elemento logico "AND", per garantire che ogni articolo contenesse tutte e tre le parole chiave nel titolo, nell'abstract o nelle parole chiave. Questo approccio iniziale ha prodotto "solo" 42 risultati.

Dato il numero limitato di risultati ottenuti, è stato evidente che per ampliare il set di dati fosse necessario utilizzare dei sinonimi e combinarli tra loro. Questo avrebbe permesso di espandere il campo di ricerca pur mantenendo il perimetro nell'ambito desiderato. L'utilizzo di sinonimi e termini correlati ha lo scopo di coprire tutte le possibili varianti linguistiche e terminologiche che gli autori degli articoli possono aver utilizzato per descrivere concetti simili.

La ricerca di sinonimi delle tre parole chiave ha portato all'individuazione delle seguenti keywords:

- 3d printing, additive manufacturing, rapid prototyping, three-dimensional printing, stereolithography.

- part orientation, print* orientation, print* direction, build direction, build orientation, material deposition, deposition orientation, deposition direction.
- optim*, improv*, multi-objective optimization, multicriteria decision making.

In questo modo, il numero di stringhe di ricerca utilizzate come filtro su Scopus è stato notevolmente ampliato. Questo ampliamento ha comportato un incremento significativo nel numero di articoli rilevanti identificati per la fase di screening.

4.2 Stringhe utilizzate e classificazione dei dati

La combinazione delle keywords iniziali e dei loro sinonimi ha generato un set di 160 stringhe di ricerca che sono riportate in Appendice.

Le stringhe di ricerca che non hanno prodotto risultati sono state 61 ed in particolare sono le seguenti: 8, 15, 16, 23, 24, 26, 27, 28, 32, 38, 40, 48, 55, 56, 60, 64, 68, 70, 71, 72, 75, 76, 80, 84, 87, 88, 92, 95, 96, 102, 103, 104, 107, 108, 109, 111, 112, 115, 116, 119, 120, 123, 124, 127, 128, 132, 135, 136, 139, 140, 144, 148, 149, 151, 152, 154, 156, 157, 158, 159, 160.

Brought to you by UNIVPM

The screenshot shows the Scopus search interface. At the top, there is a navigation bar with the Scopus logo, a search bar, and links for Lists, Sources, SciVal, and user options like 'Create account' and 'Sign in'. Below the navigation bar, a welcome message reads: 'Welcome to a more intuitive and efficient search experience. See what is new'. The main search area contains a 'Search within' dropdown menu set to 'Article title, Abstract, Keywords' and a search input field containing the query: '"3d printing" AND "deposition orientation" AND "improv*"' with a search icon. Below the search field, there are buttons for '+ Add search field', 'Reset', and 'Search Q'. A horizontal menu below the search area includes 'Documents', 'Preprints' (marked as Beta), 'Patents', 'Secondary documents', and 'Research data'. The main content area displays a message: 'No documents matching your keywords were found', accompanied by a magnifying glass icon and a list of suggestions: 'Make sure your keywords are spelled correctly', 'Try different keywords', 'Try more general keywords', and 'Try removing your most recent keyword'.

Figura 4.1 Esempio di ricerca priva di risultati: stringa 26

Le restanti 99 stringhe di ricerca hanno prodotto una serie di risultati che sono stati inizialmente salvati in formato .CSV. Questo formato è stato scelto per la sua compatibilità con diversi strumenti di gestione e analisi dei dati, facilitando il successivo processo di elaborazione.

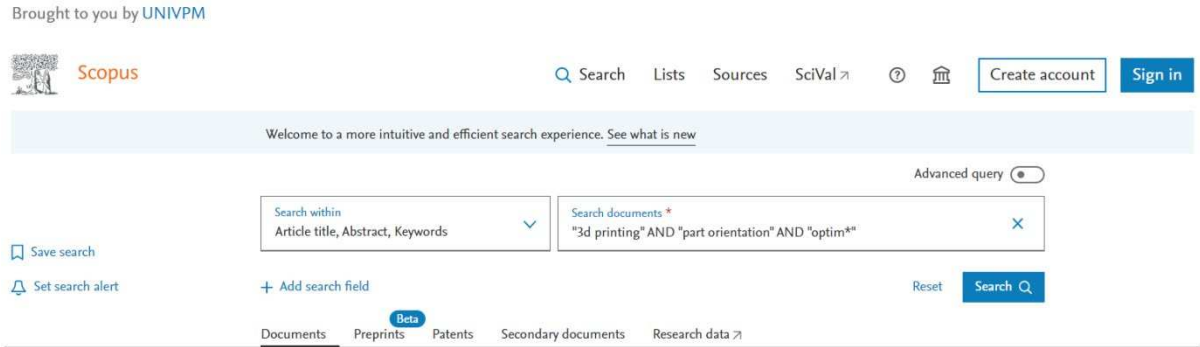


Figura 4.2 Esempio di ricerca che ha prodotto risultati: Stringa 1

Una volta salvati i file .CSV, ciascuno contenente i risultati di una specifica stringa di ricerca, si è proceduto alla conversione di questi file in fogli di lavoro Excel. Excel è stato scelto come strumento principale per la gestione dei dati grazie alle sue funzionalità di organizzazione, filtraggio e analisi, che sono state fondamentali per la successiva fase di screening.

Il passo successivo è stato quello di unificare i 99 fogli di lavoro individuali in un unico documento Excel. Questo processo di unificazione ha comportato la combinazione dei dati in un singolo foglio di lavoro, garantendo che tutti i risultati fossero centralizzati in un'unica base di dati. Tale centralizzazione è stata cruciale per facilitare l'analisi complessiva.

Stringa	Authors	Author f	Author(s)	Title	Year	Source	Volume	Issue	Art. No.	Page st.	Page en.	Page cc.	Cited by
1	Ransikarbi	Ransikarbi	564164077	Importance of multi-objective evaluation in 3D printing	2024	Industrial Strategies and Solutions for 3D Pri	105	128	23	0	0	0	0
2	1	Stringa:	57205104	Optimization of multi-part 3D printing build strategies for lean product and process	2018	IFIP Advan	540			488	497	9	5
3	1	(Visualizzazione non filtrata)	56498424	Development of Correction Factors for FDM 3D Printers: Experimental Investigat	2022	Smart Innc262 SIST				314	326	12	3
4	1	Urunkar R. Urunkar,	R57488124	Development of Part Build Orientation Algorithm for FDM 3D Printing	2022	Lecture Notes in Mechanical Engineering				317	327	10	0
5	1	Puri S. S., IPun, Shaik	586169007	Modeling of Volumetric Shrinkage of Nylon Parts Fabricated by 3D Printing Proces	2023	Lecture Notes in Mechanical Engineering				47	56	9	0
6	1	Matos M.A. Matos, Mar	57209989	Mary-objective optimization of build part orientation in additive manufacturing	2021	Internation:	112	03-apr		747	762	15	22
7	1	Oropallo V. Oropallo,	V56810976	Ten challenges in 3D printing	2016	Engineerin	32	1		135	148	13	291
8	1	Raju M., G. Raju,	Mara572014585	A hybrid PSO-BFO evolutionary algorithm for optimization of fused deposition mo	2019	Journal of I	30	7		2743	2758	15	96
9	1	MohammeMohamme	57221232	Dimensional Error Minimization through Parameter Optimization for 3D Printed N	2023	Journal of I	32	24		11326	11346	20	0
10	1	Asadollahi-Asadollahi	56305691	Generic roughness meta-model in 3D printing by Fused Deposition Modeling	2022	Progress i	7	2		399	410	11	2
11	1	Biswal R., Biswal, Ru	57200759	Experimental investigation of design parameters on geometrical accuracy of selec	2023	Journal of I	108			48	61	13	2
12	1	Jones A., L. Jones,	Alis57211214	Effect of surface geometry on laser powder bed fusion defects	2021	Journal of I	296		117179				23
13	1	Kromer R., Kromer,	56845350	DESIGN TEACHING INTEGRATING ADDITIVE MANUFACTURING CONSTRAINT	2023	Proceeding	3			1327	1336	9	0
14	1	Sartini M., Sartini,	Mik57728587	A MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING APPROACH TO OPTIMIZE THE PART E	2023	Proceeding	3			293	302	9	1
15	1	Shunmuga Shunmuga	57190019	A Review on Fused Deposition Modeling Printing Parameters Optimization for Ma	2023	AIP Confer	2477		30048				0
16	1	Patil S., S. Patil,	Shas56280262	Experimental study on mechanical properties of FDM 3D printed polylactic acid fa	2024	AIP Advan	14	3	35125				0
17	1	Parvanda I. Parvanda,	57764955	Bibliometric Analysis-Based Review of Fused Deposition Modeling 3D Printing Me	2024	3D Printing	11	1		383	405	22	8
18	1	Geoffroy M. Geoffroy,	574144491	Cranial remodeling orthosis for infantile plagiocephaly created through a 3D scan,	2018	Journal of I	30	4		247	258	11	11
19	1	Aznarte G. Aznarte, G;	57204086	A study on material-process interaction and optimization for VAT-photopolymeriza	2018	Rapid Prot	24	9		1479	1485	6	15
20	1	Navarro J., Navarro,	J57189994	Effect of print orientation on microstructural features and mechanical properties of	2019	Rapid Prot	25	6		1017	1029	12	2
21	1	Ransikarbi	564164077	Multi-criteria selection problem of part orientation in 3D fused deposition modeling	2017	IEEE Intern:2017-December				1455	1459	4	16
22	1	Pacurar R. Pacurar,	R55581338	Research on optimal scaling of parts made from stainless steel material by Sele	2021	Proceedings of 2021 9th Internati			9492672				0
23	1	Shi P., Qi (Shi, Peizhi)	57212759	Learn to Rotate: Part Orientation for Reducing Support Volume via Generalizable l	2023	IEEE Tran	19	12		11687	11700	13	1
24	1	Bender D., Bender,	D57204724	Overhanging feature analysis for the additive manufacturing of topology optimized	2018	Proceeding 1A-2018							2
25	1	Balli J., Ku Balli,	Judal57200341	Continuous liquid interface production of 3D objects: An unconventional technolog	2017	ASME Intei	5						14
26	1	Clemon L., Clemon,	L562372607	INCREASED STRENGTH OF 3D PRINTED PARTS WITH Z-PIN APPROACH	2021	ASME Intei2A-2021			V02AT02A002				0
27	1	Wade C., (Wade, Ch	57312643	Determining Optimal Print Orientation Using GPU-Accelerated Convex Hull Analys	2023	Proceedings - SCF 2023: 8th An			4				0
28	1	Alba J. C. G. Alba,	Juan57790353	3D printing part orientation optimization: discrete approximation of support volum	2022	Internation:	12	6		5958	5966	8	0
29	1	Sun S., Ch Sun,	Shipi14619843	Optimization design of orientation for FDM forming parts with stability constraints;	2023	Jisuanji Jic	29	7		2327	2337	10	0
30	1	Alkindi T., Alkindi,	Tan57202032	The effect of varying specimens' printing angles to the bed surface on the tensile	2021	MRS Corn	11	3		310	316	6	28
31	1	Fand M. A., Fand,	Muh57221768	Optimization of process-property relations of 3D printed ceramics using extrusion	2021	ESAFORM 2021 - 24th Internatio			3723				0
32	1	Könya G., Könya,	Gö572E+10	Investigating the Impact of Productivity on Surface Roughness and Dimensional A	2024	Periodica I	52	2		128	133	5	0
33	1												

Figura 4.3 Particolare del foglio di lavoro utilizzato per la fase di screening

4.3 Fase di screening

Dopo la generazione del file completo, sono stati eliminati i dati ricorrenti e quelli privi di DOI (Document Object Identifier), ottenendo un set di 1449 articoli. Questo set rappresenta, nel diagramma di flusso PRISMA, il database della fase di "identificazione".

Come spiegato nel Capitolo 3, si è deciso di dividere i dati in base all'accessibilità alla lettura degli articoli. Applicando i filtri in Excel, i dati sono stati suddivisi in due gruppi: quelli con il marker "open access" e quelli senza. In questo modo, sono stati ottenuti due set di dati distinti, semplificando la ricerca poiché nel primo gruppo erano presenti solo dati con accesso libero, che non necessitavano di un controllo aggiuntivo.

Per entrambi i gruppi, sono stati scartati i documenti non pertinenti all'ambito di ricerca definito nell'elaborato. Molti articoli riguardavano settori come la costruzione edile, la medicina, la biomedicina e l'alimentazione. Questo passaggio è stato eseguito utilizzando i metodi di ricerca di Excel, cercando nel titolo degli articoli termini come "concrete", "cement", "medical", "food", "dental" e "pharma". Questa è stata la prima fase di screening a cui i dati sono stati sottoposti.

Successivamente, è stata verificata la presenza delle parole chiave all'interno del titolo di ogni articolo. Sono state scelte le parole chiave corrispondenti al secondo e al terzo gruppo, poiché quelle del primo gruppo servivano solo a delimitare il perimetro di ricerca alla stampa 3D.

In particolare, è stato seguito il seguente processo:

- Individuazione delle parole chiave nella colonna "Title".
- Differenziazione per colori delle diverse righe a seconda della tipologia di parole chiave presenti (verde per la presenza di almeno una parola chiave del secondo gruppo, arancione per la presenza di almeno una parola chiave del terzo gruppo e rosso per la presenza di parole chiave di entrambi i gruppi).

1	Stringa	Authors	Author f	Author(s)	Title	Year	Source	Volume	Issue	Art. No.	Page st	Page en
2	1	Sartini M.	Sartini, Mik	57285876	A MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING APPROACH TO OPTIMIZE THE PART BUILD ORIENTATION IN ADDITIVE	2023	Proceeding	3			293	302
3	1	Shi P., Qi Shi, Peizhi	57212759	Learn to Rotate: Part Orientation for Reducing Support Volume via Generalizable Reinforcement Learning	2023	IEEE Tran	19	12			11687	11700
4	1	Wade C.	Wade, Ch	57312643	Determining Optimal Print Orientation Using GPU-Accelerated Convex Hull Analysis	2023	Proceedings - SCF 2023	8th Anv				
5	1	Kaid H., Di Kaid, Hussa	56685919	Optimization of the Effect of Laser Power Bed Fusion 3D Printing during the Milling Process Using Hybrid Artificial N	2023	Processes	11	10			2892	
6	1	Abas M., H.Abas, Muh	57289997	3D printing part orientation optimization: discrete approximation of support volume	2023	International	12	6			5958	5963
7	1	Hada T., K.Hada, Tarr	57211907	Effect of Different Filler Contents and Printing Directions on the Mechanical Properties for Photopolymer Resins	2022	International	12	4			2296	
8	1	Fand M.A., Fand, Muh	57221768	Optimization of process-property relations of 3D printed ceramics using extrusion-based additive manufacturing	2021	ESAFORM 2021 - 24th Internatio					3723	
9	1	Garzaniti I., Garzaniti, I	157205104	Optimization of multi-part 3D printing build strategies for lean product and process development	2018	IFIP Advan	540				488	497
10	5	Kocsis B., Kocsis, Be	57204833	3D printing parameters optimization for Fe-6.5 wt%Si	2024	Journal of I	592				171829	
11	5	Abdallah S., Abdallah, S	57408836	Performance optimization of 3D printed polyamide 12 via Multi Jet Fusion: A Taguchi grey relational analysis (TGRA)	2023	International	6	1			72	81
12	5	Alzyod H., Alzyod, Hu	57730302	Rapid prediction and optimization of the impact of printing parameters on the residual stress of FDM-ABS parts usin	2023	Materials T	93				583	588
13	5	Stafova M., Stafova, I	57218562	3D printing and post-curing optimization of photopolymerized structures: Basic concepts and effective tools for impr	2022	Polymer T	108				107499	
14	5	Abas M., H.Abas, Muh	57191610	Parametric Investigation and Optimization to Study the Effect of Process Parameters on the Dimensional Deviation	2022	Polymers	14	17			3687	
15	5	Asyraf Azli, Asyraf Azli	57219028	Printing Parameter Optimization of Biodegradable PLA Stent Strut Thickness by using Response Surface Methodok	2020	IOP Confe	864	1			12154	
16	5	Matos M.A., Matos, Mar	57209989	A Multi-objective Approach to Solve the Build Orientation Problem in Additive Manufacturing	2019	Lecture Nc	11621	LNC5			261	276
17	8	Fry N.R., Fry, Nichol	57191707	Robotic additive manufacturing system for dynamic build orientations	2020	Rapid Prot	26	4			659	687
18	9	Hu K., Li H., Hu, Kaiyu	58185193	A Toolpath Optimization Algorithm for Layered 3D Printings based on Solving the TSP	2023	Journal of I	2456	1			4530	
19	9	Jiang Q., Jiang, Qe	57210104	Simultaneous Optimization of Structural Topology and Print Direction for Additive Manufacturing Anisotropy	2023	Jose Gong	59	17			220	231
20	9	Hada T., K.Hada, Tarr	57211907	Effect of Different Filler Contents and Printing Directions on the Mechanical Properties for Photopolymer Resins	2022	International	23	4			2296	
21	9	Morley T.P., Morley, Th	57226882	Structural Strength Improvement of 3D Printing Parts from Topology Optimised Design Using Anisotropic Material M	2021	Lecture Nc	355				439	448
22	9	Bruggi M., Bruggi, Ma	23023912	Simultaneous design of the topology and the build orientation of Wire-and-Arc Additively Manufactured structural eler	2021	Computer	242				106370	
23	9	Wang W., Wang, We	57142846	Printing Direction Optimization through Slice Number and Support Minimization	2020	IEEE Acce	8				8034015	75646 75655
24	9	Dwiyati S., Dwiyati, S	57211559	Influence of layer thickness and 3D printing direction on tensile properties of ABS material	2019	Journal of I	1402	6			86014	
25	10	Li Y., Lou Yu, Yao	57219607	Tensile and bending strength improvements in peek parts using fused deposition modelling 3D printing considering r	2020	Polymers	12	11			2497	1 14
26	10	Kim H., Le Kim, Hyeon	57202103	Characterization of electrical heating performance of cf/dm 3d-printed graphene/poly(lactic acid (Pla) horseshoe patt	2020	Polymers	12	12			2955	1 18
27	13	Macknoja, Macknoja	58084937	Additive manufacturing of Fe-0.5 wt.%Si transformer steel toroidal cores: Process optimization, design aspects, an	2024	Materials a	241				112883	
28	13	Zou J., Xia Zou, Jun	57266152	Topology optimization for additive manufacturing with strength constraints considering anisotropy	2023	Journal of I	10	2				892 904
29	13	Jin F., Ge Q., Chen	57268184	Manufacturing Quality Control Model Construction and Data Driven Optimization for Additive Manufacturing	2023	Journal of I	142	6			4646	4671
30	13	Orme M., Orme, Mel	57190172	Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware	2018	Designs	2	4			51	1 22
31	14	Povraz O., Povraz, Oz	572E+10	Influence of Build Direction and Post Processes on the Material and Part Attributes of Hard Resins Fabricated by Ph	2023	Materials F	26				e20220362	

Figura 4.4 Estratto del database dei dati "open access" filtrati sulle keywords

La separazione per colori ha dato una chiara indicazione visiva degli articoli potenzialmente da scartare, limitandosi alla sola lettura del titolo. Le righe di colore arancione, contenenti solo parole come "optim*" e "improv*", ad esempio, hanno mostrato un alto tasso di scarto perché non riferite all'orientamento di stampa ma ad altri parametri del processo o all'intero processo in generale. Inoltre, tutti gli articoli non colorati sono stati scartati alla fine della fase di ricerca delle parole chiave nel titolo.

L'ultima fase di selezione è avvenuta leggendo gli abstract e, in modo non approfondito, gli articoli. Molti articoli con parole chiave nel titolo sono stati scartati poiché l'argomento dell'orientamento di stampa era marginale o utilizzato solo come comparatore di specifiche caratteristiche meccaniche dei manufatti realizzati.

Per gli articoli del secondo gruppo, cioè quelli non automaticamente riconoscibili come "open access" e numericamente maggiori rispetto a quelli del primo gruppo, è stato necessario verificare la possibilità di accesso all'articolo, nel caso in cui le parole chiave fossero presenti nel titolo e l'abstract fosse coerente con l'argomento della ricerca. Alcuni di questi articoli presentano il file PDF direttamente in Scopus come mostrato in Figura 4.5, per altri è stato necessario aprire il link relativo alla pubblicazione e accedere con le credenziali fornite da UNIVPM come mostrato in Figura 4.6.

[Back to results](#) | 1 of 1

[Download](#) [Print](#) [Save to PDF](#) [Add to List](#) [Create bibliography](#)

Additive Manufacturing • Volume 22, Pages 720 - 728 • August 2018

Document type
Article
Source type
Journal
ISSN
22148604
DOI
10.1016/j.addma.2018.06.007
[View more](#)

Improving printing orientation for Fused Deposition Modeling printers by analyzing connected components

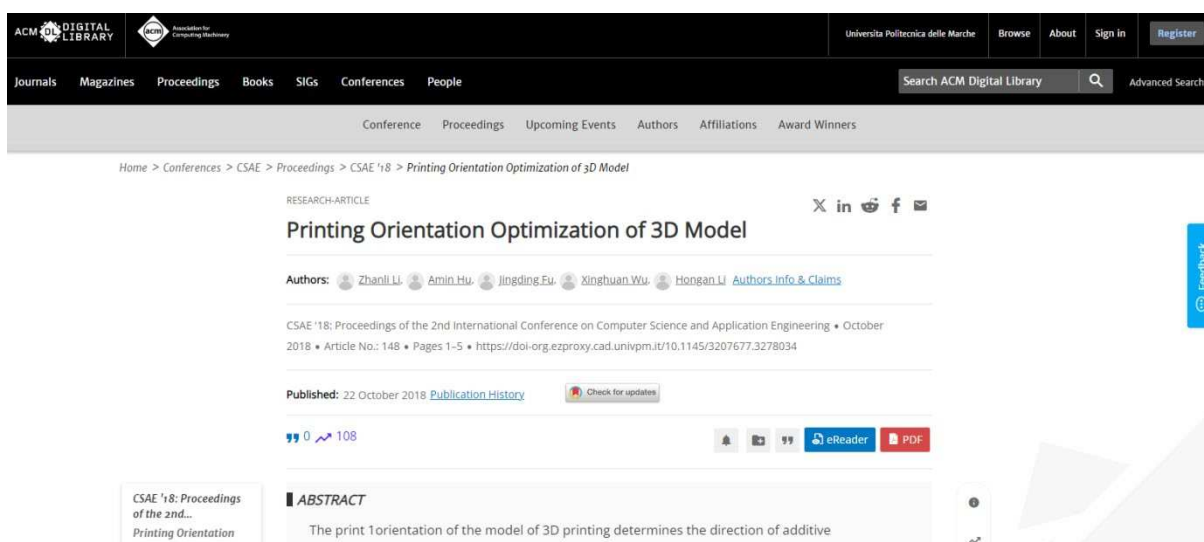
García Galicia, Jorge A. [✉](#) ;
Benes, Bedrich [✉](#)
[Save all to author list](#)

[‡] High Performance Computer Graphics Laboratory, Purdue University, 401 N. Grant St., West Lafayette, 47907, IN, United States

12 56th percentile Citations in Scopus | 0.55 FWCI | 25 Views count | [View all metrics](#)

[View PDF](#) [Full text options](#) [Export](#)

Figura 4.5 Articolo accessibile direttamente in Scopus



The screenshot shows the ACM Digital Library interface. At the top, there are navigation links for Journals, Magazines, Proceedings, Books, SIGs, Conferences, and People. A search bar is present with the text 'Search ACM Digital Library'. Below the navigation, there is a breadcrumb trail: Home > Conferences > CSAE '18 > Proceedings > CSAE '18 > Printing Orientation Optimization of 3D Model. The main content area displays the article title 'Printing Orientation Optimization of 3D Model' with social media sharing icons. The authors listed are Zhanli Li, Amin Hu, Jingding Fu, Xinghuan Wu, and Hongan Li. The publication information includes 'CSAE '18: Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering • October 2018 • Article No.: 148 • Pages 1-5 • https://doi.org.ezproxy.cad.univpm.it/10.1145/3207677.3278034'. The article is published on 22 October 2018. There are 108 views and a 'Check for updates' button. A blue 'Feedback' button is on the right. The abstract is partially visible: 'The print 1orientation of the model of 3D printing determines the direction of additive'.

Figura 4.6 Articolo accessibile dal link di pubblicazione

Molti articoli pertinenti sono stati scartati perché non accessibili. Ad esempio l'articolo *Development of Part Build Orientation Algorithm for FDM 3D Printing* con DOI 10.1007/978-981-16-7787-8_23 consente solo la lettura dell'abstract e la visualizzazione della pubblicazione. L'autenticazione con le credenziali fornite da

UNIVPM non consente di accedere alla lettura del documento completo ma fornisce solo l'abstract come mostrato in *Figura 4.7*

The screenshot shows a webpage for a conference paper. At the top, there is a breadcrumb trail: Home > Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems > Conference paper. The main title is "Development of Part Build Orientation Algorithm for FDM 3D Printing". Below the title, it says "Conference paper | First Online: 03 March 2022" and "pp 317–327 | Cite this conference paper". On the right side, there is a book cover for "Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems" and a "Log in" button. Below the title, the authors are listed as "Rushikesh P. Urunkar & Sachin Mastud". The paper is part of the book series "Lecture Notes in Mechanical Engineering ((LNME))". It has "1703 Accesses" and "1 Citations". The abstract section is titled "Abstract" and contains the following text: "FDM 3D printing is one of the most widely used 3D printing techniques. The mechanical properties and overall quality of part produced by FDM are highly dependent on the build orientation. There are numerous methods presented by researchers to get the optimized orientation for the part. Due consideration is given to individually optimize parameters like surface finish, supports requirement, printing time and printing cost. Existing part orientation softwares do not provide the flexibility to priorities any of these parameters. Additionally, these softwares require higher computational power and they are time-consuming. Therefore, this work aims to improve the overall part quality and printing time by developing algorithm which can orient the part as per specific needs of the customer like surface finish, support material requirement and built height. Developed algorithm is implemented using a Python-based software which has easy-to-use interface and". On the right side, there is a sidebar with a "Chapter" section, a list of features: "Available as F", "Read on any c", "Instant down", "Own it foreve", and a "Purchase" button.

Figura 4.7 Esempio di articolo non accessibile

Conclusa la fase di screening, come mostrato in *Figura 4.8* si è ottenuto il set di dati definitivo composto da 60 articoli. Questi articoli centrano perfettamente il tema della determinazione dell'orientamento di stampa e saranno analizzati per evidenziarne le similitudini e metodi e criteri utilizzati nel capitolo successivo.

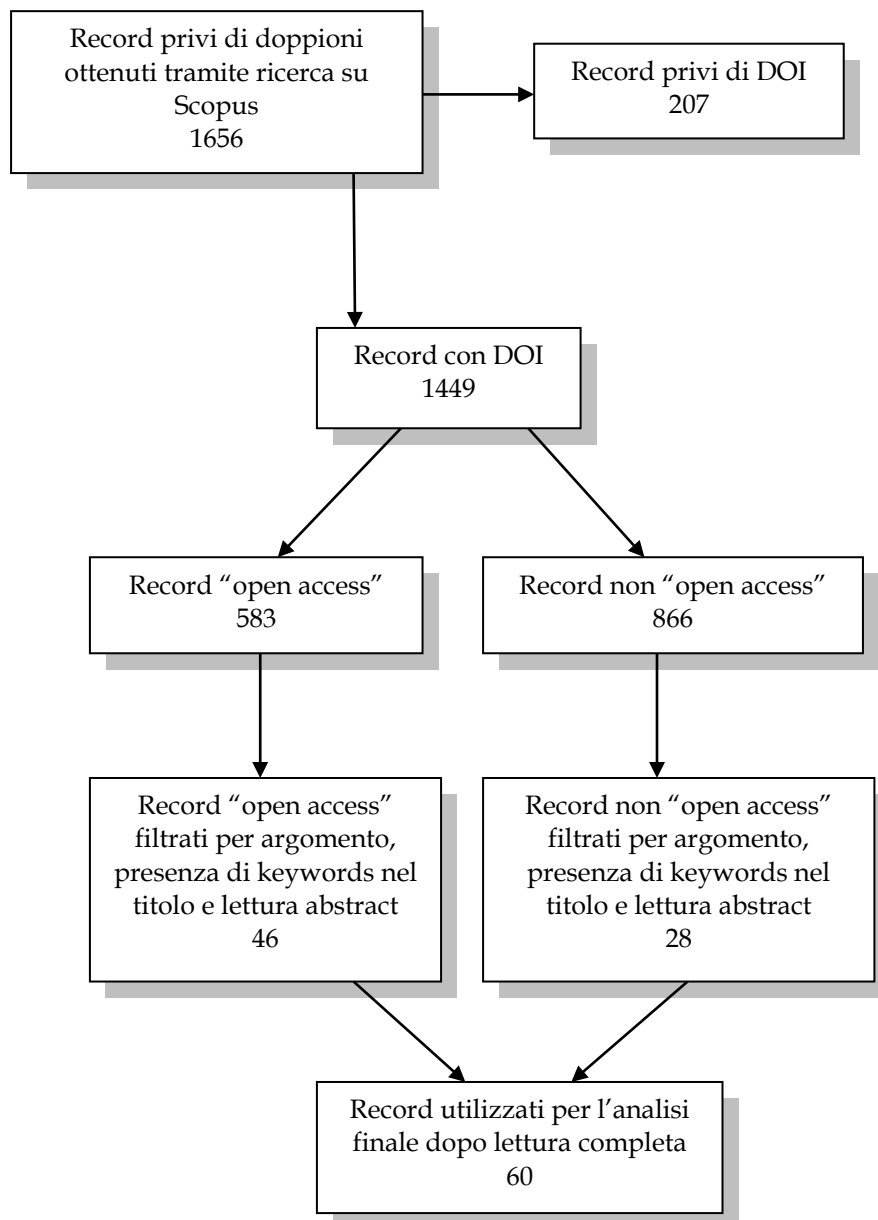


Figura 4.8 Diagramma di flusso del metodo PRISMA applicato al caso di studio

5 Analisi e discussione dei risultati

Nel presente capitolo viene presentata un'analisi dettagliata dei dati raccolti successivamente all'applicazione del metodo proposto nel capitolo 3, preceduta da un'analisi bibliometrica. L'obiettivo principale è quello di esaminare le 60 pubblicazioni che hanno soddisfatto in modo preciso i criteri di ricerca delineati nel suddetto capitolo, offrendo una panoramica approfondita e strutturata delle caratteristiche comuni e distintive tra le varie opere selezionate.

L'analisi si focalizza sull'evidenziare le similitudini e le singolarità presenti nelle pubblicazioni selezionate, con particolare attenzione ai metodi e alle condizioni presupposte. Per garantire un'analisi esaustiva e sistematica, i dati sono stati suddivisi secondo i seguenti criteri:

- **Tecnologia di riferimento:** Si esamina quale tecnologia è stata impiegata nelle pubblicazioni, considerando le diverse innovazioni e gli strumenti tecnologici utilizzati.
- **Criterio di orientamento:** Viene analizzato il criterio utilizzato per l'orientamento di stampa, ovvero la direzione e l'obiettivo specifico che ogni studio intendeva perseguire.
- **Criterio di ottimizzazione:** Si studiano i criteri di ottimizzazione adottati nelle pubblicazioni, osservando come gli autori hanno cercato di migliorare il processo attraverso varie strategie.
- **Algoritmi utilizzati:** Si identificano e si confrontano gli algoritmi implementati nei diversi studi, evidenziando le similitudini e le differenze nell'approccio algoritmico.
- **Perimetro del metodo:** Viene definito e analizzato il campo di applicazione di ciascun metodo, comprendendo i limiti e le potenzialità degli approcci descritti nelle pubblicazioni.

Alla fine di questo capitolo, sarà possibile ottenere una visione chiara e comprensiva dell'evoluzione del metodo nel corso degli anni. Questa panoramica offrirà una base solida per procedere alla ricerca di metodi nuovi ed alternativi che

possano prendere in considerazione un numero sempre maggiore di variabili e contesti applicativi. In questo modo, si mira a promuovere lo sviluppo di strategie innovative e più efficaci, capaci di rispondere alle sfide emergenti nel campo di studio.

5.1 Analisi rispetto all'anno di pubblicazione

L'analisi rispetto all'anno di pubblicazione dimostra come l'attenzione rispetto all'ottimizzazione del processo di additive manufacturing si concentri negli anni recenti. In particolare come dimostrano i dati successivi si ha un significativo incremento delle pubblicazioni rispetto agli anni precedenti dal 2018 al 2023.

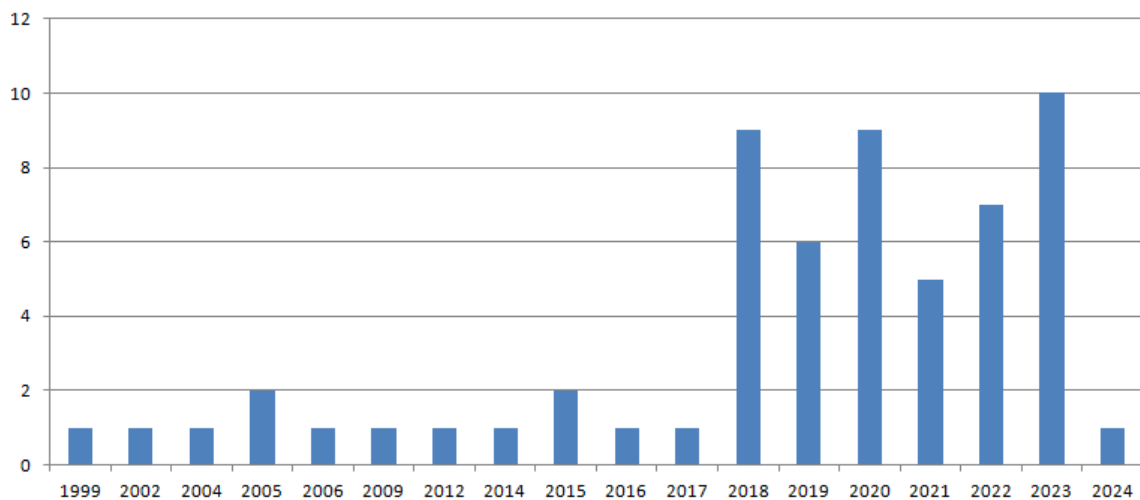


Figura 5.1 Grafico della distribuzione degli articoli per anno di pubblicazione

Il 78,33% degli articoli selezionati in questo elaborato, ovvero 47 su 60, è stato pubblicato tra il 2018 e il 2024. Di questi 47 articoli, come verrà approfondito nei paragrafi successivi, due sono review pubblicate rispettivamente nel 2020 e nel 2021, mentre i restanti 45 sono articoli che indagano specifici metodi di ottimizzazione della direzione di stampa.

Un'analisi più dettagliata di questi 45 articoli rivela che il 53,33% di essi non si focalizza su una tecnologia di additive manufacturing specifica, ma considera un metodo generale, teoricamente applicabile a qualsiasi tecnologia di stampa additiva. D'altro canto, 8 articoli si concentrano sulla tecnologia SLM (Selective Laser Melting) e 9 sulla tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling).

In termini di criteri di orientamento, dei 45 articoli, 23 considerano un solo criterio, mentre i rimanenti 22 adottano un approccio multicriterio. Quest'ultimo approccio risulta particolarmente interessante poiché permette di valutare e ottimizzare più aspetti contemporaneamente, fornendo una visione più completa e dettagliata del processo di ottimizzazione.

Infine, un'ultima considerazione riguarda l'uso di algoritmi per la ricerca della soluzione ottimale. Su 45 articoli, 25 fanno riferimento all'utilizzo di algoritmi, principalmente per la risoluzione di problemi multicriterio. Di questi 25 articoli, l'80% utilizza algoritmi di tipo genetico. Questo dato evidenzia la predominanza degli algoritmi genetici nel campo dell'ottimizzazione della direzione di stampa, probabilmente per la loro capacità di esplorare efficacemente spazi di soluzione complessi e trovare soluzioni ottimali in modo efficiente.

5.2 Analisi rispetto alla casa editrice e alla rivista

L'analisi rispetto alla casa editrice mostra come la maggior parte delle pubblicazioni provenga da Elsevier e Springer con il 63% degli articoli.

CASA EDITRICE	NUMERO DI ARTICOLI
American Society of Mechanical Engineers (ASME)	2
Association for Computing Machinery	1
Cambridge University Press	2
Chinese Mechanical Engineering Society	1
De Gruyter Open Ltd	1
Elsevier	20
Emerald	3
Higher Education Press Limited Company	1
IEEE Computer Society	1
Institute of Advanced Engineering and Science	1
Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.	1
Institute of Physics	1
MDPI	4
Nature Research	1
Springer	17
Taylor and Francis Ltd.	2

Tabella 5-1 Case editrici di provenienza degli articoli

L'analisi rispetto ai giornali di provenienza delle pubblicazioni mostra una predominanza di "International Journal of Advanced Manufacturing Technology" con un totale di 10 articoli come mostrato in *Tabella 5-2*.

RIVISTA	NUMERO DI ARTICOLI
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	10
Additive Manufacturing	3
Procedia CIRP	3
Procedia Manufacturing	3
Rapid Prototyping Journal	3
CAD Computer Aided Design	2
International Journal on Interactive Design and Manufacturing	2
Journal of Intelligent Manufacturing	2
Journal of Manufacturing and Materials Processing	2
Structural and Multidisciplinary Optimization	2
ACM International Conference Proceeding Series	1
Applied Sciences (Switzerland)	1
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	1
Computer-Aided Design and Applications	1
Computers and Graphics (Pergamon)	1
European Journal of Operational Research	1
Frontiers of Mechanical Engineering	1
IEEE Access	1
IEEE Transactions on Industrial Informatics	1
International Journal of Computer Integrated Manufacturing	1
International Journal of Electrical and Computer Engineering	1
International Journal of Machine Tools and Manufacture	1
International Journal of Production Research	1
Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering	1
Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME	1
Journal of Manufacturing Systems	1
Journal of Materials Processing Technology	1
Journal of Materials Research	1
Journal of Mechanical Design	1
Journal of Physics: Conference Series	1
Manufacturing Letters	1
Micromachines	1
Open Engineering	1
Proceedings of the Design Society	1
Progress in Additive Manufacturing	1
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	1
Scientific Reports	1

Tabella 5-2 Riviste di provenienza degli articoli

In relazione al numero di citazioni degli articoli selezionati, è possibile evidenziare che otto articoli, nello specifico [58], [54], [49], [47], [53], [27], [59] e [56], superano le 100 citazioni. In particolare, gli articoli [58] e [54] raggiungono rispettivamente 488 e 207 citazioni, risultando i più citati. Questo elevato numero di citazioni può essere attribuito all'anno di pubblicazione, che per questi articoli risulta essere rispettivamente il 2004 e il 2006, ma anche per le metodologie utilizzate dagli autori.

Molto interessante è anche il dato relativo agli articoli [47] e [27], che raggiungono rispettivamente 127 e 114 citazioni, nonostante siano relativamente recenti, essendo stati pubblicati nel 2017 e nel 2018. Questo dimostra un rapido riconoscimento e interesse da parte della comunità accademica, dovuto alla rilevanza e all'innovazione delle ricerche presentate.

Gli articoli pubblicati dal 2019 al 2024 mostrano naturalmente un numero di citazioni più basso, dato il minor tempo trascorso dalla loro pubblicazione. Nonostante ciò, è interessante notare che alcuni articoli, come [40], [41], [36], [31], [20] e [4], hanno ottenuto rispettivamente 85, 66, 58, 60, 21 e 22 citazioni. Questi numeri indicano comunque un buon livello di interesse e citazioni da parte della comunità scientifica, suggerendo che i temi trattati in questi articoli sono di attualità e rilevanza nel campo di studio.

5.3 Analisi degli articoli

Gli articoli che hanno soddisfatto i requisiti di ricerca, come già evidenziato in precedenza, sono 60. Tali pubblicazioni si concentrano sulla ricerca del miglior orientamento di stampa in relazione a particolari criteri di processo, della parte da realizzare e della tecnologia presa in considerazione. Questo insieme di articoli rappresenta una base solida per l'analisi delle varie metodologie di ottimizzazione dell'orientamento di stampa, offrendo una panoramica esaustiva delle attuali conoscenze nel campo della produzione additiva.

Tra gli articoli che hanno superato la fase di screening, sono emerse due review significative riguardanti i metodi di ottimizzazione della direzione di stampa. Questi articoli, identificati come [20] e [31], sono stati pubblicati rispettivamente nel 2021 e nel 2020. Entrambe le pubblicazioni investigano le modalità di ricerca e ottimizzazione della direzione di stampa nei vari articoli presi in considerazione. Tuttavia, non viene spiegato come gli autori siano giunti alla determinazione del set

di articoli da analizzare, lasciando un punto interrogativo sulla metodologia di selezione utilizzata.

L'articolo [31] inizia con la definizione di una serie di funzioni obiettivo trovate in letteratura, evidenziando come queste siano affrontate nei vari studi. Gli autori analizzano successivamente le diverse tecniche di ottimizzazione presenti nei vari articoli, mettendo in luce i vantaggi e gli svantaggi dei vari metodi discussi.

L'articolo [20], invece, adotta un approccio diverso analizzando un set di dati molto più ampio rispetto al [31]. Gli autori suddividono gli articoli in due categorie principali: quelli che utilizzano un "one-step method" e quelli che adottano un approccio "two-step method". Gli articoli del primo gruppo trovano la soluzione ottimale in un set di soluzioni infinite generalmente tramite l'utilizzo di un algoritmo o di una funzione obiettivo. Gli articoli del secondo gruppo, invece, trovano la Optimal Build Orientation (OBO) partendo da un set di Alternative Build Orientations (ABOs). Per ciascuno di questi gruppi, gli autori evidenziano le peculiarità individuate nei vari studi, suddividendoli ulteriormente in base alla tecnologia di produzione utilizzata. Infine, vengono analizzati i vantaggi e gli svantaggi dei metodi incontrati in letteratura, fornendo un quadro dettagliato delle diverse strategie di ottimizzazione dell'orientamento di stampa.

Alla luce delle due review, il set di articoli da analizzare si riduce a 58, di cui 26 vengono presi in considerazione in [20] e [31]. In particolare in [20] vengono analizzati gli articoli [6], [9], [10], [14], [15], [26], [36], [43] e [58]. Nel [31] vengono analizzati gli articoli [23], [24], [42] e [49]. Gli articoli [25], [39], [40], [41], [45],[46], [47], [53], [54], [55], [56], [59] e [60] vengono analizzati sia in [20] che in [31].

Considerando questi dati, risulta evidente come l'analisi condotta in questo elaborato sia di fondamentale importanza per un approccio il più possibile completo ed esaustivo sull'evoluzione dei temi relativi ai criteri di determinazione e ottimizzazione della direzione di stampa nel tempo. Questa analisi non solo approfondisce la comprensione delle dinamiche di sviluppo di questi argomenti, ma fornisce anche una panoramica aggiornata e dettagliata della letteratura esistente.

In particolare, l'analisi aggiunge 32 articoli di cui 22 sono successivi alla pubblicazione dell'ultima review, ovvero della [20]. Inoltre, tre articoli sono stati pubblicati nello stesso anno di [31], mentre ben sette articoli sono antecedenti alle

due review ma non sono stati presi in considerazione dagli autori delle stesse. I motivi che hanno portato all'esclusione o alla non considerazione di questi articoli non sono noti, ma questo fatto sottolinea, come evidenziato nel capitolo 3, l'importanza di tenere traccia della metodologia utilizzata per la selezione degli articoli in una ricerca bibliografica.

La mancata inclusione di questi articoli nelle precedenti review potrebbe derivare da vari fattori, come criteri di selezione diversi, accessibilità limitata delle fonti o da altri fattori a noi sconosciuti. Questo rafforza ulteriormente la necessità di una metodologia rigorosa e trasparente nella selezione degli articoli, per assicurare che la ricerca bibliografica sia completa e rappresentativa delle conoscenze attuali.

In conclusione, l'analisi svolta non solo amplia significativamente il corpus di letteratura disponibile sul tema, ma evidenzia anche l'importanza di aggiornamenti periodici e accurati delle review scientifiche. Questo approccio garantisce una visione più completa e dettagliata degli argomenti affrontati, fornendo un contributo prezioso alla comprensione e allo sviluppo futuro di questo ambito di ricerca.

5.3.1 Clustering dei criteri di analisi

La *Tabella 8-1* in Appendice mostra in dettaglio le tecnologie di riferimento, i criteri di orientamento, i metodi di ottimizzazione, gli algoritmi utilizzati e i perimetri del metodo per i 58 articoli analizzati. Questa tabella è strutturata per fornire una panoramica completa e sistematica delle informazioni chiave contenute in ciascuna pubblicazione, facilitando così il confronto e l'analisi dei diversi approcci adottati nella letteratura scientifica.

Tale suddivisione è funzionale al raggruppamento dei criteri utilizzati nell'analisi delle varie pubblicazioni, facilitando così un confronto diretto e una comprensione più profonda delle differenze e somiglianze tra i vari studi. Questo approccio sistematico prepara il terreno per i paragrafi successivi, nei quali verranno approfonditamente analizzati i criteri di orientamento, i metodi di ottimizzazione e gli algoritmi utilizzati, fornendo una visione integrata e critica delle attuali pratiche di ottimizzazione dell'orientamento di stampa nella produzione additiva.

5.3.2 Tecnologia di riferimento

Per la determinazione dell'orientamento di stampa è di fondamentale importanza definire il tipo di processo considerato. Questo influisce sulle condizioni al contorno e sui parametri di processo in maniera importante.

Gli articoli selezionati in questo elaborato di tesi si differenziano tra quelli che considerano la tecnologia di additive manufacturing con carattere generale, quelli che considerano più tecnologie e quelli che si concentrano su una singola tecnologia.

In *Figura 5.2* viene presentata una rappresentazione dettagliata del numero di articoli per ciascuna tecnologia di stampa 3D di riferimento. È importante notare che alcuni articoli analizzati, come già evidenziato, considerano più di una tecnologia di stampa 3D. Di conseguenza, il numero totale di articoli rappresentati nel grafico supera il numero reale di articoli esaminati, che è pari a 58.

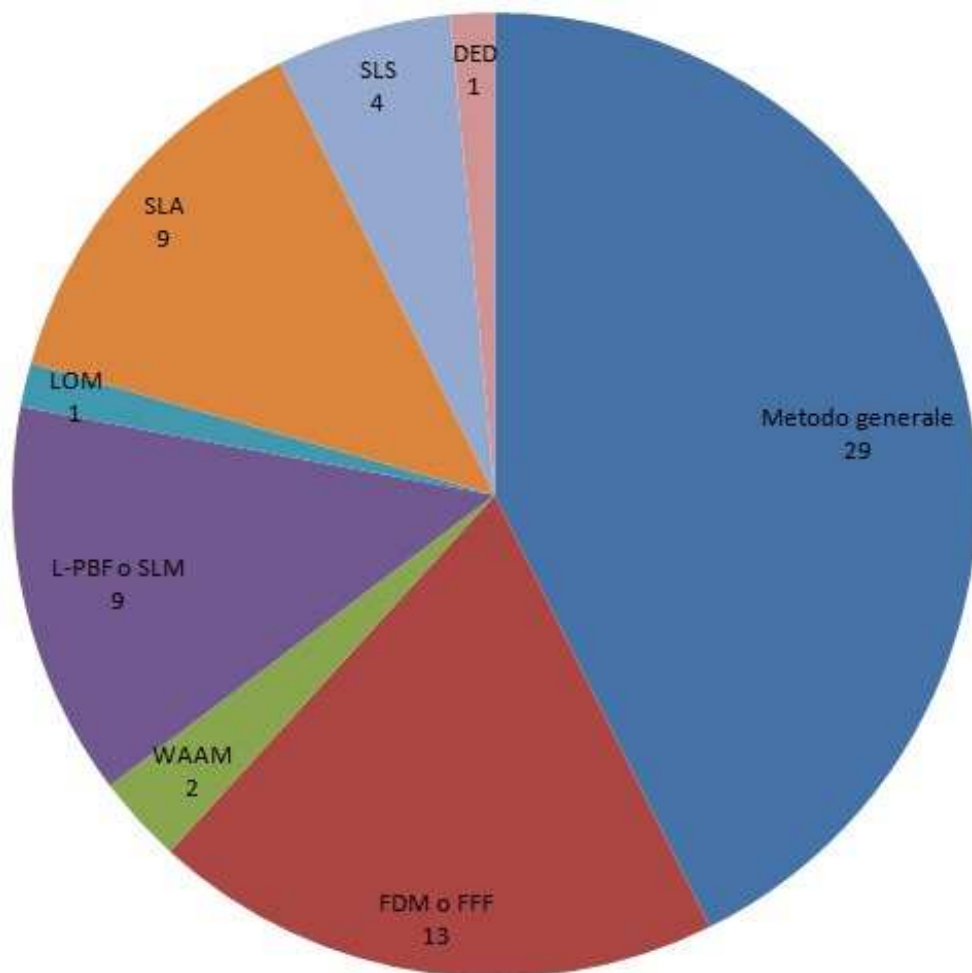


Figura 5.2 Grafico relativo alle tecnologie di riferimento negli articoli selezionati

La maggior parte degli articoli analizzati considera il processo di additive manufacturing in maniera generale, senza applicare condizioni al contorno specifiche per le singole tecnologie. Questo approccio implica che le soluzioni proposte per l'ottimizzazione della direzione di stampa siano teoricamente applicabili a tutte le tecnologie di stampa 3D. Gli autori di questi studi tendono a presentare metodologie e algoritmi che possono essere utilizzati indipendentemente dal tipo di tecnologia adottata, focalizzandosi su principi generali e criteri universali.

Tuttavia, esistono alcuni articoli che cercano di trovare la migliore soluzione per specifiche tecnologie di riferimento, adottando un approccio più mirato. Nel caso della Direct Energy Deposition (DED) e la Laminated Object Manufacturing (LOM) queste due tecnologie sono considerate solo in un articolo ciascuna. Ad esempio, nell'articolo [1], viene analizzata la tecnologia DED con l'imposizione di vincoli di processo particolari come il tempo di produzione, il costo di produzione, le dimensioni del piatto e l'altezza del volume di stampa. Inoltre, questo studio prende in considerazione un materiale specifico come riferimento, permettendo una valutazione più dettagliata e precisa della tecnologia DED. All'interno dello stesso articolo, vengono anche considerate le tecnologie Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) e Fused Deposition Modeling (FDM), ciascuna con condizioni al contorno specifiche che riflettono le peculiarità dei rispettivi processi.

Similmente, nell'articolo [21], l'unico che prende in considerazione la tecnologia LOM, questa viene analizzata imponendo condizioni proprie come lo spessore del layer, la velocità di stampa del bordo, i costi del processo e della parte, nonché i tempi di pre-processo e post-processo. Anche in questo studio, vengono esaminate altre tecnologie come FDM, SLS e Stereolithography (SLA), ciascuna con parametri distinti e specifici mostrati in *Figura 5.3*

	FDM	SLS	SLA	LOM
l_t (mm)	0.254	0.1	0.1	0.1
V_{s1} (mm/s)	25.4	279.4	429.26	200
V_{s2} (mm/s)	—	—	1826.26	—
V_{s3} (mm/s)	25.4	1257.3	817.88	—
V_{s4} (mm/s)	25.4	—	149.86	—
C_{labor} (\$/h)	17	17	17	17
C_{build} (\$/h)	10	41	41	58
T_{pre} (h)	0.12	0.12	0.12	0.12
T_{post} (h)	0.35	0.45	0.5	1.00

Figura 5.3 Parametri assegnati alle diverse tecnologie nell'articolo [21]

Questa diversificazione dei parametri consente di comprendere meglio le caratteristiche e le limitazioni di ogni tecnologia, offrendo un quadro comparativo utile per la scelta dell'orientamento di stampa ottimale.

In generale, le metodologie che si basano sul processo di additive manufacturing sono di carattere generale e sono ipoteticamente utilizzabili per ogni processo. Queste metodologie adottano approcci e criteri universali, che permettono di applicarle teoricamente a diverse tecnologie di stampa 3D senza la necessità di adattamenti specifici. Questo approccio generalista offre una flessibilità significativa, ma potrebbe non tener conto delle peculiarità di ogni singola tecnologia, limitando così l'efficacia ottimale in contesti specifici.

Gli articoli che, invece, prendono in considerazione particolari processi di stampa 3D tendono ad avere un carattere più parziale e specializzato. Questi studi analizzano e ottimizzano le condizioni di stampa specifiche per una determinata tecnologia. Tuttavia, le soluzioni proposte in questi articoli potrebbero essere adattate per altre tecnologie solo modificando le condizioni al contorno specifiche del processo, come i parametri di stampa, i materiali utilizzati, e le configurazioni operative.

Come evidenziato in precedenza, alcune tecnologie specifiche come DED e LOM sono poco considerate negli articoli esistenti. Questo rappresenta una lacuna significativa nella letteratura scientifica, poiché la mancanza di studi approfonditi su queste tecnologie limita la comprensione delle loro potenzialità e delle loro specifiche esigenze di ottimizzazione. Di conseguenza, un possibile sviluppo futuro della

ricerca potrebbe essere rappresentato dalla ricerca di metodi specifici per queste tecnologie.

Per colmare questa lacuna, sarebbe necessario applicare condizioni proprie del processo DED e LOM a metodi di carattere generale già esistenti. Questo approccio integrativo potrebbe comportare l'adattamento di algoritmi di ottimizzazione, l'implementazione di criteri di orientamento specifici, e la considerazione di vincoli particolari legati al materiale, al costo, al tempo di produzione e ad altre variabili critiche. L'adozione di tali metodi specifici non solo migliorerebbe la qualità e l'efficienza della produzione per queste tecnologie meno studiate, ma potrebbe anche fornire nuove intuizioni e innovazioni applicabili a un più ampio spettro di processi di stampa 3D.

In sintesi, mentre le metodologie generali offrono un'importante base teorica applicabile a vari processi di stampa 3D, l'approfondimento e la specializzazione nelle tecnologie specifiche come DED e LOM rappresentano una direzione promettente per la ricerca futura. Lo sviluppo di metodi ottimizzati per queste tecnologie, attraverso l'applicazione di condizioni proprie del processo a metodologie generali, potrebbe portare a significativi avanzamenti nel campo dell'additive manufacturing, migliorando sia l'efficienza operativa sia la qualità dei prodotti finali.

5.3.3 Criterio di orientamento

I criteri di orientamento nella stampa 3D rivestono un ruolo fondamentale nella determinazione della miglior direzione di stampa e rappresentano il fine per cui un determinato orientamento viene scelto. L'orientamento di un pezzo durante la stampa può influire significativamente su vari aspetti del prodotto finale e più in generale sui parametri di processo.

I criteri di orientamento utilizzati dagli autori dei 58 articoli sono:

- Rapidità
- Resistenza
- Costo
- Qualità
- Rugosità

- Staircase effect
- Strutture di supporto
- Lavorabilità
- Densità di impacchettamento

In Figura 5.4 si può vedere quante volte un particolare criterio è stato usato nei 58 articoli.

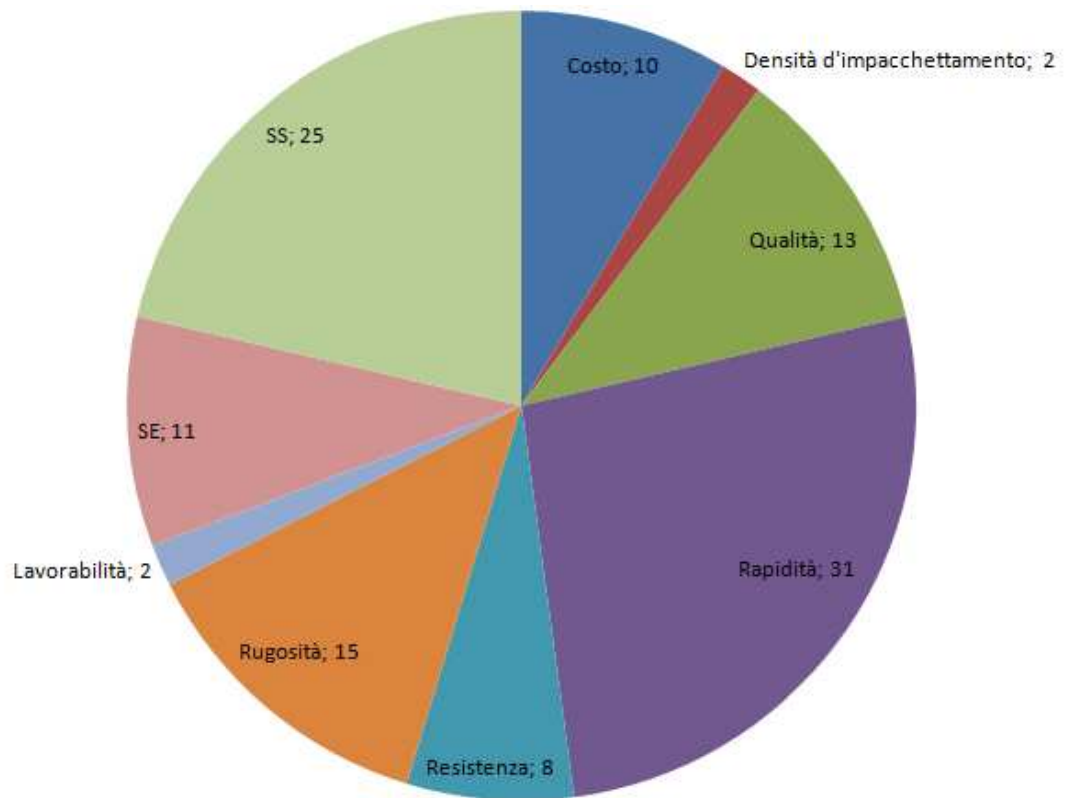


Figura 5.4 Grafico dei criteri di orientamento utilizzati negli articoli selezionati

5.3.3.1 Rapidità

Il concetto di "rapidità" nel contesto della stampa 3D include tutti quei criteri di orientamento che si concentrano sui tempi necessari per la costruzione di singole parti o, più ampiamente, per l'intero processo di produzione del manufatto. Gestire il tempo di costruzione può avvenire attraverso diverse strategie, che vanno dall'adozione di formule derivanti dalla letteratura specialistica allo studio approfondito della topografia, mirato a ridurre il numero di strati necessari per generare la parte.

La maggior parte degli studi scientifici attuali si avvale di formule preesistenti, tratte sia dalla letteratura consolidata che definite direttamente dagli autori, al fine di ottimizzare i tempi di costruzione. Le strategie proposte mirano principalmente a ridurre il numero di strati di materiale da depositare, diminuire l'altezza complessiva del manufatto oppure considerare l'impatto di altri criteri di orientamento, come la necessità di strutture di supporto, sulla durata complessiva del processo di stampa.

In alcuni casi, la strategia adottata si basa invece sull'analisi dettagliata della topografia specifica del componente da realizzare. Questo approccio permette di ottimizzare il percorso del recoater, il dispositivo che distribuisce uniformemente il materiale di costruzione, al fine di ridurre significativamente il tempo complessivo di costruzione.

Nel documento [6], come mostrato in *Figura 5.5* l'ottimizzazione del tempo di costruzione si concentra sulla minimizzazione delle superfici disconnesse, ovvero quelle aree dove il recoater deve interrompere la deposizione di materiale, e sulla riduzione della distanza tra tali superfici. Questa strategia mira a diminuire i periodi durante i quali il recoater attraversa zone vuote all'interno della camera di stampa, contribuendo così a ridurre i tempi globali di produzione.

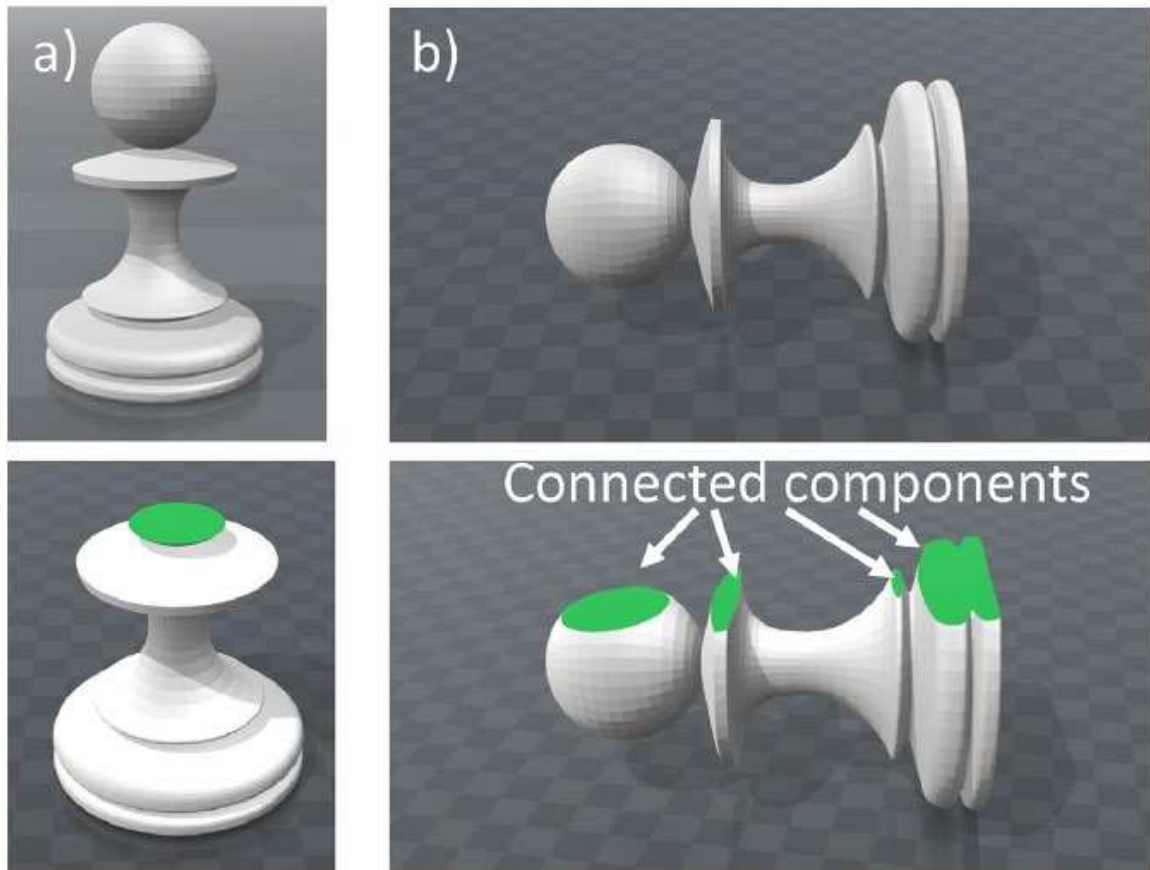


Figura 5.5 Ottimizzazione considerando la minimizzazione di superfici disconnesse. Nella configurazione a) si ha una riduzione del tempo di produzione del 69% rispetto alla configurazione b)

Nel contesto di [7], i tempi di costruzione vengono migliorati attraverso l'ottimizzazione del percorso di deposizione del materiale. Questo approccio sarà esaminato dettagliatamente nei paragrafi successivi del documento, evidenziando una metodologia specifica per massimizzare l'efficienza temporale nel processo di stampa 3D.

Nel riferimento [48], la riduzione dei tempi del processo si realizza riducendo la presenza di spigoli vivi che richiedono successive operazioni di post-processo lunghe e complesse. Questo approccio si concentra sul miglioramento della geometria delle superfici stampate per minimizzare il lavoro aggiuntivo necessario dopo la fase di stampa, contribuendo così a una riduzione complessiva dei tempi di lavorazione.

Infine, nel documento [52], il tempo di costruzione è determinato da vari fattori legati alla topologia specifica del manufatto. Questi includono il tempo necessario per la deposizione del materiale, i periodi di pausa durante i quali non avviene la deposizione e i tempi richiesti per cambiare direzione lungo il contorno della parte.

Questa analisi dettagliata della topologia aiuta a identificare e ottimizzare i principali fattori che influenzano i tempi di costruzione durante il processo di stampa 3D.

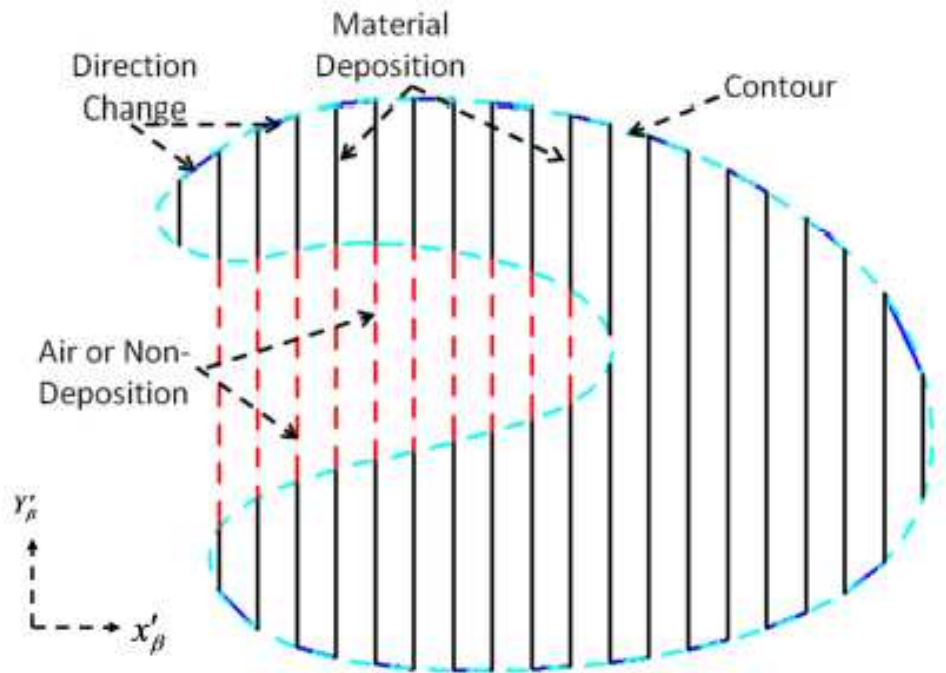


Figura 5.6 Particolare dell'articolo [52] per definire la zone di deposizione, la zona di volo, il contorno e l'inversione di direzione

5.3.3.2 Resistenza

Con il termine "resistenza" si intendono tutti i criteri di orientamento che tengono conto delle proprietà meccaniche del componente finito. Il processo di additive manufacturing, per sua natura, introduce una anisotropia più o meno marcata nel manufatto prodotto. L'applicazione strato su strato del materiale porta a proprietà meccaniche diverse a seconda che si consideri la direzione di stampa, la direzione ortogonale a essa, oppure la sezione tra due strati depositati.

L'unica tecnologia che risente meno dell'anisotropia è la stereolitografia (SLA), poiché non vi è differenza tra i legami chimici che compongono ogni strato e le forze che tengono insieme gli strati. Anche per quanto riguarda le proprietà meccaniche, la scelta dell'orientamento di stampa gioca un ruolo fondamentale. Numerosi articoli

scientifici tengono conto di questo criterio di orientamento, presentando vari approcci alla determinazione del miglior orientamento di stampa.

Nel riferimento [8], gli autori si propongono di migliorare la rigidità del manufatto finito agendo simultaneamente sulla topologia e sulla direzione di stampa. In particolare, per la scelta della miglior direzione di stampa, utilizzano un modello di materiale elastico anisotropo e applicano criteri di rottura per materiali anisotropi con matrici e formule note in letteratura. L'ottimizzazione si ottiene applicando dei vincoli al coefficiente di rottura.

Nel riferimento [16], un articolo che considera la tecnologia di stampa Fused Filament Fabrication (FFF), fortemente anisotropa, il miglioramento delle prestazioni meccaniche si basa sull'allineamento della direzione di stampa con la direzione delle linee di stress presenti, generate da un carico esterno sul componente da produrre. In questo caso specifico, viene considerata una forma predefinita e un carico assegnato dagli autori. Per valutare la direzione delle linee di stress nel componente, ci si avvale di un'analisi agli elementi finiti (FEA).

Nel riferimento [33], viene presa in considerazione la resistenza a trazione del componente finito. In particolare, il miglioramento della resistenza a trazione si ottiene minimizzando l'angolo tra la direzione di stampa e la direzione della forza di trazione ipotizzata sul componente finito.

Nel riferimento [40], il miglioramento delle proprietà meccaniche del componente finito avviene tramite la riduzione della tensione residua. In questo caso specifico, si fa riferimento alla tecnologia Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), che intrinsecamente porta alla generazione di tensioni residue dovute allo stress termico a cui i vari strati sono sottoposti durante il processo di deposizione. L'ottimizzazione si ottiene utilizzando strutture di supporto capaci di dissipare il calore in modo da non stressare termicamente il materiale. Nel riferimento [46], la riduzione dello stress termico, volta al miglioramento delle proprietà meccaniche e alla riduzione dei difetti di costruzione, si ottiene tramite una simulazione FEA.

Infine, nel riferimento [51], l'anisotropia del materiale viene sfruttata per massimizzare la rigidità strutturale nella tecnologia Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), utilizzando, come in [8], un modello di materiale elastico anisotropo e imponendo la minimizzazione dell'energia di deformazione elastica.

5.3.3.3 Costo

Il costo rappresenta uno dei parametri più critici nell'ambito della produzione additiva, tecnologia sempre più diffusa per la produzione di componenti destinati al mercato. Questo parametro assume una rilevanza discriminante in funzione del tipo di tecnologia impiegata e del materiale utilizzato. In letteratura esistono numerosi articoli che esaminano vari centri di costo, focalizzandosi talvolta esclusivamente sul processo di stampa o considerando anche altre fasi, come il pre-processo e, più comunemente, il post-processo.

Ad esempio, alcuni studi, come quelli indicati nei riferimenti [32] e [41], definiscono il costo di costruzione specificamente per la tecnologia Selective Laser Melting (SLM). In questi articoli, il costo è calcolato sommando il costo del materiale, il costo dell'energia e i costi indiretti. Tali costi vengono determinati utilizzando formule specifiche, correlate al tipo di processo e al materiale impiegato.

Nel caso della tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM), l'articolo [34] considera il costo di costruzione come la somma del costo del materiale utilizzato e del costo dell'energia necessaria per il processo di costruzione. L'articolo [54], invece, amplia questa analisi includendo ulteriori fattori, come il costo del lavoro nelle fasi di pre-processo e post-processo, il costo del materiale per la parte principale e i volumi di supporto.

In altri studi, come quelli riportati nei riferimenti [47] e [53], l'ottimizzazione del costo avviene in maniera indiretta. Ad esempio, nel caso dell'articolo [47], la riduzione dell'altezza del manufatto comporta una diminuzione dei tempi di costruzione e, di conseguenza, dei costi. Analogamente, la riduzione delle strutture di supporto porta a una riduzione dei costi del processo.

Infine, l'articolo [56] propone un modello di costo per il processo Stereolithography (SLA) che prende in considerazione diversi fattori, tra cui il costo del lavoro, il costo della manutenzione, il costo del software utilizzato, il costo del materiale e i costi indiretti.

5.3.3.4 Qualità, rugosità e staircase effect

In questo paragrafo vengono esaminati i criteri di orientamento che riguardano gli aspetti superficiali ed estetici del manufatto finito. Il concetto di qualità è

strettamente associato alla finitura superficiale del componente finito. La produzione additiva, caratterizzata dalla deposizione strato su strato, tende a generare superfici esterne che possono differire significativamente dalla superficie ideale progettata.

La qualità, intesa come accuratezza superficiale, è strettamente connessa alla rugosità e al cosiddetto effetto scalino o staircase effect. Quest'ultimo è visivamente rappresentato nella *Figura 5.7*. A causa della natura layer su layer della tecnologia additiva, la superficie della parte stampata presenta dei layer visibili che la compongono. La differenza tra la superficie della parte stampata e quella ideale determina la presenza di tale effetto scalino.

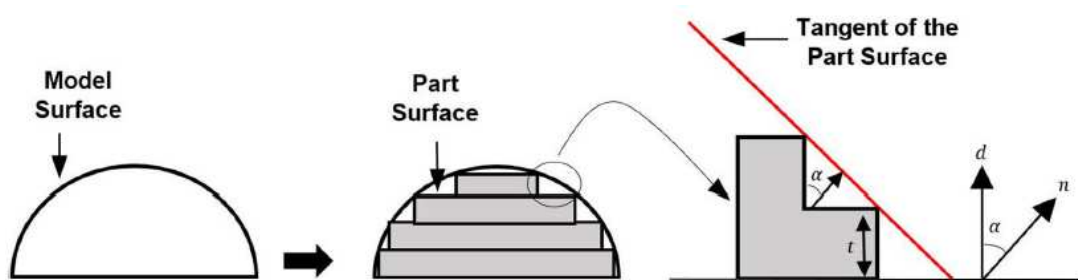


Figura 5.7 Staircase effect

La rugosità superficiale, intesa come l'insieme delle irregolarità presenti sulla superficie del materiale, è strettamente legata allo staircase effect. Le irregolarità sono dovute alla natura stessa del processo di produzione additiva, che lascia piccoli scalini tra gli strati successivi del materiale.

Generalmente, come evidenziato nel documento [4], questi criteri di orientamento portano alla definizione di tre funzioni principali che gli autori utilizzano per ottimizzare l'orientamento della parte stampata. Lo staircase effect, in alcuni casi, viene associato all'errore volumetrico. Ad esempio, nell'articolo [5], l'errore volumetrico viene considerato come la differenza di volume tra il materiale effettivamente utilizzato per stampare la parte e il volume specificato dal modello CAD.

Come mostrato nella *Figura 5.8*, la produzione strato su strato produce una differenza volumetrica (ΔV) tra due strati adiacenti. Questo errore volumetrico è una misura dell'inefficienza del processo in termini di materiale utilizzato e precisione della parte stampata rispetto al progetto originale. Tale differenza volumetrica può

influenzare negativamente la qualità estetica e funzionale del prodotto finito, rendendo necessario un attento controllo e ottimizzazione dei parametri di stampa.

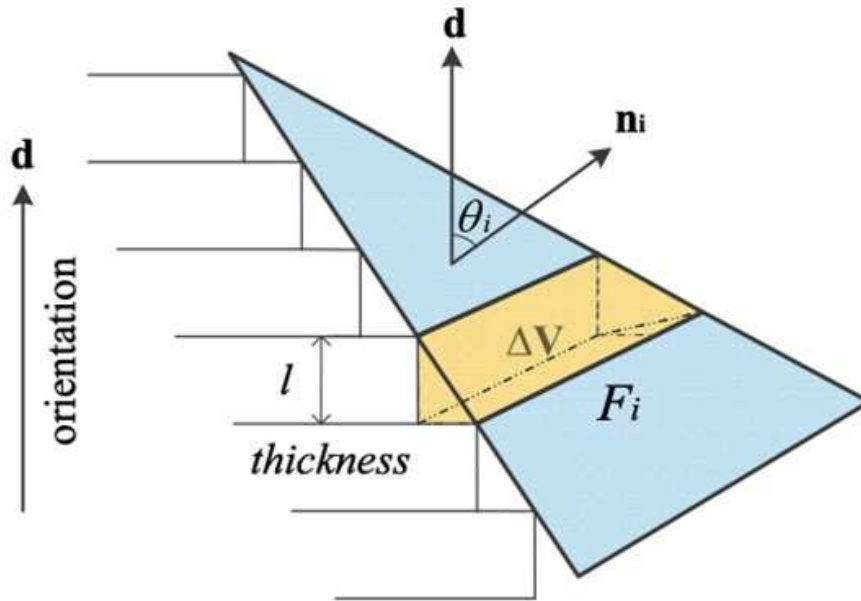


Figura 5.8 Errore volumetrico

Anche per l'errore volumetrico vengono comunemente utilizzate, nei vari articoli, specifiche funzioni che contribuiscono all'ottimizzazione dell'orientamento della parte nel processo di manifattura additiva. Questi casi sono trattati in maniera dettagliata e consultabile nella letteratura. Tuttavia, esistono situazioni particolari in cui i criteri di orientamento, come qualità, rugosità e staircase effect, non sono gestiti da funzioni obiettivo tradizionali.

Ad esempio, nell'articolo [13], il concetto di qualità superficiale viene applicato alla curvatura delle varie facce del modello CAD, assegnando a ciascuna un peso specifico basato sul metodo NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Questo approccio permette di attribuire importanza diversa alle diverse superfici, migliorando l'accuratezza della finitura superficiale in base alla curvatura delle facce del modello.

Nell'articolo [17], la qualità della tecnologia Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) è intesa come riduzione dei difetti di costruzione che si verificano all'inizio e alla fine di ogni strato. Questi difetti vengono minimizzati riducendo le superfici interrotte e, di conseguenza, ottimizzando il processo di deposizione continua del materiale.

L'articolo [18] propone diversi criteri per migliorare la qualità delle superfici nella produzione additiva, tra cui:

- Aumentare il più possibile le superfici parallele e perpendicolari alla direzione di stampa.
- Incrementare il numero di assi delle forme cilindriche paralleli alla direzione di stampa.
- Massimizzare le superfici curve lungo l'asse perpendicolare alla direzione di stampa.
- Massimizzare la superficie di base.
- Minimizzare le superfici inclinate.
- Ridurre le strutture di supporto.
- Minimizzare il volume intrappolato.

In relazione alla tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM), l'articolo [48] affronta il miglioramento della qualità considerando due criteri speciali e due criteri generali. I criteri speciali sono la riduzione degli spigoli vivi e la riduzione delle superfici disconnesse, mentre i criteri generali includono la riduzione degli errori lungo la direzione di stampa e la riduzione delle strutture di supporto. Questo approccio contribuisce a migliorare la precisione e la qualità estetica del manufatto finito.

5.3.3.5 Strutture di supporto

Il materiale di supporto viene utilizzato per realizzare superfici sporgenti, note anche come superfici overhang. Questi supporti fungono da materiale di scarto durante il processo di stampa, consentendo la creazione di caratteristiche che altrimenti non potrebbero essere stampate in aria senza rischiare che il materiale si afflosci. Una volta completata la stampa, i supporti vengono rimossi, rappresentando una delle prime operazioni di post-processing.

La maggior parte dei sistemi di manifattura additiva (AM) consente di scegliere l'angolazione alla quale applicare il materiale di supporto. La determinazione dell'angolo ottimale richiede spesso una serie di prove ed errori per ottenere la migliore qualità della parte, riducendo al contempo la quantità di materiale di supporto utilizzato. Questo bilanciamento è fondamentale per ottimizzare l'efficienza del processo e la qualità del prodotto finale.

È importante sottolineare che la rimozione del materiale di supporto è particolarmente complessa quando questo è situato all'interno della parte. Inoltre, le

superfici che entrano in contatto con il materiale di supporto presenteranno una finitura superficiale inferiore rispetto alle altre superfici, richiedendo ulteriori lavorazioni nella fase di post-processing per raggiungere una qualità adeguata.

Nel contesto delle tecnologie di AM metalliche, il materiale di supporto svolge molteplici funzioni oltre a sostenere le zone sporgenti. Tra questi compiti vi sono:

- **Rinforzare e fissare la parte alla piattaforma di stampa:** Il supporto aiuta a mantenere la stabilità della parte durante il processo di stampa.
- **Dissipare il calore in eccesso:** Durante la stampa, il calore può accumularsi eccessivamente; i supporti aiutano a disperderlo, prevenendo deformazioni e altri problemi.
- **Prevenire deformazioni della parte o, nel peggiore dei casi, il collasso della costruzione:** Il supporto aggiunge resistenza strutturale, riducendo il rischio di deformazioni o collassi.
- **Resistere alla forza meccanica esercitata dal meccanismo di spargimento della polvere sul pezzo:** I supporti devono essere abbastanza robusti da sopportare le sollecitazioni meccaniche durante il processo di stampa, garantendo che la parte mantenga la sua forma corretta.

L'uso del materiale di supporto è cruciale nella produzione additiva per garantire la realizzazione di geometrie complesse e la qualità del prodotto finito, il suo utilizzo richiede una gestione attenta per bilanciare la necessità di supporti con la facilità di rimozione e la qualità della superficie finale del manufatto.

Molti degli articoli presenti in questo elaborato utilizzano la gestione delle strutture di supporto come criterio di orientamento. Dato che queste ultime hanno un impatto sui costi totali, sull'utilizzo di materiale di scarto, sui tempi del processo, sulla qualità della parte costruita e sulle fasi di post-processo l'obiettivo di ottimizzazione della direzione di stampa è quello di minimizzarne il volume.

Nella pratica la stima delle strutture di supporto e del loro volume viene eseguita tramite apposite funzioni che in fase di ottimizzazione devono essere minimizzate. Tali formule e metodi sono facilmente riconoscibili all'interno dei singoli documenti. Nel proseguo ci si limiterà ad evidenziare alcuni articoli che fanno considerazioni diverse sull' utilizzo delle strutture di supporto.

Nell'articolo [11] e nell'articolo [30], vengono proposti, oltre alla riduzione del volume, due metodi innovativi che considerano la facilità di rimozione delle strutture di supporto durante la fase di post-processo. Questi metodi sono essenziali per migliorare l'efficienza e la qualità del processo di produzione additiva, poiché le strutture di supporto sono spesso necessarie per stabilizzare le parti durante la stampa ma possono risultare difficili da rimuovere una volta completato il processo.

Nel primo metodo, descritto in [11], viene utilizzato un algoritmo che simula il percorso che l'utensile dovrà seguire per rimuovere le strutture di supporto. Questo algoritmo prende in considerazione vari fattori, come la geometria della parte e la disposizione delle strutture di supporto, per ottimizzare il percorso di rimozione. Simulando il percorso dell'utensile, il metodo consente di prevedere e minimizzare le difficoltà che potrebbero sorgere durante la fase di post-processo, riducendo così il tempo e i costi associati alla rimozione dei supporti.

Nel secondo metodo, presentato in [30], viene impiegato un algoritmo specifico per la determinazione delle strutture di supporto non removibili. Questo algoritmo analizza la geometria della parte e identifica le aree in cui le strutture di supporto non possono essere rimosse facilmente. Una volta identificate queste aree problematiche, il metodo consente di modificare il design della parte o la disposizione dei supporti per evitare la formazione di supporti non removibili. Questo approccio proattivo migliora la qualità del prodotto finale e riduce la necessità di interventi manuali complicati durante la fase di post-processo.

Nell'articolo [15], l'attenzione è focalizzata sulla tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) e sull'ottimizzazione delle strutture di supporto attraverso l'uso di una piattaforma di supporto flessibile. La piattaforma di supporto flessibile permette di creare strutture di supporto che possono essere facilmente rimosse dopo la stampa, senza compromettere la stabilità della parte durante il processo di produzione.

Come mostrato in *Figura 5.9*, questa piattaforma offre un supporto efficace durante la stampa e al contempo consente una rimozione semplice e rapida delle strutture di supporto una volta terminata la produzione. Questo approccio non solo migliora l'efficienza del processo di post-processo, ma riduce anche il rischio di danneggiare la parte durante la rimozione dei supporti.

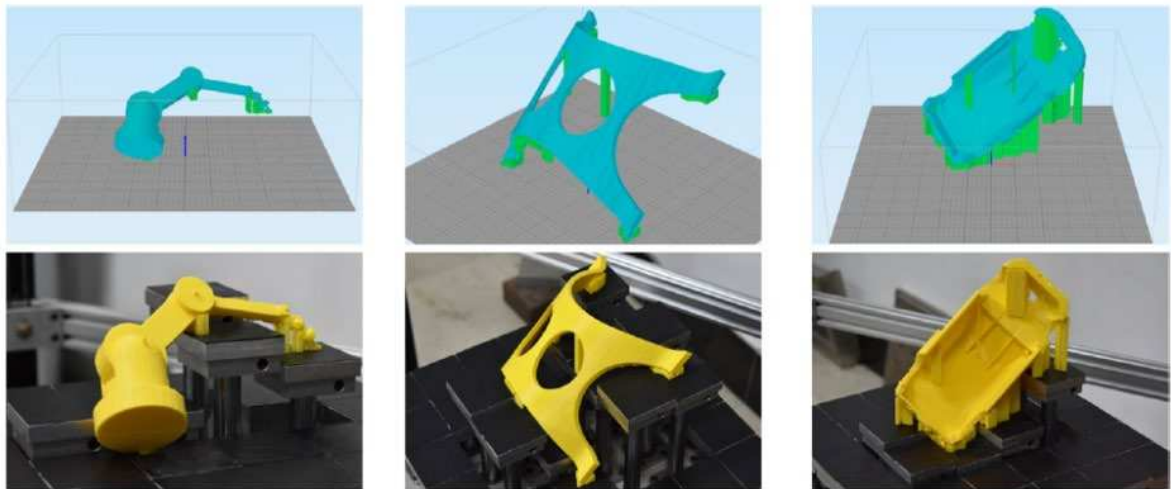


Figura 5.9 Tecnologia FDM con piattaforma di supporto flessibile

5.3.3.6 Lavorabilità e densità di impacchettamento

In quest'ultimo sottoparagrafo vengono presi in considerazione i criteri di orientamento meno utilizzati negli articoli presenti in tabella. Si esplorano dunque quelle metodologie che, pur non essendo frequentemente adottate, offrono potenziali vantaggi significativi nella produzione mediante additive manufacturing.

Il concetto di lavorabilità è strettamente legato alla possibilità di modificare la geometria della parte in modo tale da renderla effettivamente producibile attraverso un determinato processo di additive manufacturing. La lavorabilità, quindi, non si limita solo alla capacità di produrre una parte, ma comprende anche l'ottimizzazione della geometria per facilitare il processo di produzione e migliorare la qualità finale del prodotto.

Nella pratica, passando da un modello CAD 3D al modello reale, si incontrano diverse limitazioni dovute ai vincoli fisici delle stampanti 3D. Queste limitazioni influenzano la capacità di produrre geometrie complesse, imponendo in particolare un limite alla dimensione minima delle parti che possono essere effettivamente realizzate. Tale limite varia a seconda della tecnologia di stampa e, quindi, del tipo di stampante utilizzata.

Ad esempio, una dimensione minima che una stampante FDM (Fused Deposition Modeling) potrebbe non riuscire a produrre con precisione, potrebbe invece essere realizzata senza difficoltà con una stampante SLA (Stereolithography). Questo

perché le tecnologie SLA utilizzano un diverso principio di funzionamento, basato sulla polimerizzazione di una resina liquida tramite un laser, che consente di ottenere dettagli molto più fini rispetto alla deposizione di filamento tipica delle stampanti FDM.

Anche all'interno della stessa tecnologia, le prestazioni possono variare in base alle specifiche della macchina utilizzata. Prendendo come esempio la tecnologia EBM (Electron Beam Melting), si osserva che una maggiore potenza del fascio elettronico può incrementare la zona di fusione. Ciò comporta una riduzione del limite inferiore della dimensione delle parti producibili, migliorando l'accuratezza nella realizzazione di particolari più piccoli. In altre parole, una macchina EBM con un fascio elettronico più potente è capace di fondere il materiale in modo più preciso, consentendo la produzione di dettagli più minuti.

Nell'articolo [10], viene proposto un metodo innovativo che si articola in diverse fasi. Inizialmente, la geometria della parte viene modificata per garantirne la producibilità. Questa prima fase è cruciale perché assicura che la parte possa essere effettivamente realizzata con le tecnologie di stampa 3D disponibili, senza incorrere in problemi tecnici che potrebbero compromettere il processo produttivo o la qualità del prodotto finale.

Successivamente, il metodo prevede una simulazione tramite algoritmo per determinare l'area effettivamente coperta dalla testina nel processo di stampa. Questa simulazione è fondamentale perché permette di prevedere con precisione come verrà depositato il materiale strato per strato, identificando eventuali problematiche e ottimizzando il percorso della testina di stampa.

Infine, il metodo ottimizza la direzione di stampa, cercando di minimizzare il numero di modifiche necessarie alla geometria della parte. Questo passaggio finale è importante perché, riducendo al minimo le modifiche, si conserva l'integrità del design originale e si migliora l'efficienza del processo produttivo. Ottimizzare la direzione di stampa significa anche ridurre i tempi di produzione e i costi, aumentando la competitività del prodotto finito sul mercato.



Figura 5.10 Risultati della correzione del modello per l'articolo [10]. Da sinistra a destra: input dei modelli non corretti con le corrispondenti stampe non riuscite, modelli corretti, e le loro stampe di successo. Il materiale aggiunto e rimosso viene evidenziato.

Nell'articolo [37], il concetto di lavorabilità è applicato alle strutture reticolari nella stampa SLM (Selective Laser Melting). In questo contesto, viene utilizzata una funzione che mette in relazione la lavorabilità con l'area di overhang delle strutture reticolari. Le strutture reticolari, essendo caratterizzate da una geometria complessa, presentano sfide uniche nel processo di stampa SLM. L'overhang, ovvero le parti della struttura che sporgono senza supporto, può causare problemi durante la stampa, come deformazioni o difetti strutturali. Pertanto, l'applicazione della funzione di lavorabilità che considera l'area di overhang consente di prevedere e mitigare tali problemi, ottimizzando il design per una migliore producibilità e qualità del prodotto finale.

L'ultimo criterio di orientamento analizzato è la densità di impacchettamento. Questo criterio è strettamente legato al concetto di produttività e alla produzione di lotti di parti. La densità di impacchettamento si riferisce alla capacità di disporre il maggior numero possibile di parti all'interno di un volume di costruzione definito, massimizzando l'utilizzo dello spazio disponibile e, di conseguenza, la produttività del processo di stampa.

Nell'articolo [1], la densità di impacchettamento viene valutata per quattro diverse tecnologie di stampa e in due differenti scenari. In ciascuno scenario, viene assegnato un "peso" specifico al criterio della densità di impacchettamento, riconoscendo l'importanza di questo aspetto nella determinazione dell'efficienza e dell'economicità del processo di produzione. L'analisi comparativa tra le tecnologie e gli scenari permette di identificare le migliori pratiche per ottimizzare la disposizione delle parti e migliorare la produttività complessiva.

Nell'articolo [11], la densità di impacchettamento viene esaminata attraverso una formula specifica che lega il numero di parti da produrre al numero di layer necessari e all'altezza del layer. Questa formula consente di calcolare con precisione la densità di impacchettamento in funzione delle caratteristiche del processo di stampa e delle specifiche del progetto. In particolare, il numero di layer e l'altezza del layer influenzano direttamente la durata del processo di stampa e la quantità di materiale utilizzato. Pertanto, l'ottimizzazione della densità di impacchettamento tramite questa formula permette di ridurre i tempi di produzione e i costi, migliorando l'efficienza e la competitività della produzione.

5.3.4 Metodo di ottimizzazione e utilizzo di algoritmi

Definite le tecnologie di riferimento e i criteri di orientamento i vari articoli utilizzano diversi metodi per ricercare il miglior orientamento di stampa. Questi metodi si basano principalmente su massimizzazioni o minimizzazioni di funzioni obiettivo tramite operatori matematici, utilizzo di algoritmi, metodi di comparazione di soluzioni o una loro combinazione.

In generale gli autori percorrono, a seconda dei casi, due differenti strade: cercare direttamente una OBO (Optimal Build Orientation) lavorando su una o più funzioni obiettivo oppure determinare la OBO andando a ricercarla tra possibili ABOs (Alternative Build Orientation) determinate nella fase antecedente all'ottimizzazione.

In molti articoli come [3], [4] o [14] ad esempio, si utilizzano algoritmi per l'ottimizzazione di funzioni obiettivo definite dai diversi criteri di orientamento scelti dagli autori. In particolare in [3] vengono utilizzati cinque diversi algoritmi e i risultati vengono comparati. In [4] viene utilizzato un particolare algoritmo genetico (NGSA-II) per la determinazione della soluzione ottimale relativa ad ogni criterio di orientamento e infine queste soluzioni vengono comparate tra loro. In [14] per la ricerca della soluzione ottimale viene utilizzato un algoritmo (Electromagnetism-like algorithm) che simula la teoria dell'elettromagnetismo utilizzando concetti di attrazione e repulsione.

Un algoritmo genetico è una tecnica di ottimizzazione ispirata ai principi della selezione naturale e dell'evoluzione biologica. Questi algoritmi sono utilizzati per trovare soluzioni approssimative a problemi complessi, dove le soluzioni esatte non sono facilmente ottenibili.

Gli algoritmi genetici si basano su tre operazioni principali: selezione, crossover (o ricombinazione), e mutazione.

1. **Selezione:** Questa fase imita il processo di selezione naturale. Vengono selezionati gli individui migliori (soluzioni) dalla popolazione corrente basandosi sulla loro "fitness" o adattabilità al problema. Le soluzioni con un punteggio di fitness più alto hanno maggiori probabilità di essere scelte per la riproduzione.
2. **Crossover:** Durante questa fase, coppie di soluzioni selezionate si combinano per produrre nuove soluzioni (figli). Il crossover mescola le caratteristiche dei genitori per creare nuovi individui che possano potenzialmente avere una fitness migliore.
3. **Mutazione:** Questa fase introduce variazioni casuali nelle soluzioni. La mutazione garantisce che l'algoritmo possa esplorare un ampio spazio di soluzioni e non si limiti solo alle caratteristiche presenti nei genitori. Piccoli cambiamenti casuali sono applicati alle nuove soluzioni per mantenere la diversità nella popolazione.

Articoli come il [17], invece, utilizzano algoritmi generati direttamente dagli autori per determinare la direzione ottimale di stampa.

Nei paragrafi precedenti, sono stati esaminati articoli che utilizzano metodi e criteri singolari per offrire una panoramica più ampia degli approcci adottati dagli autori nell'affrontare il problema dell'ottimizzazione. Anche in questo paragrafo si seguirà la stessa linea, soffermandoci su articoli specifici che impiegano tali metodi.

L'articolo [5] presenta una combinazione di un algoritmo genetico per la ricerca di una soluzione globale e un metodo denominato "simulated annealing algorithm" (SAA) per la ricerca di una soluzione locale.

Nell'articolo [7], gli autori ottimizzano il percorso di stampa utilizzando un algoritmo che integra vari metodi. Il processo inizia determinando la direzione principale di stampa attraverso l'analisi delle componenti principali (PCA, Principal Component Analysis). Successivamente, vengono generati i singoli percorsi di stampa utilizzando un algoritmo basato sul "greedy algorithm" e infine viene creato il percorso globale risolvendo il problema del commesso viaggiatore, noto come "Traveling Salesman Problem" (TSP).

Nell'articolo [13], l'ottimizzazione viene ottenuta utilizzando un metodo descritto nell'articolo [61], che si basa anch'esso sulla PCA.

L'articolo [24] propone un metodo per trovare il miglior orientamento di stampa combinando un algoritmo genetico con il metodo TOPSIS. Il processo inizia cercando le Part Build Orientations (PBOs) tramite il metodo Latin Hypercube Sampling (LHS) e applicando criteri di valutazione del campione. Successivamente, il problema della soluzione multicriterio viene risolto utilizzando NGS-II e la soluzione ottimale viene selezionata tramite il metodo TOPSIS. Il metodo TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) è una tecnica di decisione multicriterio utilizzata per identificare la soluzione ottimale tra un insieme di alternative, basandosi sulla vicinanza a una soluzione ideale e la lontananza da una soluzione anti-ideale.

Il metodo TOPSIS è utilizzato singolarmente nell'articolo [1] oppure in combinazione con altri metodi o algoritmi, come nel caso appena descritto e nell'articolo [33]. Nell'articolo [32], il TOPSIS è combinato con il CSM (cosine similarity measure).

Nell'articolo [25], viene utilizzato un modello di controllo definito PID (proportional integral derivative). Diverse funzioni obiettivo sono definite in relazione a ogni criterio di orientamento considerato, e il PID agisce come un sistema di correzione dell'orientamento in un controllo a retroazione.

Nell'articolo [34], viene utilizzata una combinazione tra il metodo WSM (weighted sum model) e la GRA (grey relational analysis).

Nell'articolo [41], l'ottimizzazione viene ottenuta tramite il metodo ITSP (Iterative Tabu Search Procedure), che si compone di sei passaggi distinti.

Nell'articolo [54], l'ottimizzazione è raggiunta mediante un metodo multicriterio chiamato SAW (simple additive weighting).

Gli articoli [2] e [43] propongono due metodi basati sul machine learning. Questi metodi sviluppano algoritmi capaci di apprendere dai dati e fare previsioni o prendere decisioni senza essere esplicitamente programmati, analizzando i dati, individuando pattern nascosti e migliorando le proprie performance nel tempo.

L'articolo [39] utilizza un sistema multicriterio fuzzy. Questo processo decisionale mira a determinare l'orientamento ottimale della costruzione da un insieme finito di alternative. Si sviluppa in due fasi principali: l'identificazione e la normalizzazione degli attributi, seguita dall'aggregazione e classificazione. Infine, il risultato ottenuto viene comparato con gli OBO ottenuti con altri metodi.

Dalla *Tabella 8-1* si può facilmente notare come la maggior parte dei metodi di ottimizzazione consideri l'utilizzo di algoritmi, in particolare algoritmi genetici. L'utilizzo di questa tipologia di algoritmi presenta vantaggi e svantaggi.

Tra i principali vantaggi, spicca l'efficienza nell'ottimizzazione. Gli algoritmi genetici sono molto efficaci nel trovare soluzioni ottimali in spazi di ricerca complessi e multidimensionali, riuscendo a esplorare un'ampia gamma di possibili orientamenti di stampa.

Questo permette di individuare configurazioni che minimizzano il tempo di stampa, il consumo di materiale e i supporti necessari. Inoltre, questi algoritmi sono altamente adattabili a diversi criteri di ottimizzazione, consentendo di ottimizzare vari parametri come la resistenza meccanica della parte, la qualità della superficie e la riduzione delle deformazioni quindi particolarmente indicati per problemi multicriterio.

Un altro aspetto positivo è la capacità di scoprire soluzioni non intuitive, che non sarebbero facilmente individuabili attraverso metodi tradizionali o euristici. Questo è particolarmente utile quando la migliore orientazione di stampa non è ovvia. Inoltre, la robustezza degli algoritmi genetici permette di gestire problemi con molte variabili e vincoli, rendendoli adatti per applicazioni industriali dove i requisiti possono essere complessi e molteplici.

Tuttavia, l'uso di algoritmi genetici comporta anche alcuni svantaggi. Uno dei principali è il tempo di calcolo elevato. Gli algoritmi genetici possono richiedere un tempo significativo, specialmente per problemi complessi con molte variabili, rendendo il processo di ottimizzazione lento. Inoltre, poiché utilizzano processi stocastici (casuali), i risultati possono variare tra esecuzioni successive, rendendo difficile ottenere una soluzione ripetibile e prevedibile.

La complessità nella configurazione è un altro svantaggio, poiché la selezione di parametri come la dimensione della popolazione, il tasso di mutazione e il tasso di crossover richiede una comprensione approfondita dell'algoritmo.

Gli algoritmi genetici richiedono inoltre la definizione di una funzione di fitness appropriata, capace di valutare adeguatamente ogni possibile soluzione, il che può essere difficile. Infine, c'è il rischio di sovradimensionamento, in quanto gli algoritmi genetici possono talvolta convergere verso soluzioni subottimali se non sono configurati correttamente o se i criteri di selezione e crossover non sono ben bilanciati.

5.3.5 Perimetro del metodo

L'ultimo criterio di valutazione degli articoli è definito come "perimetro del metodo". Come già visto nei paragrafi precedenti i criteri di orientamento e i metodi di ottimizzazione della direzione di stampa non si limitano a considerare il solo processo di stampa ma mirano in molti casi al miglioramento di altri parametri del processo di produzione additiva.

L'influenza della direzione di stampa nel processo di produzione additiva è significativa e si estende dal pre-processo al post-processo, coinvolgendo molteplici aspetti che vanno dall'ottimizzazione della progettazione alla qualità del prodotto finale. Nel pre-processo, la direzione di stampa determina come il pezzo viene

orientato sulla piattaforma di costruzione, influenzando la distribuzione delle tensioni interne e la resistenza meccanica del pezzo finale. Inoltre, l'orientamento influisce sul numero e sulla posizione dei supporti necessari, con un orientamento ottimale che può ridurre il numero di supporti richiesti, minimizzando il materiale utilizzato e il tempo necessario per la loro rimozione dopo la stampa. Anche la pianificazione del percorso di stampa ne è influenzata: l'orientamento incide sui percorsi che la testina di stampa o il laser deve seguire, impattando la durata complessiva della stampa, e determina lo spessore degli strati, che può influenzare la risoluzione e la finitura superficiale del pezzo.

Nel processo di stampa, l'orientamento può influire sulla precisione dimensionale del pezzo, con alcuni orientamenti che possono ridurre le deformazioni e migliorare la fedeltà al progetto originale. La resistenza meccanica e la durezza del pezzo possono variare a seconda della direzione di stampa; per esempio, le parti stampate lungo l'asse Z possono presentare differenti proprietà meccaniche rispetto a quelle stampate lungo gli assi X o Y. Un orientamento ottimale può ridurre gli sprechi di materiale, migliorando l'efficienza complessiva della produzione, e influire sul tempo di stampa, poiché ridurre il numero di strati necessari può accelerare il processo di costruzione.

Nel post-processo, l'orientamento influisce sulla facilità di rimozione dei supporti, rendendo alcuni pezzi più facili da pulire e rifinire rispetto ad altri. Una minore necessità di supporti può ridurre i difetti superficiali e migliorare l'estetica del pezzo finito. L'orientamento influisce anche sulla distribuzione delle tensioni residue, influenzando l'efficacia dei trattamenti termici, e sulla rugosità superficiale, determinando la necessità di ulteriori trattamenti di finitura per ottenere una superficie liscia e omogenea.

In linea generale, i criteri di orientamento e ottimizzazione nel processo di produzione additiva coinvolgono vari aspetti che spaziano dalla fase di progettazione fino alla fase finale di post-processo. Tuttavia, è importante notare che alcuni articoli evidenziano una maggiore sensibilità verso parametri del processo che non sono limitati esclusivamente alla fase di produzione. Questi articoli prendono in considerazione l'intero ciclo di stampa del prodotto, dall'inizio alla fine, e mostrano una particolare attenzione a come i criteri di orientamento e ottimizzazione possono

influenzare aspetti come la preparazione del modello, la gestione dei materiali, l'efficienza energetica, e la qualità finale del prodotto.

In articoli come [1], [32], [41], [54], e [56], il criterio di orientamento "costo" viene esaminato in relazione all'intero processo di produzione additiva. Questi studi considerano dettagliatamente vari tipi di costi associati al processo, inclusi i costi di preparazione, i costi dell'energia, i costi di manodopera, i costi di gestione e i costi di post-processo. Per questa ragione, nella tabella riepilogativa in Appendice, a questi articoli è stato assegnato, oltre al perimetro del metodo "stampa 3D", anche quello dell'"economicità", riconoscendo l'attenzione dedicata agli aspetti economici lungo tutto il ciclo di produzione.

Nell'articolo [42], gli autori pongono particolare enfasi sull'impatto ambientale del processo di stampa, collegando questo aspetto ai criteri di orientamento che mirano alla riduzione dei tempi di costruzione e alla minimizzazione delle strutture di supporto, con conseguente riduzione dello spreco di materiale. Questo approccio non solo dimostra un'attenzione all'efficienza produttiva, ma sottolinea anche la rilevanza della sostenibilità ambientale. La considerazione degli autori può essere estesa a tutti i documenti che evidenziano l'importanza di ridurre i tempi e l'uso di materiali, promuovendo così un approccio più ecologico alla produzione additiva.

L'articolo [11] si concentra sull'ottimizzazione del post-processo, proponendo l'orientamento della stampa in modo da ridurre i tempi necessari per eliminare le strutture di supporto e diminuire la necessità di lavorazioni di finitura superficiale. Questa ottimizzazione non solo migliora la qualità delle superfici costruite, ma anche l'efficienza complessiva del processo di produzione.

Nell'articolo [55], gli autori dedicano particolare attenzione all'ottimizzazione del post-processo per la tecnologia SLA (stereolitografia), cercando di ridurre sia i tempi che i costi associati. Questo approccio specifico per la SLA dimostra come l'ottimizzazione del post-processo possa variare in base alla tecnologia di stampa utilizzata, ma con obiettivi comuni di efficienza e riduzione dei costi.

Infine, l'articolo [59] esamina il miglioramento delle fasi di post-processo con l'obiettivo di migliorare la qualità superficiale della parte costruita. Gli autori riconoscono l'importanza di ottenere superfici di alta qualità e propongono metodi

per ottimizzare queste fasi, contribuendo a un prodotto finale di maggiore valore e riducendo la necessità di ulteriori lavorazioni.

In definitiva, la maggior parte degli articoli selezionati in questo elaboratori tesi, concentra la ricerca del miglior orientamento di stampa esclusivamente sulla fase di produzione, con alcune considerazioni che vanno oltre, soprattutto riguardo agli effetti di questo parametro sui costi e sui tempi di produzione. La principale attenzione è rivolta all'ottimizzazione immediata del processo di stampa, cercando di ridurre i tempi e i costi operativi, ma raramente viene adottata una prospettiva più ampia che includa l'intero ciclo di vita della parte prodotta.

Solo pochi articoli adottano una visione più completa del processo di produzione additiva, concentrandosi sulla riduzione delle lavorazioni di post-processo. In questi studi, l'attenzione si rivolge principalmente alla finitura superficiale, alla facilità di rimozione delle strutture di supporto e all'effetto che queste hanno sull'accuratezza superficiale della parte finale. Questi aspetti sono essenziali per migliorare la qualità della parte stampata e ridurre i costi aggiuntivi e i tempi associati alle operazioni di post-lavorazione.

Tuttavia, gli articoli che prendono in considerazione aspetti oggi di cruciale importanza nel contesto della produzione in generale, come l'impatto ambientale e la sostenibilità, sono estremamente rari. Questi aspetti vengono spesso toccati solo marginalmente e non ricevono l'attenzione che meriterebbero. Ad esempio, come evidenziato in questo paragrafo, solo l'articolo [39] fa esplicito riferimento a concetti di impatto ambientale, ma si limita a considerazioni sui tempi di produzione e sulla riduzione del materiale utilizzato, senza entrare nel merito di una valutazione più ampia e approfondita sull'impatto ambientale complessivo.

La mancanza di un approccio integrato che includa considerazioni ambientali e di sostenibilità rappresenta una significativa lacuna nella letteratura attuale. È necessario un approccio che incoraggi la ricerca e la documentazione di strategie che non solo migliorino l'efficienza produttiva ma che siano anche ecologicamente responsabili e sostenibili nel lungo periodo. La produzione additiva ha il potenziale per rivoluzionare il modo in cui fabbrichiamo e utilizziamo i prodotti, ma per realizzare appieno questo potenziale, è indispensabile adottare una strategia che

consideri tutti gli aspetti del ciclo di vita del prodotto, dall'ideazione e produzione alla fine della vita utile e al riciclo.

In futuro, l'orientamento di stampa potrebbe essere ottimizzato non solo per la fase di produzione, ma anche per l'intero ciclo di vita della parte. Questo include l'ottimizzazione per facilitare interventi di manutenzione o riparazione. Parti con orientamenti che consentono un accesso più facile a componenti critici possono ridurre i tempi di fermo e i costi di manutenzione. Inoltre, studiare come l'orientamento influisce sulla resistenza strutturale e sulla durata della parte è essenziale per minimizzare i punti di stress e distribuire uniformemente le sollecitazioni meccaniche durante l'uso.

L'orientamento di stampa può essere ottimizzato in relazione all'uso previsto della parte. Ad esempio, considerando come l'orientamento influisce sulle prestazioni durante l'uso, parti destinate a sopportare carichi elevati o vibrazioni potrebbero beneficiare di orientamenti che massimizzano la resistenza meccanica nelle direzioni critiche. Per parti utilizzate in contesti dove l'ergonomia è cruciale, come strumenti o componenti indossabili, l'orientamento di stampa può essere ottimizzato per migliorare il comfort e la facilità d'uso.

L'ottimizzazione dell'orientamento di stampa in termini di impatto ambientale diventerà sempre più importante. Questo potrà includere l'orientamento delle parti per ridurre al minimo i supporti necessari e, quindi, i rifiuti di materiale, riducendo anche il consumo di energia associato alla rimozione e al riciclo dei supporti. Integrare l'uso di materiali sostenibili e riciclabili e ottimizzare l'orientamento per migliorare l'efficienza del materiale e ridurre lo spreco è un altro passo cruciale verso la sostenibilità.

La sostenibilità può essere migliorata attraverso varie strategie, come ottimizzare l'orientamento per ridurre il tempo di stampa e, di conseguenza, il consumo energetico delle stampanti, con un impatto significativo sui costi operativi e sull'impronta di carbonio della produzione. Inoltre, considerando l'orientamento in funzione della facilità di riciclo alla fine della vita utile della parte, le parti stampate in modo da facilitare la separazione dei materiali possono essere più facilmente riciclate.

L'uso di algoritmi avanzati di intelligenza artificiale e machine learning può potenziare ulteriormente la ricerca del miglior orientamento di stampa. Questi algoritmi possono analizzare grandi quantità di dati per identificare pattern e ottimizzare l'orientamento in base a criteri complessi e multidimensionali.

In sintesi, il futuro della ricerca sul miglior orientamento di stampa 3D sarà sempre più integrato con una visione olistica che consideri l'intero ciclo di vita della parte, il suo utilizzo, l'impatto ambientale e la sostenibilità. Questo approccio multidimensionale non solo migliorerà le prestazioni e la qualità delle parti stampate, ma contribuirà anche a pratiche di produzione più responsabili e sostenibili.

6 Conclusioni

L'obiettivo principale di questa tesi era analizzare come il problema dell'orientamento di stampa sia stato affrontato nel corso degli anni nella letteratura scientifica. Per raggiungere questo scopo, è stato adottato il metodo di ricerca ispirato al metodo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) e si è utilizzato il database SCOPUS per la raccolta dei dati da analizzare.

L'analisi delle pubblicazioni ha portato alla selezione di 60 articoli. Tra questi, 2 articoli sono delle review che trattano dei metodi di orientamento e della loro ottimizzazione, mentre i restanti articoli sono stati classificati e analizzati, evidenziando similitudini e particolarità.

Gli articoli esaminati hanno mostrato come le metodologie impiegate per determinare la direzione di stampa e i criteri di ottimizzazione varino in base alla tecnologia utilizzata e ai criteri di orientamento definiti dagli autori. Di conseguenza, questo elaborato non ha l'intento di fungere da manuale operativo, ma piuttosto di rappresentare uno strumento utile per orientarsi nella scelta di possibili criteri da migliorare o da combinare per sviluppare un metodo che consideri i vari fattori che influenzano l'intero processo di stampa additiva.

In prospettiva futura, la ricerca potrebbe essere ampliata utilizzando parole chiave differenti, al fine di includere un numero maggiore di pubblicazioni e ottenere una panoramica ancora più completa sull'argomento. È tuttavia importante sottolineare che l'analisi condotta presenta inevitabilmente un carattere parziale a causa di alcune limitazioni intrinseche alla metodologia utilizzata. In primo luogo, il database impiegato per la raccolta delle pubblicazioni è esclusivamente Scopus, il che potrebbe introdurre un "bias" nella tipologia di articoli inclusi nell'analisi. Scopus, pur essendo una delle più ampie e rispettate banche dati bibliografiche, non copre la totalità delle pubblicazioni scientifiche disponibili a livello globale. Di conseguenza, alcune ricerche rilevanti pubblicate in riviste non indicizzate in Scopus potrebbero essere state escluse, limitando la completezza e l'universalità dei risultati ottenuti.

In secondo luogo, un numero significativo di articoli è stato scartato poiché risultava impossibile consultarli. Le ragioni di questa impossibilità sono state

dettagliate alla fine del capitolo 4 e includono fattori come la mancanza di accesso ai testi completi, restrizioni imposte dagli editori, o l'indisponibilità degli articoli in formato digitale. Questo ulteriore filtro ha contribuito a ridurre ulteriormente il campione di pubblicazioni analizzate, incidendo potenzialmente sulla rappresentatività dei risultati.

Queste limitazioni devono essere tenute in considerazione nella valutazione delle conclusioni tratte dall'analisi. Sebbene i dati raccolti forniscano preziose informazioni e indicazioni utili, è essenziale riconoscere che l'insieme delle pubblicazioni esaminate potrebbe non rappresentare in modo esaustivo l'intera gamma di ricerche e studi esistenti sul tema. Per future ricerche, potrebbe essere utile considerare l'integrazione di ulteriori database bibliografici e l'adozione di strategie alternative per superare le limitazioni di accesso alle pubblicazioni, al fine di ottenere un quadro più completo e bilanciato del panorama scientifico.

7 Bibliografia

- [1] Sartini M., Luca M., Claudio F., Marco M. (2023). *A multi-criteria decision-making approach to optimize the part build orientation in additive manufacturing*. *Proceedings of the Design Society*, 3, 293–302;
- [2] Shi P., Qi Q., Qin Y., Meng F., Lou S., Scott P.J., Jiang X. (2023). *Learn to Rotate: Part Orientation for Reducing Support Volume via Generalizable Reinforcement Learning*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(12), 11687-11700;
- [3] Alba J.C.G., Garzon S.G., Nunez D.A., Mauledoux M., Aviles O.F. (2022). *3D printing part orientation optimization: discrete approximation of support volume*. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(6), 5958-5966;
- [4] Matos M.A., Rocha A.M.A.C., Costa L.A., Pereira A.I. (2021). *Many-objective optimization of build part orientation in additive manufacturing*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3-4), 747–762;
- [5] Li Z., Hu A., Fu J., Wu X., Li H. (2018). *Printing orientation optimization of 3D model*. *ACM International Conference Proceeding Series*, A148;
- [6] García Galicia J.A., Benes B. (2018). *Improving printing orientation for Fused Deposition Modeling printers by analyzing connected components*. *Additive Manufacturing*, 22, 720-728;
- [7] Hu K., Li H., Xi K. (2023). *A Toolpath Optimization Algorithm for Layered 3D Printings based on Solving the TSP*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2456(1), 012039;
- [8] Jiang H., He Z., Zhou E. (2023). *Simultaneous Optimization of Structural Topology and Print Direction for Additive Manufacturing Anisotropy*. *JixieGongchengXuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 59(17), 220-231;
- [9] Wang W., Shao H., Liu X., Yin B. (2020). *Printing Direction Optimization through Slice Number and Support Minimization*. *IEEE Access*, 8, 75646-75655, 9034015;
- [10] Ulu E., Gecer Ulu N., Hsiao W., Nelaturi S. (2020). *Manufacturability Oriented Model Correction and Build Direction Optimization for Additive Manufacturing*. *Journal of Mechanical Design*, 142(6), 4045107;

- [11] Kim S.I., Gee K., Hart A.J. (2024). *A Bayesian sampling framework for constrained optimisation of build layouts in additive manufacturing*. *International Journal of Production Research*;
- [12] Ramachandran R., Saravana Kumar G. (2023). *Hybrid optimization for build orientation in fused filament fabrication using low- and high-fidelity build time estimation models*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(09-10), 4283-4301;
- [13] Guo H., Xu J., Zhang S., Yi G. (2021). *Build orientation optimization based on weighted analysis of local surface region curvature*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1), 1-20, 304;
- [14] Matos M.A., Rocha A.M.A.C., Costa L.A., Pereira A.I. (2020). *Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(05-06), 1993-2005;
- [15] Shen H., Ye X., Xu G., Zhang L., Qian J., Fu J. (2020). *3D printing build orientation optimization for flexible support platform*. *Rapid Prototyping Journal*, 26(1), 59-72;
- [16] Guidetti X., Balta E.C., Nagel Y., Yin H., Rupenyan A., Lygeros J. (2023). *Stress flow guided non-planar print trajectory optimization for additive manufacturing of anisotropic polymers*. *Additive Manufacturing*, 72, 103628;
- [17] Alomari Y., Birosz M.T., Andó M. (2023). *Part orientation optimization for Wire and Arc Additive Manufacturing process for convex and non-convex shapes*. *Scientific Reports*, 13(1), 2203;
- [18] Abdulhameed O., Mian S.H., Moiduddin K., Al-Ahmari A., Ahmed N., Aboudaif M.K. (2022). *A Multi-Part Orientation Planning Schema for Fabrication of Non-Related Components Using Additive Manufacturing*. *Micromachines*, 13(10), 1777;
- [19] Mele M., Campana G., Bergmann A. (2022). *Optimisation of part orientation and design of support structures in laser powder bed fusion*. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16(2), 597-611;
- [20] Qin Y., Qi Q., Shi P., Scott P.J., Jiang X. (2021). *Status, issues, and future of computer-aided part orientation for additive manufacturing*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(05-06), 1295-1328;

- [21] Goguelin S., Dhokia V., Flynn J.M. (2021). *Bayesian optimisation of part orientation in additive manufacturing*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(12), 1263-1284;
- [22] Leirmo T.S., Martinsen K. (2020). *Deterministic part orientation in additive manufacturing using feature recognition*. *Procedia CIRP*, 88, 405-410;
- [23] Asadollahi-Yazdi E., Gardan J., Lafon P. (2018). *Multi-Objective Optimization of Additive Manufacturing Process*. *IFAC PapersOnLine*, 51(11), 152-157;
- [24] Khodaygan S., Golmohammadi A.H. (2018). *Multi-criteria optimization of the part build orientation (PBO) through a combined meta-modeling/NSGAI/TOPSIS method for additive manufacturing processes*. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 12(3), 1071-1085;
- [25] Qie L.F., Jing S.K., Lian R.C., Chen Y., Liu J.H. (2018). *Quantitative suggestions for build orientation selection*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(05-08), 1831-1845;
- [26] Al-Ahmari A.M., Abdulhameed O., Khan A.A. (2018). *An automatic and optimal selection of parts orientation in additive manufacturing*. *Rapid Prototyping Journal*, 24(4), 698-708;
- [27] Langelaar M. (2018). *Combined optimization of part topology, support structure layout and build orientation for additive manufacturing*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(5), 1985-2004;
- [28] Bender D., Barari A. (2023). *Using 3D Density-Gradient Vectors in Evolutionary Topology Optimization to Find the Build Direction for Additive Manufacturing*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 46;
- [29] Leirmo T.L., Semeniuta O. (2022). *Minimizing form errors in additive manufacturing with part build orientation: An optimization method for continuous solution spaces*. *Open Engineering*, 12(1), 227-244;
- [30] Mirzendehtdel A.M., Behandish M., Nelaturi S. (2021). *Optimizing Build Orientation for Support Removal using Multi-Axis Machining*. *Optimizing Build Orientation for Support Removal using Multi-Axis Machining*, 99, 247-258;
- [31] Di Angelo L., Di Stefano P., Guardiani E. (2020). *Search for the optimal build direction in additive manufacturing technologies: A review*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 71;

- [32] Sheng H., Xu J., Zhang S., Tan J., Wang K. (2023). *Build orientation determination of multi-feature mechanical parts in selective laser melting via multi-objective decision making*. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(2), 21;
- [33] Darvishi I., Khodaygan S., Mohammadi K., Golmohammadi A. (2023). *Concurrent optimization of surface roughness, build time, and mechanical properties of additively manufactured product in terms of part build orientation*. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(6), 1455-1471;
- [34] Sheng H., Xu J., Zhang S., Tan J. (2022). *Build orientation optimization for extrusion-based additive manufacturing coupling with adaptive slicing*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(03-04), 1133-1158;
- [35] Wang C. (2022). *Simultaneous optimization of build orientation and topology for self-supported enclosed voids in additive manufacturing*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 388, 114227;
- [36] Wang C., Qian X. (2020). *Simultaneous optimization of build orientation and topology for additive manufacturing*. *Additive Manufacturing*, 34, 1012246;
- [37] Huang R., Dai N., Cheng X. (2020). *Build orientation optimization for lightweight lattice parts production in selective laser melting by using a multicriteria genetic algorithm*. *Journal of Materials Research*, 35(15), 2046-2054;
- [38] Olsen J., Kim I.Y. (2020). *Design for additive manufacturing: 3D simultaneous topology and build orientation optimization*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62(4), 1989-2009;
- [39] Qin Y., Qi Q., Scott P.J., Jiang X. (2019). *Determination of optimal build orientation for additive manufacturing using Muirhead mean and prioritised average operators*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(8), 3015-3034;
- [40] Cheng L., To A. (2019). *Part-scale build orientation optimization for minimizing residual stress and support volume for metal additive manufacturing: Theory and experimental validation*. *CAD Computer Aided Design*, 113, 1-23;
- [41] Griffiths V., Scanlan J.P., Eres M.H., Martinez-Sykora A., Chinchapatnam P. (2019). *Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM)*. *European Journal of Operational Research*, 273(1), 334-352;
- [42] Mele M., Campana G., Lenzi F., Cimatti B. (2019). *Optimisation of build orientation to achieve minimum environmental impact in Stereo-lithography*. *Procedia Manufacturing*, 33, 145-152;

- [43] Zhang Y., Harik R., Fadel G., Bernard A. (2019). *A statistical method for build orientation determination in additive manufacturing*. *Rapid Prototyping Journal*, 25(1), 187-207;
- [44] Eiliat H., Urbanic J. (2019). *Determining the relationships between the build orientation, process parameters and voids in additive manufacturing material extrusion processes*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(01-04), 683-705;
- [45] Jaiswal P., Patel J., Rai R. (2018). *Build orientation optimization for additive manufacturing of functionally graded material objects*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(01-04), 223-235;
- [46] Chowdhury S., Mhapsekar K., Anand S. (2018). *Part Build Orientation Optimization and Neural Network-Based Geometry Compensation for Additive Manufacturing Process*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 140(3), 0310091;
- [47] Zhang Y., Bernard A., Harik R., Karunakaran K.P. (2017). *Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6), 1393-1407;
- [48] Zhang Y., De Backer W., Harik R., Bernard A. (2016). *Build Orientation Determination for Multi-material Deposition Additive Manufacturing with Continuous Fibers*. *Procedia CIRP*, 50, 414-419;
- [49] Das P., Chandran R., Samant R., Anand S. (2015). *Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures*. *Procedia Manufacturing*, 1, 343-354;
- [50] Villalpando L., Eiliat H., Urbanic R.J. (2014). *An optimization approach for components built by fused deposition modeling with parametric internal structures*. *Procedia CIRP*, 17, 800-805;
- [51] Mishra V., Ayas C., Langelaar M., van Keulen F. (2022). *Simultaneous topology and deposition direction optimization for Wire and Arc Additive Manufacturing*. *Manufacturing Letters*, 31, 45-51;
- [52] Habib A., Ahsan N., Khoda B. (2015). *Optimizing Material Deposition Direction for Functional Internal Architecture in Additive Manufacturing Processes*. *Procedia Manufacturing*, 1, 378-392;

- [53] Phatak A.M., Pande S.S. (2012). *Optimum part orientation in Rapid Prototyping using genetic algorithm*. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), 395-402;
- [54] Byun H.S., Lee K.H. (2006). *Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(03-04), 307-313;
- [55] Kim H.-C., Lee S.-H. (2005). *Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization*. *CAD Computer Aided Design*, 37(7), 711-725;
- [56] Pham D.T., Dimov S.S., Gault R.S. (1999). *Part orientation in stereolithography*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(9), 674-682;
- [57] Hu Z., Lee K., Hur J. (2004). *Determination of optimal build orientation for hybrid rapid-prototyping*. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 378-383;
- [58] Thrimurthulu K., Pandey P.M., Reddy N.V. (2004). *Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), 585-594;
- [59] Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. (2009). *Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(07-08), 714-730;
- [60] Singhal S.K., Pandey A.P., Pandey P.M., Nagpal A.K. (2005). *Optimum part deposition orientation in stereolithography*. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(01-04), 319-328;
- [61] Luo N., Wang Q. (2016). *Fast slicing orientation determining and optimizing algorithm for least volumetric error in rapid prototyping*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(05-08), 1297-1313;

8 Appendice

8.1 Elenco delle stringhe utilizzate per la ricerca su Scopus

1. "3d printing" AND "part orientation" AND "optim**"
2. "3d printing" AND "part orientation" AND "improv**"
3. "3d printing" AND "part orientation" AND "multi-objective optimization"
4. "3d printing" AND "part orientation" AND "multicriteria decision making"
5. "3d printing" AND "print* orientation" AND "optim**"
6. "3d printing" AND "print* orientation" AND "improv**"
7. "3d printing" AND "print* orientation" AND "multi-objective optimization"
8. "3d printing" AND "print* orientation" AND "multicriteria decision making"
9. "3d printing" AND "print* direction" AND "optim**"
10. "3d printing" AND "print* direction" AND "improv**"
11. "3d printing" AND "print* direction" AND "multi-objective optimization"
12. "3d printing" AND "print* direction" AND "multicriteria decision making"
13. "3d printing" AND "build direction" AND "optim**"
14. "3d printing" AND "build direction" AND "improv**"
15. "3d printing" AND "build direction" AND "multi-objective optimization"
16. "3d printing" AND "build direction" AND "multicriteria decision making"
17. "3d printing" AND "build orientation" AND "optim**"
18. "3d printing" AND "build orientation" AND "improv**"
19. "3d printing" AND "build orientation" AND "multi-objective optimization"
20. "3d printing" AND "build orientation" AND "multicriteria decision making"
21. "3d printing" AND "material deposition" AND "optim**"
22. "3d printing" AND "material deposition" AND "improv**"
23. "3d printing" AND "material deposition" AND "multi-objective optimization"
24. "3d printing" AND "material deposition" AND "multicriteria decision making"
25. "3d printing" AND "deposition orientation" AND "optim**"
26. "3d printing" AND "deposition orientation" AND "improv**"
27. "3d printing" AND "deposition orientation" AND "multi-objective optimization"
28. "3d printing" AND "deposition orientation" AND "multicriteria decision making"
29. "3d printing" AND "deposition direction" AND "optim**"
30. "3d printing" AND "deposition direction" AND "improv**"
31. "3d printing" AND "deposition direction" AND "multi-objective optimization"
32. "3d printing" AND "deposition direction" AND "multicriteria decision making"
33. "additive manufacturing" AND "part orientation" AND "optim**"
34. "additive manufacturing" AND "part orientation" AND "improv**"

35. "additive manufacturing" AND "part orientation" AND "multi-objective optimization"
36. "additive manufacturing" AND "part orientation" AND "multicriteria decision making"
37. "additive manufacturing" AND "print* orientation" AND "optim*"
38. "additive manufacturing" AND "print* orientation" AND "improv*"
39. "additive manufacturing" AND "print* orientation" AND "multi-objective optimization"
40. "additive manufacturing" AND "print* orientation" AND "multicriteria decision making"
41. "additive manufacturing" AND "print* direction" AND "optim*"
42. "additive manufacturing" AND "print* direction" AND "improv*"
43. "additive manufacturing" AND "print* direction" AND "multi-objective optimization"
44. "additive manufacturing" AND "print* direction" AND "multicriteria decision making"
45. "additive manufacturing" AND "build direction" AND "optim*"
46. "additive manufacturing" AND "build direction" AND "improv*"
47. "additive manufacturing" AND "build direction" AND "multi-objective optimization"
48. "additive manufacturing" AND "build direction" AND "multicriteria decision making"
49. "additive manufacturing" AND "build orientation" AND "optim*"
50. "additive manufacturing" AND "build orientation" AND "improv*"
51. "additive manufacturing" AND "build orientation" AND "multi-objective optimization"
52. "additive manufacturing" AND "build orientation" AND "multicriteria decision making"
53. "additive manufacturing" AND "material deposition" AND "optim*"
54. "additive manufacturing" AND "material deposition" AND "improv*"
55. "additive manufacturing" AND "material deposition" AND "multi-objective optimization"
56. "additive manufacturing" AND "material deposition" AND "multicriteria decision making"
57. "additive manufacturing" AND "deposition orientation" AND "optim*"
58. "additive manufacturing" AND "deposition orientation" AND "improv*"
59. "additive manufacturing" AND "deposition orientation" AND "multi-objective optimization"
60. "additive manufacturing" AND "deposition orientation" AND "multicriteria decision making"
61. "additive manufacturing" AND "deposition direction" AND "optim*"
62. "additive manufacturing" AND "deposition direction" AND "improv*"
63. "additive manufacturing" AND "deposition direction" AND "multi-objective optimization"

64. "additive manufacturing" AND "deposition direction" AND "multicriteria decision making"
65. "rapid prototyping" AND "part orientation" AND "optim**"
66. "rapid prototyping" AND "part orientation" AND "improv**"
67. "rapid prototyping" AND "part orientation" AND "multi-objective optimization"
68. "rapid prototyping" AND "part orientation" AND "multicriteria decision making"
69. "rapid prototyping" AND "print* orientation" AND "optim**"
70. "rapid prototyping" AND "print* orientation" AND "improv**"
71. "rapid prototyping" AND "print* orientation" AND "multi-objective optimization"
72. "rapid prototyping" AND "print* orientation" AND "multicriteria decision making"
73. "rapid prototyping" AND "print* direction" AND "optim**"
74. "rapid prototyping" AND "print* direction" AND "improv**"
75. "rapid prototyping" AND "print* direction" AND "multi-objective optimization"
76. "rapid prototyping" AND "print* direction" AND "multicriteria decision making"
77. "rapid prototyping" AND "build direction" AND "optim**"
78. "rapid prototyping" AND "build direction" AND "improv**"
79. "rapid prototyping" AND "build direction" AND "multi-objective optimization"
80. "rapid prototyping" AND "build direction" AND "multicriteria decision making"
81. "rapid prototyping" AND "build orientation" AND "optim**"
82. "rapid prototyping" AND "build orientation" AND "improv**"
83. "rapid prototyping" AND "build orientation" AND "multi-objective optimization"
84. "rapid prototyping" AND "build orientation" AND "multicriteria decision making"
85. "rapid prototyping" AND "material deposition" AND "optim**"
86. "rapid prototyping" AND "material deposition" AND "improv**"
87. "rapid prototyping" AND "material deposition" AND "multi-objective optimization"
88. "rapid prototyping" AND "material deposition" AND "multicriteria decision making"
89. "rapid prototyping" AND "deposition orientation" AND "optim**"
90. "rapid prototyping" AND "deposition orientation" AND "improv**"
91. "rapid prototyping" AND "deposition orientation" AND "multi-objective optimization"
92. "rapid prototyping" AND "deposition orientation" AND "multicriteria decision making"
93. "rapid prototyping" AND "deposition direction" AND "optim**"
94. "rapid prototyping" AND "deposition direction" AND "improv**"

95. "rapid prototyping" AND "deposition direction" AND "multi-objective optimization"
96. "rapid prototyping" AND "deposition direction" AND "multicriteria decision making"
97. "three-dimensional printing" AND "part orientation" AND "optim*"
98. "three-dimensional printing" AND "part orientation" AND "improv*"
99. "three-dimensional printing" AND "part orientation" AND "multi-objective optimization"
100. "three-dimensional printing" AND "part orientation" AND "multicriteria decision making"
101. "three-dimensional printing" AND "print* orientation" AND "optim*"
102. "three-dimensional printing" AND "print* orientation" AND "improv*"
103. "three-dimensional printing" AND "print* orientation" AND "multi-objective optimization"
104. "three-dimensional printing" AND "print* orientation" AND "multicriteria decision making"
105. "three-dimensional printing" AND "print* direction" AND "optim*"
106. "three-dimensional printing" AND "print* direction" AND "improv*"
107. "three-dimensional printing" AND "print* direction" AND "multi-objective optimization"
108. "three-dimensional printing" AND "print* direction" AND "multicriteria decision making"
109. "three-dimensional printing" AND "build direction" AND "optim*"
110. "three-dimensional printing" AND "build direction" AND "improv*"
111. "three-dimensional printing" AND "build direction" AND "multi-objective optimization"
112. "three-dimensional printing" AND "build direction" AND "multicriteria decision making"
113. "three-dimensional printing" AND "build orientation" AND "optim*"
114. "three-dimensional printing" AND "build orientation" AND "improv*"
115. "three-dimensional printing" AND "build orientation" AND "multi-objective optimization"
116. "three-dimensional printing" AND "build orientation" AND "multicriteria decision making"
117. "three-dimensional printing" AND "material deposition" AND "optim*"
118. "three-dimensional printing" AND "material deposition" AND "improv*"
119. "three-dimensional printing" AND "material deposition" AND "multi-objective optimization"
120. "three-dimensional printing" AND "material deposition" AND "multicriteria decision making"
121. "three-dimensional printing" AND "deposition orientation" AND "optim*"
122. "three-dimensional printing" AND "deposition orientation" AND "improv*"
123. "three-dimensional printing" AND "deposition orientation" AND "multi-objective optimization"

124. "three-dimensional printing" AND "deposition orientation" AND "multicriteria decision making"
125. "three-dimensional printing" AND "deposition direction" AND "optim*"
126. "three-dimensional printing" AND "deposition direction" AND "improv*"
127. "three-dimensional printing" AND "deposition direction" AND "multi-objective optimization"
128. "three-dimensional printing" AND "deposition direction" AND "multicriteria decision making"
129. "stereolithography" AND "part orientation" AND "optim*"
130. "stereolithography" AND "part orientation" AND "improv*"
131. "stereolithography" AND "part orientation" AND "multi-objective optimization"
132. "stereolithography" AND "part orientation" AND "multicriteria decision making"
133. "stereolithography" AND "print* orientation" AND "optim*"
134. "stereolithography" AND "print* orientation" AND "improv*"
135. "stereolithography" AND "print* orientation" AND "multi-objective optimization"
136. "stereolithography" AND "print* orientation" AND "multicriteria decision making"
137. "stereolithography" AND "print* direction" AND "optim*"
138. "stereolithography" AND "print* direction" AND "improv*"
139. "stereolithography" AND "print* direction" AND "multi-objective optimization"
140. "stereolithography" AND "print* direction" AND "multicriteria decision making"
141. "stereolithography" AND "build direction" AND "optim*"
142. "stereolithography" AND "build direction" AND "improv*"
143. "stereolithography" AND "build direction" AND "multi-objective optimization"
144. "stereolithography" AND "build direction" AND "multicriteria decision making"
145. "stereolithography" AND "build orientation" AND "optim*"
146. "stereolithography" AND "build orientation" AND "improv*"
147. "stereolithography" AND "build orientation" AND "multi-objective optimization"
148. "stereolithography" AND "build orientation" AND "multicriteria decision making"
149. "stereolithography" AND "material deposition" AND "optim*"
150. "stereolithography" AND "material deposition" AND "improv*"
151. "stereolithography" AND "material deposition" AND "multi-objective optimization"
152. "stereolithography" AND "material deposition" AND "multicriteria decision making"
153. "stereolithography" AND "deposition orientation" AND "optim*"

154. "stereolithography" AND "deposition orientation" AND "improv*"
 155. "stereolithography" AND "deposition orientation" AND "multi-objective optimization"
 156. "stereolithography" AND "deposition orientation" AND "multicriteria decision making"
 157. "stereolithography" AND "deposition direction" AND "optim*"
 158. "stereolithography" AND "deposition direction" AND "improv*"
 159. "stereolithography" AND "deposition direction" AND "multi-objective optimization"
 160. "stereolithography" AND "deposition direction" AND "multicriteria decision making"

8.2 Clustering degli articoli

Articolo	Processo	Criterio di orientamento	Metodo di ottimizzazione	Algoritmo	Perimetro
[1]	L-PBF DED SLS FFF	Costo/efficacia Rapidità DI Resistenza	TOPSIS	Nessuno	Stampa 3D Economicità
[2]	Metodo generale	SS	Actor-critic	Machine learning	Stampa 3D
[3]	Metodo generale	SS	OOF	Generico	Stampa 3D
[4]	Metodo generale	SS SE Rapidità Rugosità Qualità	NGSA-II	Genetico	Stampa 3D
[5]	Metodo generale	SE SS Rapidità	Algoritmo genetico e SAA	Genetico	Stampa 3D
[6]	FDM	Rapidità	OOF	Generico	Stampa 3D
[7]	Metodo generale	Rapidità	TSP	Generico	Stampa 3D
[8]	Metodo generale	Resistenza	OOF	Generico	Stampa 3D
[9]	FDM	Rapidità	OOF	Genetico	Stampa 3D
[10]	Metodo generale	Lavorabilità	OOF	Nessuno	Stampa 3D

[11]	L-PBF	SS Rapidità DI	Bayesian	Genetico	Stampa 3D Post- processo
[12]	FFF	Rapidità	RS-CSMA gradiente ^e	Genetico	Stampa 3D
[13]	Metodo generale	Rugosità	[61]	Nessuno	Stampa 3D
[14]	FDM	SE SS Rapidità Rugosità Qualità	ELA	Genetico	Stampa 3D
[15]	FDM	SS Rapidità	MOPSO	Genetico	Stampa 3D
[16]	FFF	Resistenza	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[17]	WAAM	Qualità	OOF	Genetico	Stampa 3D
[18]	Metodo generale	Qualità Rapidità	OOF	Genetico	Stampa 3D
[19]	L-PBF	SE SS Rapidità Rugosità	OOF	Genetico	Stampa 3D
[21]	Metodo generale	SS	Bayesian	Genetico	Stampa 3D
[22]	Metodo generale	SE	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[23]	FDM	Qualità Rugosità	OOF	Genetico	Stampa 3D
[24]	Metodo generale	Rapidità Rugosità	NSGA-II TOPSIS	Genetico	Stampa 3D
[25]	SLA	SS Rapidità Rugosità	MADM PID	Nessuno	Stampa 3D
[26]	L-PBF	Qualità Rapidità	OOF	Genetico	Stampa 3D
[27]	Metodo generale	SS	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[28]	Metodo generale	SS	OOF	Generico	Stampa 3D
[29]	Metodo generale	Qualità	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[30]	Metodo generale	SS	OOF	Genetico	Stampa 3D

[32]	SLM	SE SS Rugosità Rapidità Costo	TOPSIS CSM	Nessuno	Stampa 3D Economicità
[33]	SLM	Rugosità Rapidità Resistenza	NGSA-II TOPSIS	Genetico	Stampa 3D
[34]	Metodo generale	SS SE Rugosità Rapidità Costo	WSM GRA	Nessuno	Stampa 3D
[35]	Metodo generale	SS	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[36]	Metodo generale	SS	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[37]	SLM	Qualità Lavorabilità	NSGA-II	Genetico	Stampa 3D
[38]	Metodo generale	SS	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[39]	Metodo generale	SS SE Rapidità Rugosità Costo Resistenza	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[40]	L-PBF	SS Resistenza	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[41]	SLM	Costo	ITSP	Nessuno	Stampa 3D Economicità
[42]	SLA	SS Rapidità	OOF	Genetico	Stampa 3D Impatto amb
[43]	Metodo generale	SE Qualità	OOF	Machine learning	Stampa 3D
[44]	Metodo generale	Rapidità	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[45]	FDM	Qualità	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[46]	Metodo generale	SS Qualità Resistenza	OOF ANN	Nessuno	Stampa 3D
[47]	SLA SLS FDM	Rapidità Costo	OFF	Genetico	Stampa 3D

[48]	FDM	Rapidità Qualità Costo	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[49]	Metodo generale	SE SS	OOF	Genetico	Stampa 3D
[50]	FDM	SE Rapidità	GA in MATLAB	Genetico	Stampa 3D
[51]	WAAM	Resistenza	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[52]	Metodo generale	Rapidità	OOF	Generico	Stampa 3D
[53]	SLA SLS FDM	Rapidità Qualità Costo	OOF	Genetico	Stampa 3D
[54]	FDM SLS SLA LOM	Rugosità Rapidità Costo	OOF	Nessuno	Stampa 3D Economicità
[55]	SLA	Rugosità	OOF	Genetico	Stampa 3D Postprocesso
[56]	SLA	SS Rapidità Costo	OOF	Nessuno	Stampa 3D
[57]	Metodo generale	SS Rapidità	OOF	Generico	Stampa 3D
[58]	FDM	Rapidità	OOF	Genetico	Stampa 3D
[59]	SLA	Rapidità Rugosità	OOF	Genetico	Stampa 3D Postprocesso
[60]	SLA	Rugosità	OOF	Generico	Stampa 3D

Tabella 8-1 Elenco articoli selezionati e clustering dei criteri di analisi

Legenda acronimi della Tabella 8-1

TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

OOF: Objective Optimization Function

NGSA-II: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

SS: Strutture di Supporto

SE: Staircase Effect

SAA: Simulated Annealing Algorithm

TSP: Traveling Salesman Problem

DI: Densità d'Impacchettamento

ELA: Electromagnetism-like Algorithm

RS-CSMA: Covariance Matrix Self-Adaptation Evolution Strategy with Repelling Subpopulations

MOPSO: Multi-Objective Particle Swarm Optimization

MADM: Multi Attribute Decision Making

PID: Proportional Integral Derivate

CSM: Cosine Similarity Measure

WSM: Weighted Sum Model

GRA: Grey Relation Analysis

ITSP: Iterative Tabu Search Procedure

ANN: Artificial Neural Network