



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale
A.A. 2023/2024
Sessione di Laurea Aprile 2024

**Analisi della letteratura
su problemi di Nesting per
Additive Manufacturing**

Relatori:
Prof.ssa Erica Pastore
Prof.ssa Manuela Galati

Candidato:
Davide Prosdocimi

ABSTRACT

L' Additive Manufacturing (Fabbricazione Additiva) rappresenta una metodologia di produzione sempre più utilizzata oggi in vari settori industriali.

Il presente lavoro di tesi è caratterizzato da un'analisi della letteratura esistente per quanto riguarda uno dei principali aspetti legati ai processi di Additive Manufacturing: il problema del posizionamento e dell'orientamento delle parti da realizzare all'interno del volume di stampa, affinché possano essere ridotti i tempi e i costi di produzione. Questo problema è noto come nesting, che a sua volta può riguardare un problema nelle due (Nesting 2D) o tre (Nesting 3D) dimensioni.

Al fine di analizzare la letteratura nel modo più coerente possibile, relativamente al problema del Nesting 2D e del Nesting 3D, è stata effettuata una classificazione sulla base delle caratteristiche comuni. Nello specifico, gli articoli che trattano il Nesting 2D sono stati raggruppati in base alle caratteristiche della modellazione (metodo di produzione, metodo di posizionamento delle parti, metodo di rappresentazione delle parti) mentre quelli relativi al Nesting 3D sono stati suddivisi sulla base della tecnologia adottata per il singolo lavoro di ricerca.

L'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare i pro e i contro delle soluzioni proposte dai vari ricercatori, tramite un attento confronto tra i vari lavori di ricerca analizzati, per poter comprendere quali siano le migliori caratteristiche della modellazione da adottare, in base al problema da risolvere, per poter ottenere i risultati migliori. Per quanto riguarda il Nesting 2D la situazione è però più chiara rispetto a quella

relativa al Nesting 3D. Dall'analisi effettuata emerge infatti che è più facile trovare buone soluzioni al problema del Nesting 2D rispetto a quello del Nesting 3D poiché si lavora con parti bidimensionali. D'altro canto, il Nesting 3D è quello che viene maggiormente utilizzato nei casi reali poiché, trattando le parti con forma tridimensionale, permette di rappresentare l'oggetto da realizzare in modo più accurato.

INDICE

CAPITOLO 1.....	9
1.1 ADDITIVE MANUFACTURING	9
1.1.1 <i>Introduzione all'Additive Manufacturing</i>	9
1.1.2 <i>Vantaggi e svantaggi rispetto alla produzione convenzionale</i>	11
1.1.3 <i>Descrizione del processo</i>	14
1.1.4 <i>Le tecnologie di produzione</i>	17
1.2 IL PROBLEMA DEL NESTING	26
1.2.1 <i>Descrizione del Nesting</i>	27
1.2.2 <i>Metodi di produzione</i>	29
1.2.3 <i>Metodi di rappresentazione dei pezzi</i>	31
1.3 CRITERI DI CLASSIFICAZIONE DELLA LETTERATURA.....	39
CAPITOLO 2 – NESTING 2D	41
2.1 OTTIMIZZAZIONE DEL POSIZIONAMENTO DI PIÙ PARTI RAPPRESENTATE TRAMITE PROJECTION PROFILE	45
2.1.1 <i>Ottimizzazione del processo per la tecnologia SLA</i>	48
2.1.2 <i>Metodi di risoluzione del problema tramite Projection Profile per una produzione Full Placement</i>	51
2.2 COMPARAZIONE DI RICERCHE CON ORIENTAMENTO DI COSTRUZIONE FISSO E PARTI RAPPRESENTATE TRAMITE BOUNDING BOX	55

2.3 IL PROBLEMA DEL NESTING 2D PER PARTI CON FORMA IRREGOLARE RAPPRESENTATE TRAMITE NFP	60
CAPITOLO 3 – NESTING 3D	62
3.1 LAVORI DI RICERCA PER LA TECNOLOGIA SLS	65
3.2 IL PROBLEMA DEL NESTING 3D PER LA TECNOLOGIA FDM	68
3.3 METODOLOGIE PER LA TECNOLOGIA SLA	69
3.4 NESTING 3D PER LA TECNOLOGIA SGC	75
CONCLUSIONI	76

INTRODUZIONE

L'Additive Manufacturing, nota anche come Fabbricazione Additiva, è una delle tecnologie abilitanti utilizzate nell'Industria 4.0. L'industria 4.0 rappresenta un processo di digitalizzazione dei processi produttivi per aumentare la produttività, ridurre gli sprechi di materiale e soddisfare le nuove richieste provenienti dal mercato come, ad esempio, la richiesta di personalizzazione dei prodotti.

Non tutte le parti da realizzare sono uguali. Infatti, queste possono avere altezze differenti e occupare aree diverse. Di conseguenza, la pianificazione della produzione, per minimizzare i tempi e i costi della stessa, rappresenta un problema da risolvere. I problemi principali sono relativi al Nesting e allo Scheduling della produzione a breve termine. Questa tesi si concentra sul problema di Nesting, vale a dire il problema del posizionamento e dell'orientamento delle singole parti da realizzare all'interno del volume di stampa, per ridurre i tempi e i costi di produzione.

Gli approcci che si possono adottare per la risoluzione del problema del Nesting dipendono dalle assunzioni effettuate relativamente alla rappresentazione, dal punto di vista dimensionale, delle parti da produrre: se le parti da realizzare sono rappresentate da forme bidimensionali, si parla di Nesting 2D, viceversa, se si considerano parti aventi forma tridimensionale, si parla di Nesting 3D.

Questo elaborato ha l'obiettivo di analizzare i lavori di ricerca presenti nella letteratura, pubblicati dai ricercatori stessi, relativamente al problema del Nesting 2D e del Nesting 3D. Gli articoli sono stati raggruppati secondo due criteri di classificazione: le caratteristiche della

modellazione in comune tra i vari articoli e la tecnologia adottata per il singolo lavoro svolto.

Il primo capitolo introduce l'Additive Manufacturing, i relativi vantaggi e svantaggi rispetto alla produzione convenzionale e le principali tecnologie utilizzate. Inoltre, fornisce una descrizione del problema del Nesting e le principali caratteristiche della modellazione per la risoluzione del problema stesso.

Il secondo capitolo analizza gli articoli presenti nella letteratura che propongono una soluzione al problema del Nesting 2D, attraverso una classificazione degli stessi basata sulle caratteristiche della modellazione in comune tra i vari lavori di ricerca.

Nel terzo capitolo sono esaminati i lavori di ricerca che hanno trattato il problema del Nesting 3D. In questo capitolo gli articoli sono classificati sulla base della tecnologia utilizzata per il singolo lavoro.

CAPITOLO 1

Il primo capitolo di questo elaborato comprende un'introduzione all'Additive Manufacturing e al problema del Nesting. L'Additive Manufacturing (Fabbricazione Additiva) viene inizialmente introdotta e successivamente comparata alla produzione convenzionale. Dopo aver descritto il processo di produzione, sarà analizzata dal punto di vista tecnologico. Per quanto concerne il Nesting, sarà descritto il problema e i vantaggi che può determinare.

1.1 Additive Manufacturing

1.1.1 Introduzione all'Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM), nota anche come Fabbricazione Additiva, nasce negli anni '80 quando Charles W. Hull, cofondatore della 3D Systems Corporation, ottenne il brevetto per la Stereolitografia [1].

Nonostante all'inizio lo scopo fosse quello di ottenere prototipi, grazie alle numerose ricerche svolte negli ultimi anni, l'applicazione dell'Additive Manufacturing si è estesa fino alla produzione di prodotti finali, acquisendo sempre più importanza in vari settori industriali, tra cui il settore Automobilistico, Aeronautico e Biomedicale [3].

Rispetto ai metodi di produzione convenzionali, in cui i prodotti vengono creati tramite asportazione e/o deformazione di materiale a partire da una forma solida, l'Additive Manufacturing permette la realizzazione di

oggetti tramite l'aggiunta di materiale, strato dopo strato, a partire da un modello CAD 3D.

Lo standard EN ISO/ASTM 52900:2021 definisce l'Additive Manufacturing nel seguente modo: "Processo di unione di materiali per realizzare parti a partire dai dati del modello 3D, di solito strato su strato, in contrapposizione alle metodologie di produzione sottrattiva e di produzione formativa" [2].

L'Additive Manufacturing rappresenta quindi un metodo di produzione innovativo che consente di realizzare prodotti con geometrie complesse, permettendo un'ampia flessibilità di progettazione data dall'assenza dei vincoli di produzione tradizionali. In Figura 1.1 sono rappresentati vari prodotti realizzati tramite la Fabbricazione Additiva.



Figura 1.1: Oggetti prodotti con la Fabbricazione Additiva [1]

1.1.2 Vantaggi e svantaggi rispetto alla produzione convenzionale

Oggi giorno l'Additive Manufacturing è sempre più adottata a livello globale e sta cambiando le metodologie di produzione dei prodotti, ma sono presenti alcuni aspetti negativi che devono ancora essere risolti. Ecco i principali svantaggi che comporta [3]:

- Le stampanti 3D producono un oggetto delle medesime o inferiori dimensioni del box in cui verrà realizzato. Tuttavia, questo si rivela come un limite di produzione: infatti, la dimensione del contenitore per la stampa limita necessariamente quella dell'oggetto da produrre. Tale problema può essere risolto dividendo il pezzo in vari componenti e, dopo averli fabbricati, assemblarli, come proposto da Vanek et al (2014) [56] e Chen et al (2015) [57]. Questa soluzione richiede però tempo aggiuntivo per l'assemblaggio delle parti a fine processo.
- Per quanto concerne la produzione di massa, i tempi di produzione dell'Additive Manufacturing sono in media più lunghi rispetto alla produzione convenzionale [3]. Inoltre, anche i costi aumentano notevolmente.
- Poiché attraverso l'Additive Manufacturing si può stampare qualsiasi tipo di oggetto, potrebbe intervenire il governo per imporre dei vincoli su cosa si potrebbe stampare oppure no, per tutelare la sicurezza pubblica.
- Alcune tecnologie di stampa richiedono la presenza di strutture di supporto che andranno poi rimosse dopo la stampa dell'oggetto.

Aumenta così il tempo di post-processo e quindi il tempo totale di produzione.

Nonostante gli svantaggi appena elencati, l'Additive Manufacturing presenta alcuni vantaggi significativi rispetto alla produzione convenzionale:

- Grazie alla sua estrema flessibilità, l'AM permette di soddisfare le esigenze individuali dei clienti con prodotti finali personalizzati [4]. Il cliente è quindi più coinvolto nella realizzazione del prodotto e, nel caso in cui effettuasse richieste di modifica, queste potrebbero essere eseguite senza avere un impatto significativo sui costi [3].
- Poiché il prodotto viene realizzato a partire da un modello CAD 3D, il cliente può acquistarlo da remoto e, successivamente, stamparlo in autonomia. Il principale vantaggio che si ottiene dalla possibilità di trasferire il design del prodotto in modo digitale consiste nella riduzione dei costi della logistica, in quanto non strettamente necessaria. Di conseguenza, il design può essere trasferito al cliente non appena è stato completato [3].
- La quantità di materiale che viene aggiunta strato dopo strato per la creazione del prodotto è pari a quella indispensabile. Non sono quindi presenti scarti di materiale utilizzato. Viene ridotto al minimo l'utilizzo della materia prima e quindi i relativi costi [5].

- Nel caso in cui dovessero essere realizzati pezzi con geometrie complesse e non in grandi quantità, il Lead Time risulta minore rispetto alla produzione convenzionale [55], in quanto l'Additive Manufacturing richiede un tempo minore per passare dalla fase iniziale del processo alla realizzazione del prodotto, come dimostrato da Kurdve, M., Persson, K., Widfeldt, M. et al [6] e rappresentato in Figura 1.2.
- Rispetto alla produzione convenzionale, l'Additive Manufacturing permette una libertà di progettazione maggiore (Design Freedom) grazie al minor numero di vincoli sia di tipo economico che di tipo tecnologico. È possibile, infatti, realizzare prodotti con geometrie complesse non realizzabili attraverso altre tecnologie. Inoltre, grazie ai vari tipi di materiali utilizzabili, è possibile rendere il prodotto leggero. In questo modo, alcuni settori (per esempio il settore Automotive) possono assicurarsi parti sia complesse che leggere, ottenendo così miglioramenti nelle prestazioni dei propri prodotti [7].

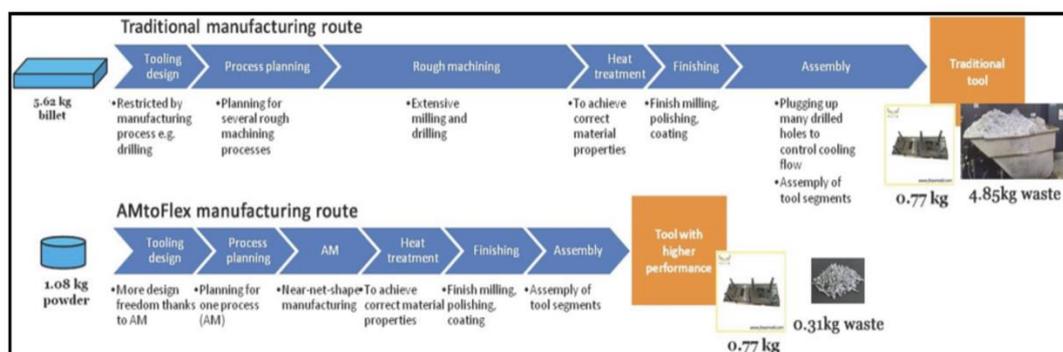


Figura 1.2: Differenze tra Produzione Tradizionale e AM, con riferimento al progetto realizzato da Kurdve, M., Persson, K., Widfeldt, M. et al [6]

1.1.3 Descrizione del processo

Il processo di sviluppo prodotto è caratterizzato da varie fasi, svolte in sequenza, illustrate in Figura 1.3.



Figura 1.3: Fasi del processo [8]

- 1. Fase 1:** Creazione del modello 3D. Durante questa fase viene generato il modello CAD 3D del prodotto che si vuole realizzare. Un esempio è rappresentato in Figura 1.4.

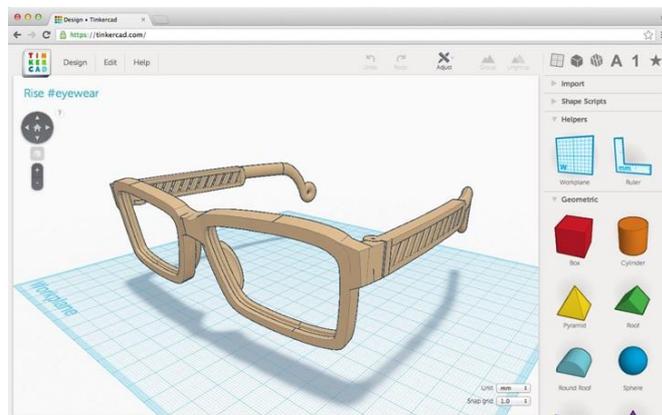


Figura 1.4: Occhiali – Disegno CAD 3D [10]

2. Fase 2: Il file sviluppato nella fase precedente viene convertito in formato STL (Standard Triangulation Language), formato standard di riferimento per l'Additive Manufacturing. In questo formato le superfici dell'oggetto sono rappresentate da triangoli, come mostrato in Figura 1.5, il cui numero dipende dalla grandezza del file. Ogni triangolo è descritto dai vertici, che ne indicano il posizionamento, e dalla normale, per poter comprendere quale sia il lato interno del componente rispetto alla superficie [9].



Figura 1.5: Un file CAD [sx] convertito in un file formato STL (dx)

[11]

3. Fase 3 e Fase 4: Il software di modellazione della stampante 3D elabora il file in formato STL dividendo l'oggetto in vari strati, caratterizzati da uno spessore e una geometria differente, in base alla forma dell'oggetto da realizzare. Questo processo è chiamato "Slicing" (Figura 1.6). In questo modo la stampante, elaborando i dati ottenuti dal processo di Slicing, capisce come lavorare per creare il prodotto.

- 4. Fase 5:** Durante questa fase la stampante 3D deposita il materiale, strato dopo strato, finchè il prodotto non è stato realizzato complessivamente. Questo processo è mostrato in Figura 1.6. Esistono varie tecnologie utilizzabili per sviluppare il prodotto, che verranno analizzate successivamente.

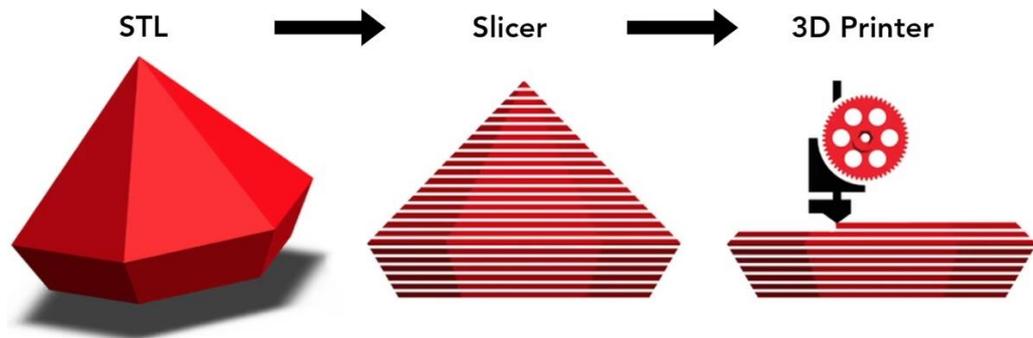


Figura 1.6: Processo di Slicing e Stampa dell'oggetto [12]

- 5. Fase 6:** Nel momento in cui termina la fase precedente, vengono messe in pratica le attività di post-processo come, ad esempio, la pulizia dell'oggetto o la rimozione delle eventuali strutture di supporto, la cui presenza dipende dalla tecnologia utilizzata. Si ottiene così l'oggetto fisico progettato inizialmente.

1.1.4 Le tecnologie di produzione

Il prodotto può essere realizzato attraverso varie tecnologie, rappresentate in Figura 1.7. La classificazione è basata sullo standard EN ISO/ASTM 52900:2021 [2]. Queste si differenziano in base al tipo di materiale utilizzato, alla grandezza del contenitore della stampante dove verrà stampato il pezzo e in base al processo scelto per la stampa (estrusione, fotopolimerizzazione, sinterizzazione tramite laser o fascio di elettroni) [14]. In questo lavoro di tesi verranno analizzate le principali tecnologie, con una classificazione basata sul tipo di materiale adottato per la stampa.

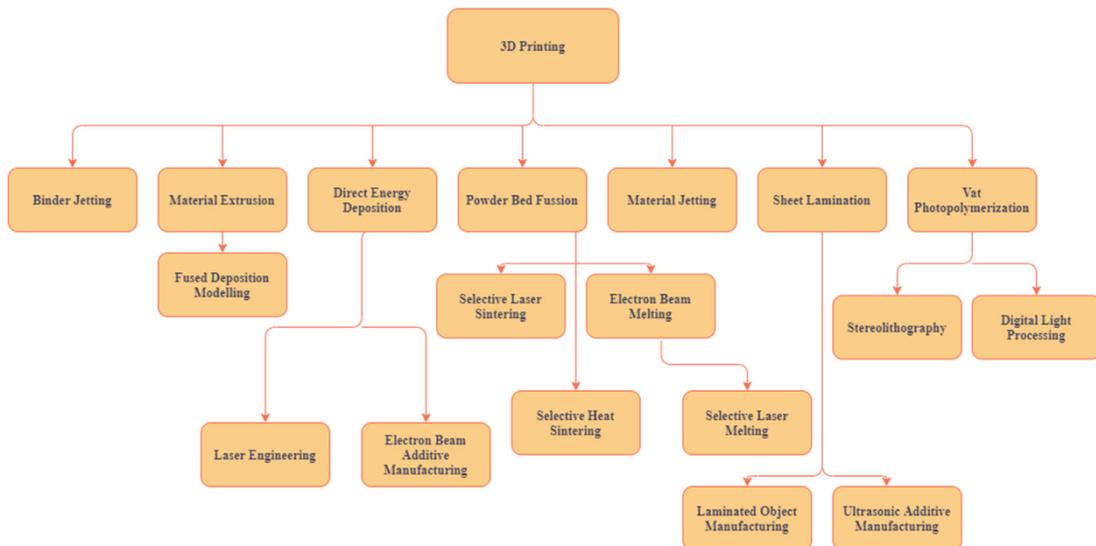


Figura 1.7: Tecnologie per la Fabbricazione Additiva [13]

1.1.4.1 Tecnologie per materiali polimerici

Le principali tecnologie che utilizzano materiali polimerici sono:

- Fused Deposition Modeling (FDM);
- Selective Laser Sintering (SLS);
- Stereolithography (SLA);
- Solid Ground Curing (SGC).

Fused Deposition Modeling

Il processo Material Extrusion (MEX) comprende le tecnologie che, per la realizzazione del prodotto, utilizzano un filamento metallico o polimerico. Quest'ultimo è il caso della tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM), definita dallo standard EN ISO/ASTM 52900:2021 [2] nel seguente modo: FDM = MEX-TRB/P. TRB significa "Thermal Reaction Bonding" [2] e P significa "Polymers" [2].

La tecnologia Fused Deposition Modeling è stata inventata da S. Scott Crump negli anni '80 e messa in commercio negli anni '90 [50].

Il sistema fa uscire il filamento termoplastico avvolto in una bobina tramite una testina riscaldata. Il filamento viene quindi riscaldato e depositato sulla piattaforma affinché possano essere composti i vari strati necessari. Poiché la piattaforma ha una temperatura inferiore rispetto al filamento riscaldato, questo si solidifica rapidamente [11]. La testina trasla sul piano XY per comporre il singolo strato. Quando questo è realizzato totalmente, avviene una traslazione verticale lungo l'asse Z che permette la generazione dello strato successivo.

Il processo si ripete finché non si ottiene il prodotto finale.

Questa tecnologia, rappresentata in Figura 1.8, richiede la presenza delle strutture di supporto che dovranno essere rimosse quando il processo sarà completato.

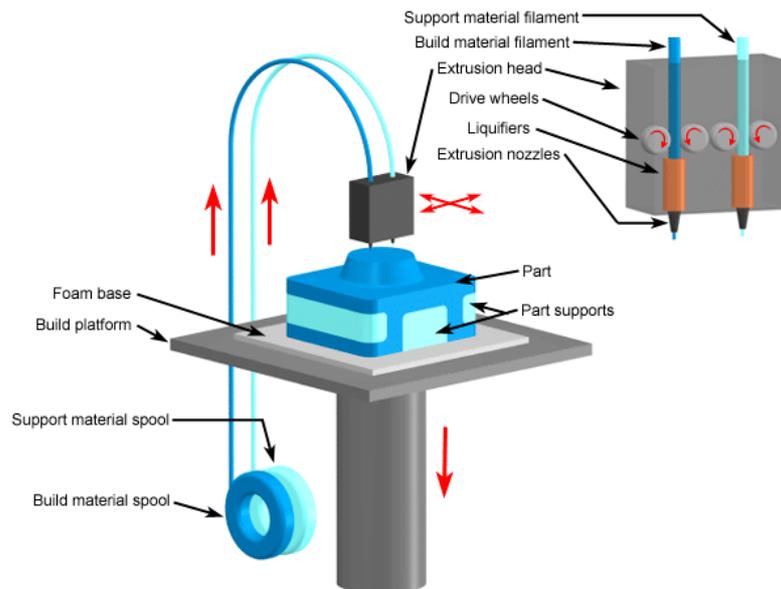


Figura 1.8: Tecnologia FDM [15]

Selective Laser Sintering

La tecnologia Selective Laser Sintering è stata inventata nell'Università del Texas (Austin) nel 1986 [11]. Inizialmente viene depositato uno strato di polvere, reso uniforme grazie all'utilizzo di un rullo, sulla superficie su cui sarà costruito il pezzo. Successivamente la polvere viene riscaldata finché la temperatura non raggiunge un valore di poco inferiore al punto di fusione [11]. La polvere viene successivamente fusa, grazie all'utilizzo di un laser, e le particelle della polvere si fondono creando così un componente solido. Questo processo viene ripetuto per ogni strato che deve essere realizzato. La polvere che non viene fusa svolge la funzione

di supporto per la parte soggetta al processo di stampa, senza danneggiare la superficie con cui è a contatto. Questo implica che non è presente una struttura di supporto. L'assenza di quest'ultima determina due vantaggi significativi: una fase di post-processo non complessa ma, soprattutto, la possibilità di far sovrapporre gli elementi da stampare uno sopra l'altro e quindi di poter stampare più oggetti nello stesso box di stampa.

La tecnologia SLS (Figura 1.9) è, per i motivi elencati, una delle tecnologie più adottate nell'ambito dell'Additive Manufacturing.

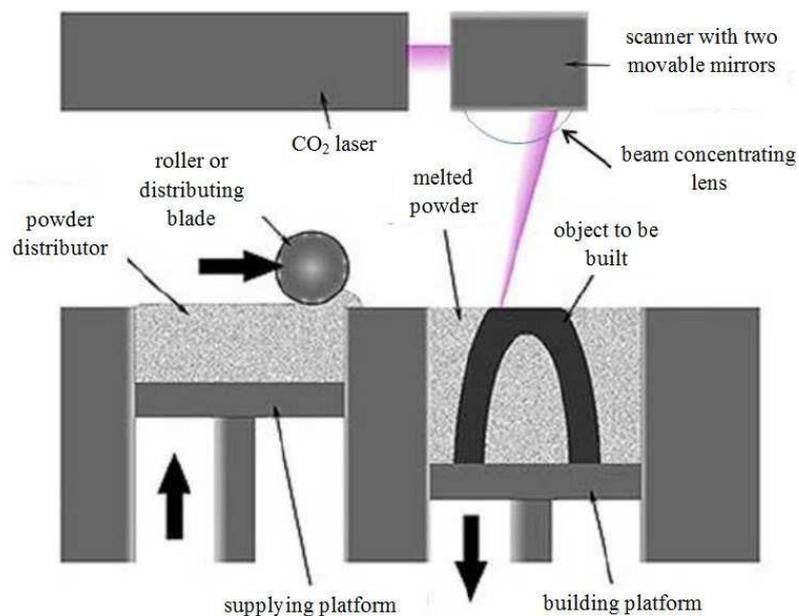


Figura 1.9: Tecnologia SLS [16]

Stereolithography

La Stereolitografia (SLA) si basa sulla fotopolimerizzazione: la realizzazione del prodotto avviene grazie ad un laser che solidifica una resina liquida (una resina fotosensibile) contenuta in una vasca. La resina viene solidificata solo nei punti previsti per la generazione del singolo strato considerato. Quando il processo relativo allo strato in lavorazione è terminato, la piattaforma di stampa si abbassa affinché possa essere generato lo strato successivo. Il processo si ripete finché l'oggetto solido non è stato completato. Questa tecnologia è mostrata in Figura 1.10.

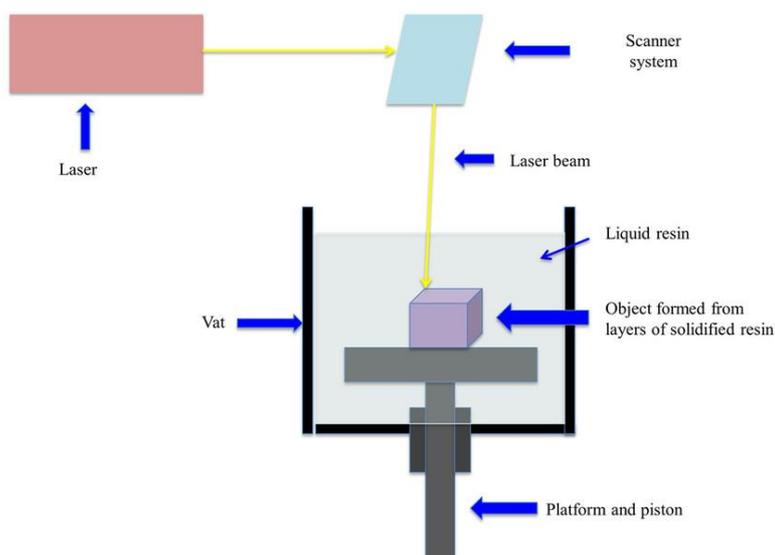


Figura 1.10: Tecnologia SLA [17]

La tecnologia SLA permette di ottenere prodotti di ottima qualità superficiale e precisione dimensionale, può infatti realizzare i particolari di un oggetto con spessori molto piccoli [18]. I macchinari e le materie

prime sono molto costosi e per questo motivo, spesso, viene preferita la tecnologia SLS.

Solid Ground Curing

La tecnologia Solid Ground Curing è stata inventata dalla Cubital Inc. di Israele nel 1986.

Il processo, illustrato in Figura 1.11, inizia con il posizionamento di una resina (fotopolimero liquido) sulla superficie di lavoro. Viene poi creata una maschera con il negativo della sezione trasversale del pezzo su una lastra di vetro [19]. Quest'ultima viene posizionata tra la lampada UV e l'area di lavoro affinché la lampada UV possa solidificare lo strato di resina interessato. Il processo si ripete finché tutti gli strati non sono stati solidificati.

Questa tecnologia non richiede la presenza delle strutture di supporto. Infatti, nei vuoti dello strato solidificato, viene inserita cera calda (liquida) che verrà poi raffreddata diventando cera solida per svolgere, appunto, la funzione di supporto per il pezzo [19].

Essendo una tecnologia particolarmente costosa, è poco adottata e ormai quasi trascurata del tutto.

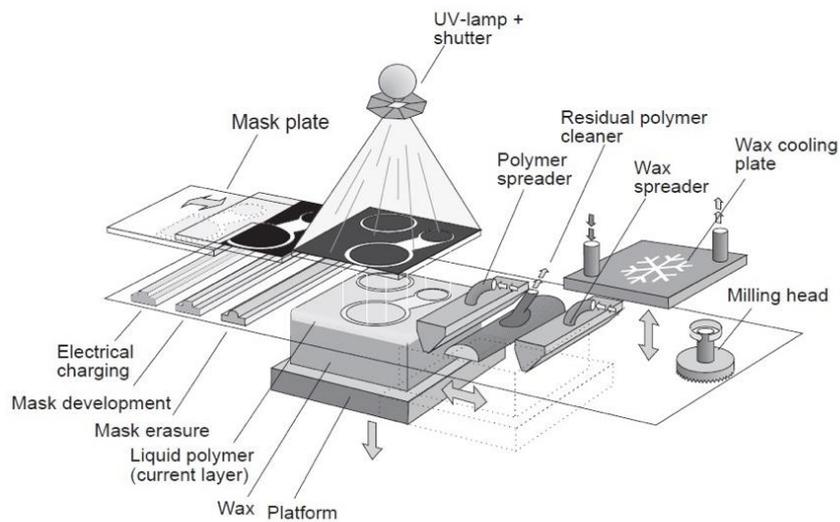


Figura 1.11: Tecnologia SGC [51]

1.1.4.2 Tecnologie per materiali metallici

Le principali tecnologie che utilizzano materiali metallici sono:

- Electron Beam Melting (EBM);
- Powder Bed Fusion – Laser Based System.

Electron Beam Melting

La tecnologia Electron Beam Melting (Figura 1.12) permette la fusione della polvere metallica attraverso un fascio di elettroni, realizzando oggetti con un'ottima percentuale di densità [20]. Inizialmente la polvere viene depositata sulla superficie di lavoro e resa uniforme. Successivamente viene preriscaldata per facilitare la fusione. Il processo si ripete per ogni strato che deve essere solidificato.

Poiché la fusione avviene a temperature molto elevate, il prodotto finito non è soggetto a tensioni residue e presenta ottime proprietà meccaniche e di resistenza al calore [21]. Per questo motivo, le parti realizzate tramite questa tecnologia, vengono utilizzate nel settore Aerospaziale [13].

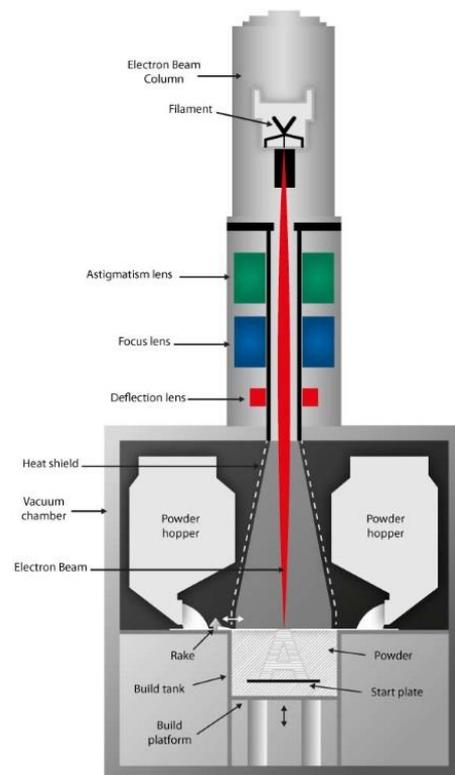


Figura 1.12: Tecnologia EBM [22]

Powder Bed Fusion – Laser Based System

Il processo che permette la realizzazione dei prodotti tramite la fusione di polvere metallica attraverso un laser è chiamato, secondo la normativa [2], PBF-LB/M. Questo processo permette di fondere un letto di polvere (Powder Bed Fusion; PBF) metallica (Metallic; /M) utilizzando un raggio laser (Laser Beam; LB).

In questo processo, una polvere metallica viene depositata sull'area di lavoro e resa uniforme tramite l'utilizzo di un rullo. Successivamente viene fusa tramite un laser, che fonde solo le particelle interessate relativamente al singolo strato soggetto alla lavorazione. Una volta che uno strato è solidificato per intero, la piattaforma si abbassa di una quantità pari allo spessore di un singolo strato [23]. Così, vengono fuse le particelle dello strato successivo. Il processo si ripete finché il prodotto non è stato realizzato per intero. La polvere che non viene solidificata viene rimossa nel momento in cui il procedimento è concluso, nella fase di post-processo.

Questo processo permette la produzione di pezzi 3D con geometrie molto complesse e, allo stesso tempo, resistenti, duraturi e leggeri [23]. Questo spiega il grande utilizzo di questa tecnologia nel settore Aerospaziale.

In Figura 1.13 è rappresentato il processo PBF-LB/M.

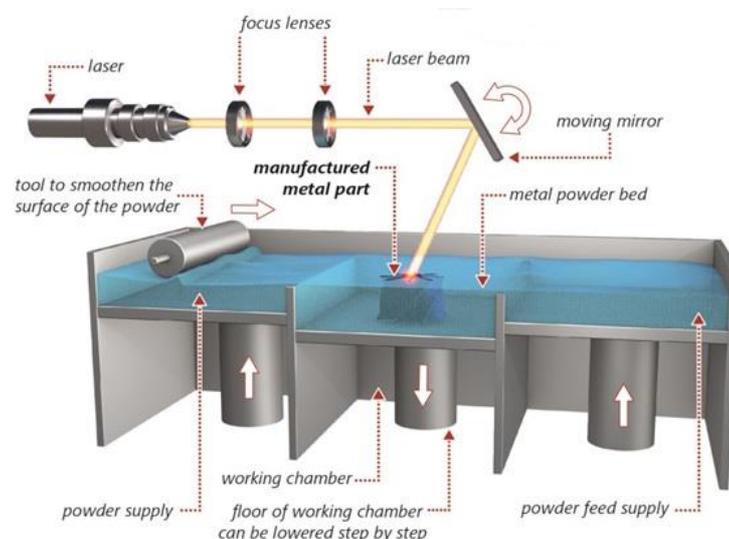


Figura 1.13: Processo PBF-LB/M [24]

1.2 Il problema del Nesting

Il termine Nesting proviene dal verbo inglese “to Nest”, che significa “annidare” [54] e viene utilizzato nell’Additive Manufacturing per indicare il processo relativo al posizionamento e all’orientamento delle parti sulla superficie di lavoro per ottimizzare il processo di produzione, con l’obiettivo di ridurre i tempi e i costi. Il processo di Nesting si colloca al livello delle Operations. Nella letteratura il problema del Nesting è spesso correlato al problema dello Scheduling (Nesting and Scheduling for Additive Manufacturing, NSfAM), poiché i metodi utilizzati per risolvere il problema del Nesting spesso considerano il problema dello Scheduling [28], relativamente al problema della produzione a breve termine. Nesting e Scheduling però possono anche essere considerati singolarmente: Nesting for Additive Manufacturing (NfAM) e Scheduling for Additive Manufacturing (SfAM) [28]. In questo lavoro di tesi si è posta l’attenzione sul solo problema del Nesting (NfAM). Durante la fase di Nesting si cerca di ottenere il miglior posizionamento e orientamento possibile per le parti da produrre. Queste possono essere trattate, durante il processo di stampa, come parti bidimensionali o tridimensionali, in base al metodo di rappresentazione scelto per le stesse. Nel primo caso si parla di Nesting 2D, in cui le parti, caratterizzate da lunghezza e larghezza, sono posizionate e orientate su un piano bidimensionale (XY). Nel secondo caso le parti sono caratterizzate da lunghezza, larghezza e altezza. Le parti tridimensionali vengono posizionate su un piano composto da tre assi (XYZ), a differenza del caso precedente. Questo tipo di Nesting viene chiamato Nesting 3D. Non esiste quindi una sola tipologia di Nesting e, per ognuna, sono state

sviluppate negli anni possibili soluzioni, che verranno esaminate successivamente.

1.2.1 Descrizione del Nesting

Il problema del Nesting è fondamentale per quanto concerne l'Additive Manufacturing.

Il Nesting riguarda il problema di ottimizzazione del posizionamento e dell'orientamento delle parti all'interno del volume di stampa, affinché si possa massimizzare il numero delle parti stampate contemporaneamente e minimizzare i tempi e i costi di produzione [25]. In Figura 1.16 è rappresentato graficamente il Nesting di alcune parti. Poiché il costo di una singola operazione di stampa non dipende dal numero di parti stampate ma dal volume del contenitore di stampa, bisogna massimizzare la quantità delle parti prodotte per ridurre i costi.

1. L'obiettivo è quindi quello di occupare il più possibile il volume a disposizione per la stampa, evitando di lasciare liberi spazi della superficie di lavoro utilizzabili per il posizionamento di ulteriori pezzi [52]. Questo processo di ottimizzazione comporta numerosi vantaggi, nello specifico [3]:
 - Riduzione dei tempi di produzione: producendo più parti contemporaneamente si riduce il tempo di produzione complessivo e il tempo di setup della macchina. Inoltre, minimizzando l'altezza totale di costruzione all'interno dell'area di lavoro, diminuisce il tempo per produrre le varie parti. Di conseguenza, migliora la produttività.

- Riduzione dei costi: si evitano gli sprechi di materiale e quindi si riducono i costi della materia prima. Anche in questo caso, la produzione di più componenti nello stesso volume di stampa riduce il costo del singolo processo di stampa.
- Miglioramento della qualità del prodotto finito: poiché la posizione e l'orientamento dei singoli pezzi è ottimizzato, si può monitorare l'interazione tra le varie parti e quindi evitare che la qualità del prodotto possa non rispettare le specifiche richieste.
- Efficientamento dello spazio: riducendo al minimo gli spazi vuoti all'interno del contenitore di stampa, viene ottimizzato l'utilizzo dell'area di lavoro disponibile.

Per risolvere il problema del Nesting vengono utilizzati software specifici sempre più efficienti, grazie al miglioramento continuo degli algoritmi di ottimizzazione, per ottenere una migliore disposizione delle parti soggette al processo di Fabbricazione Additiva.

I benefici che comporta la scelta di realizzare la produzione tramite l'Additive Manufacturing possono quindi essere sfruttati a pieno solo nel caso in cui si riesca ad ottenere una soluzione efficiente di Nesting.

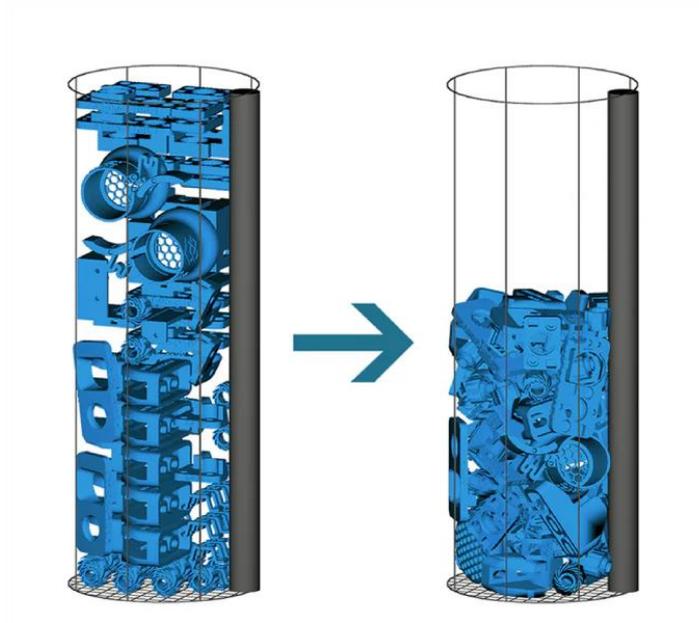


Figura 1.16: Nesting [26]

1.2.2 Metodi di produzione

Il Nesting, come detto precedentemente, ricopre un ruolo fondamentale nell'ambito dell'Additive Manufacturing, permettendo di posizionare e orientare i componenti da realizzare in modo efficiente, con una conseguente diminuzione degli scarti del materiale e dei tempi e costi di produzione. Tutto ciò è possibile se si sceglie la giusta strategia di produzione, in base alle caratteristiche del prodotto e ai requisiti di progetto [27].

Un aspetto di fondamentale importanza per il Nesting è la strategia di posizionamento dei pezzi sulla superficie di lavoro. I principali metodi di posizionamento sono due: *Serial Nesting* e *Parallel Nesting*.

- *Serial Nesting*: Questa strategia prevede il posizionamento delle rappresentazioni delle parti una dopo l'altra sulla superficie di

lavoro e non ne permette la collisione e/o la sovrapposizione [27]. La produzione dei pezzi inizia nel momento in cui termina il posizionamento di tutte le parti coinvolte.

- *Parallel Nesting*: Le parti vengono posizionate contemporaneamente sulla superficie di lavoro e traslate simultaneamente finchè non sono posizionate e orientate nel modo desiderato [27]. Una volta terminata questa fase, le parti vengono prodotte nello stesso momento. Questa strategia permette la sovrapposizione degli elementi e l'inserimento di un pezzo all'interno della parte vuota di un altro pezzo [27], se le dimensioni del primo sono minori delle dimensioni della parte cava del secondo.

In Figura 1.17 sono rappresentati entrambi i metodi: in Figura 1.17a è illustrato il Serial Nesting, in Figura 1.17b è mostrato il Parallel Nesting.

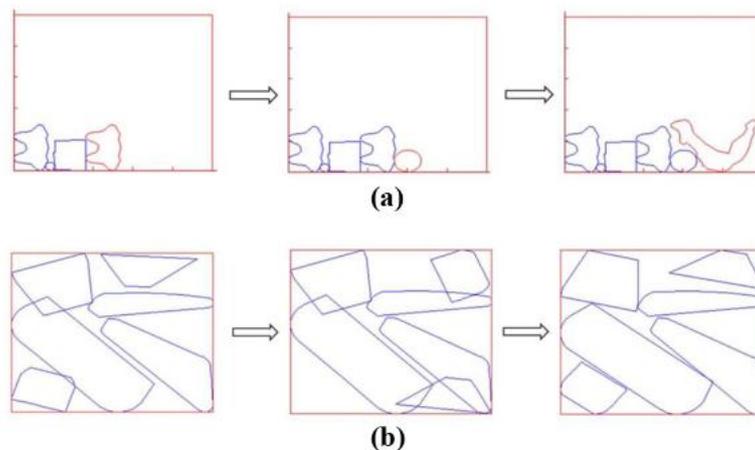


Figura 1.17: Serial Nesting (a) e Parallel Nesting (b) [41]

Un altro aspetto da considerare per il collocamento degli oggetti da produrre sulla piattaforma di lavoro riguarda il numero di componenti che si possono disporre per ottimizzare lo spazio disponibile. In particolare, si parla di *Subset Placement* e *Full Placement*.

- *Subset Placement*: Si parla di Subset Placement quando una quantità elevata di pezzi deve essere prodotta ma soltanto un sottoinsieme può essere collocato all'interno del volume di stampa [27].
- *Full Placement*: Tutti i componenti che devono essere realizzati possono essere posizionati sulla superficie di lavoro [27] ed essere stampati contemporaneamente.

1.2.3 Metodi di rappresentazione dei pezzi

La rappresentazione geometrica dei pezzi sul piano di lavoro rappresenta un ostacolo primario per coloro che vogliono ottimizzare il processo di stampa. Se la rappresentazione geometrica sulla superficie viene ottimizzata è possibile verificare se due o più parti sono in contatto tra loro, se sono sovrapposte oppure se vengono realizzate indipendentemente [29]. Questo problema ha un'influenza sia sull'ottimizzazione dell'utilizzo dello spazio di lavoro che sulla riduzione dei tempi e dei costi di produzione. Inoltre, scegliendo un metodo di rappresentazione adeguato, è possibile migliorare la qualità dei prodotti realizzati e ridurre il tempo

computazionale degli algoritmi (ottimizzando il prima possibile la posizione del pezzo, si riducono le iterazioni necessarie).

I metodi di rappresentazione analizzati sono i seguenti:

- No Fit Polygon (NFP);
- Voxel Model;
- Bounding Box;
- Projection Profile;
- Depth Map.

1.2.3.1 No Fit Polygon

Questo metodo di rappresentazione è quello utilizzato maggiormente poiché permette di determinare un'area in cui non può esserci intersezione tra due parti, chiamata "Free Collision Region".

Mahadevan nel 1984 [30] ha proposto un metodo per calcolare il No Fit Polygon basato sulla traslazione di un poligono su un altro. Il metodo è il seguente: si consideri uno spazio bidimensionale sul quale è posizionato un poligono fisso A, rappresentante la proiezione sul piano dell'oggetto A che dovrà essere realizzato. Sullo stesso piano è posizionato anche un poligono B, la cui forma si basa sull'oggetto rappresentato B. Il poligono B, a differenza del poligono A, può traslare ma, per entrambi, l'orientamento è fisso. Dopo aver scelto un punto di riferimento del poligono B, questo viene portato a contatto con il poligono A. Mettendo in atto un processo di traslazione di B, basandosi sul punto di contatto stabilito, lungo il perimetro esterno del poligono A, si ottiene il No Fit Polygon (NFP) indicato NFP_{AB} . Il processo descritto è rappresentato in Figura 1.17.

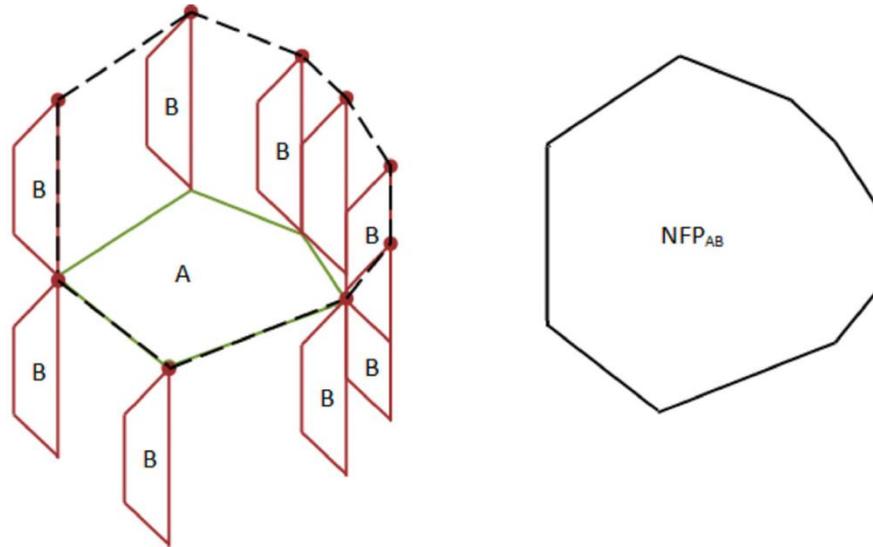


Figura 1.18: Processo per ottenere il NFP [31]

NFP_{AB} rappresenta quindi l'area in cui il poligono A e il poligono B possono venire a contatto, evitando però che avvenga una sovrapposizione tra le due parti.

Il grande svantaggio di questo metodo consiste nel non poter generare un intero NFP per le forme che comprendono zone cave [32].

Un altro metodo per ottenere il No Fit Polygon è rappresentato dalla teoria di Hermann Minkowski, la *Minkowski Sum* [29]. Questa è un'operazione geometrica che considera due poligoni, A e B, caratterizzati inizialmente dallo stesso orientamento. La somma di Minkowski si basa sulla somma vettoriale di tutti i punti di A con tutti i punti di B (un esempio è rappresentato in Figura 1.18) ed è definita nel modo seguente [29]:

$$S = A \oplus B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\} \quad (1)$$

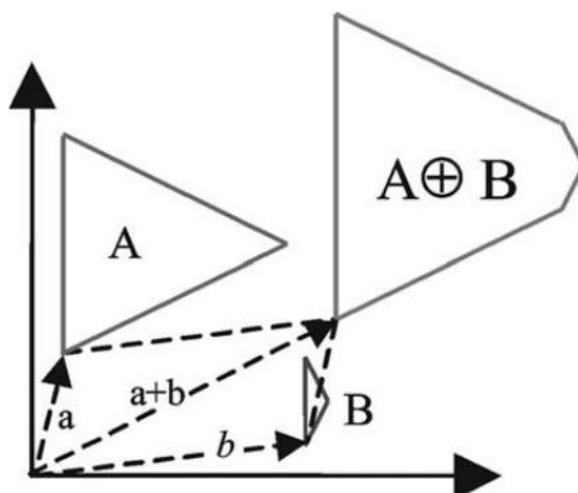


Figura 1.19: Minkowski Sum [33]

Il risultato ottenuto, però, non è ancora un NFP. Quest'ultimo si ottiene modificando l'orientamento del poligono B in modo tale che questo sia opposto all'orientamento del poligono A ed effettuando un'operazione di sottrazione vettoriale, punto per punto:

$$A \oplus -B \quad (2)$$

L'operazione di sottrazione descritta per ottenere il No Fit Polygon è rappresentata in Figura 1.19.

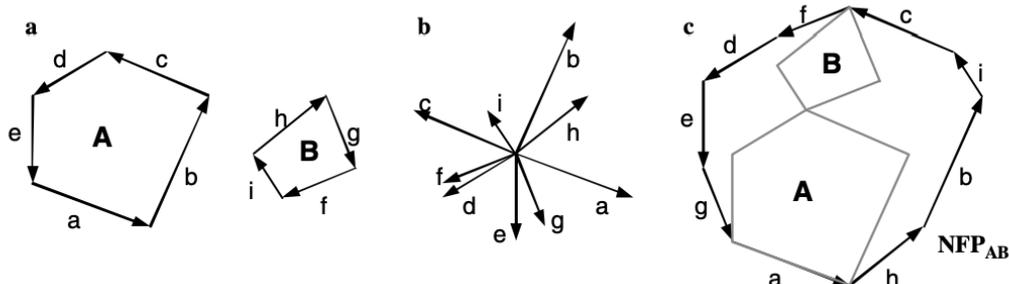


Figura 1.20: NFP ottenuto tramite la Minkowski Sum [32]

1.2.3.2 Voxel Model

Un ulteriore modo per rappresentare i pezzi da stampare è il Voxel Model. Un Voxel è un pixel tridimensionale. Un Voxel Model è quindi un modello che viene utilizzato per rappresentare la geometria di un modello 3D attraverso pixel tridimensionali [53]. Un esempio è illustrato in Figura 1.20.

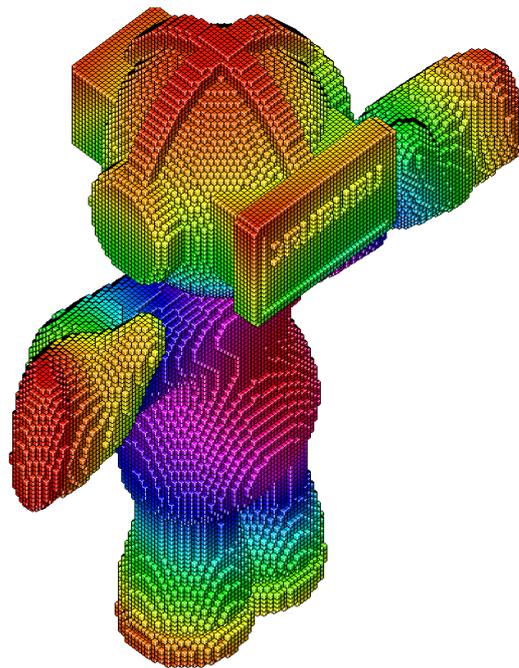


Figura 1.21: Voxel Model [35]

Un vantaggio che comporta la rappresentazione di un pezzo tramite Voxel consiste nell'eliminazione della fase di Slicing per il modello, in quanto un Voxel è rappresentato da una struttura rettilinea che si adatta alla struttura a strati richiesta dall'utente [34]. Questo metodo di rappresentazione è adatto per la realizzazione di prodotti con geometrie complesse e irregolari. La qualità delle parti dipende dalla risoluzione dei Voxel che, a sua volta, dipende dalla loro dimensione. Infatti, la qualità del singolo Voxel aumenta

al diminuire delle dimensioni dello stesso. D'altro canto, questa modellazione richiede un calcolo computazionale maggiore rispetto agli altri metodi, poiché devono essere elaborati dati volumetrici. Inoltre, richiede una quantità di memoria elevata nel caso di Voxel ad alta risoluzione [34].

1.2.3.3 Bounding Box

Il Bounding Box rappresenta il minimo perimetro (orientato) che contiene la parte da realizzare. Questa metodologia di rappresentazione dei pezzi viene utilizzata sia per il Nesting 2D che per il Nesting 3D: nel primo caso, il Bounding Box è tipicamente un rettangolo, a differenza del caso del Nesting 3D in cui è un cubo. Il Bounding Box permette di definire le dimensioni massime che il pezzo contenuto al suo interno occupa sulla superficie di lavoro, in termini di altezza, lunghezza e larghezza. In Figura 1.21 è rappresentata una parte in 3D, soggetta al processo di stampa, contenuta in un Bounding Box.

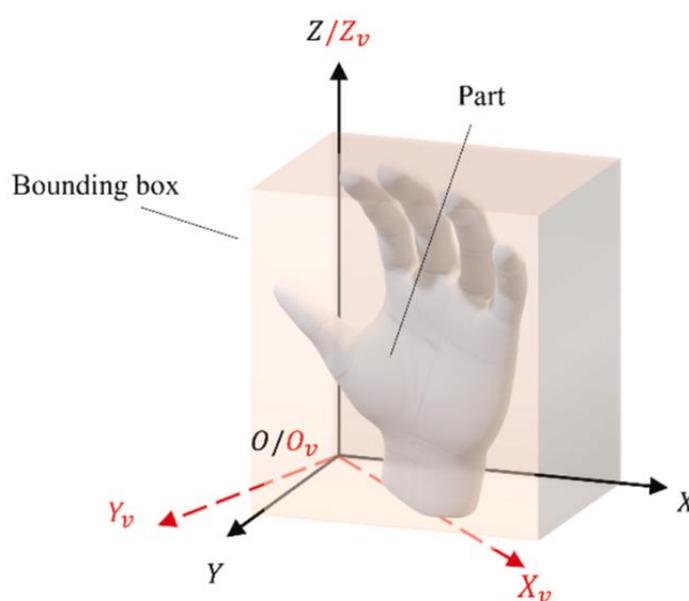


Figura 1.22: Bounding Box [36]

Il Bounding Box permette di ottimizzare l'uso dello spazio di lavoro, riducendo al minimo gli spazi vuoti. Attualmente sono presenti sul mercato vari software che applicano questa metodologia in automatico.

1.2.3.4 Projection Profile

Uno dei principali metodi utilizzati per rappresentare le singole parti sulla superficie di lavoro, per quanto concerne l'ottimizzazione del problema del Nesting 2D, è quello di proiettare l'area del pezzo da realizzare sulla superficie stessa. Ripetendo questo processo per tutte le parti da realizzare, è possibile calcolare l'area media della sezione trasversale totale da stampare e, nel caso la tecnologia scelta per il processo la richiedesse, la quantità di supporto necessaria [27]. La quantità totale di area proiettata influenza vari fattori, in particolare, al diminuire della stessa:

- Diminuisce il tempo di stampa richiesto per ogni strato;
- Diminuisce la quantità di supporto necessaria e quindi il tempo richiesto per rimuoverlo nel momento in cui è finito il processo;
- Aumenta la possibilità di stampare più parti contemporaneamente.

In Figura 1.22 sono rappresentati tre layout differenti per le stesse parti soggette al processo di stampa, sviluppati da Yang et al [37]. Nella parte inferiore sono rappresentate le proiezioni dei singoli pezzi sull'area di lavoro. Si nota come, a causa della disposizione non efficiente dei pezzi, nell'esempio centrale non tutte le parti sono state realizzate.

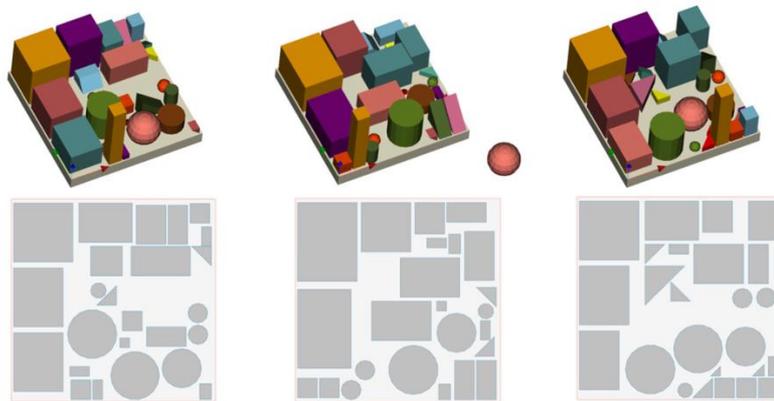


Figura 1.23: Projection Profile [37]

1.2.3.5 Depth Map

La Depth Map (Mappa di profondità) si basa sulle informazioni relative alla profondità dell'oggetto da realizzare per ogni punto della superficie, ottenute tramite una scansione 3D. Come illustrato in Figura 1.23, la Depth Map è un'immagine bidimensionale, che raffigura la superficie della parte da produrre, rappresentata su una griglia a sua volta posizionata sulla superficie di lavoro [38]. Ogni punto dell'immagine bidimensionale è caratterizzato da una distanza dalla base della griglia. Questa distanza rappresenta la profondità della superficie dell'oggetto. Questo metodo permette quindi di calcolare, strato per strato, la profondità dell'oggetto da realizzare.

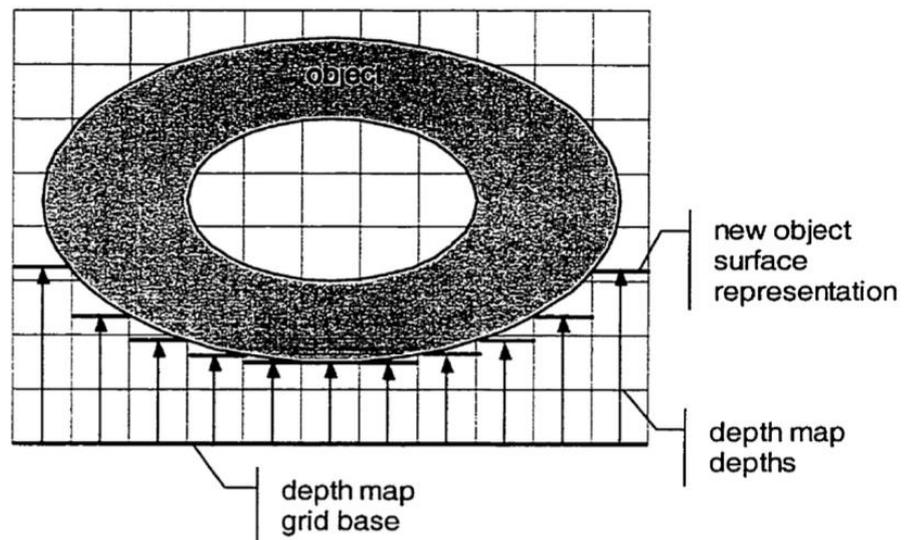


Figura 1.24: Depth Map [39]

1.3 Criteri di classificazione della letteratura

Nel Capitolo 2 e nel Capitolo 3 sarà effettuata, rispettivamente, un'analisi della letteratura su problemi di Nesting 2D e Nesting 3D, per l'Additive Manufacturing. Per comprendere in modo chiaro la metodologia applicata per svolgere l'analisi in oggetto, in questo paragrafo sono descritti i criteri su cui si basa il lavoro svolto.

Inizialmente è stata effettuata un'attenta analisi della letteratura per selezionare i principali articoli relativi al Nesting 2D e al Nesting 3D. Successivamente, per ogni articolo, sono state individuate le seguenti caratteristiche: Metodo di posizionamento delle parti, Algoritmo utilizzato, Presenza o meno del vincolo di rotazione delle parti, Orientamento di costruzione, Metodo di rappresentazione delle parti, Tipo di produzione (Full/Subset Placement), Tecnologia utilizzata, Funzione obiettivo, Assunzioni e Variabili.

Per svolgere l'analisi della letteratura, gli articoli sono stati raggruppati sulla base delle tecnologie adottate e sulle caratteristiche in comune per confrontare i diversi metodi elaborati dai vari ricercatori, in quanto ogni articolo ha come obiettivo la ricerca della miglior soluzione possibile al problema del Nesting. Ogni ricercatore cerca quindi di risolvere il problema attraverso metodi ed assunzioni differenti.

Attraverso la fase di raggruppamento degli articoli, basata sulle caratteristiche in comune e sulle tecnologie utilizzate, è possibile confrontare i risultati ottenuti, valutando eventuali criticità e i relativi vantaggi e svantaggi dovuti alle scelte di produzione effettuate.

CAPITOLO 2 – NESTING 2D

In questo capitolo sono analizzati gli articoli presenti nella letteratura relativa al Nesting 2D. Il Nesting 2D riguarda il problema di ottimizzazione del posizionamento e dell'orientamento di forme bidimensionali, rappresentanti l'oggetto da realizzare, sulla superficie di lavoro. Le forme considerate sono caratterizzate da due dimensioni: lunghezza e larghezza. Di conseguenza, l'altezza viene tipicamente trascurata. Ogni lavoro di ricerca presenta un algoritmo di ottimizzazione che, dopo aver analizzato gli oggetti da realizzare, ricerca un'allocazione efficiente per questi ultimi affinché possano essere ottenuti i benefici in termini di tempi e costi di produzione, riducendo gli sprechi di materiale e massimizzando il tasso di utilizzo della piattaforma. Gli algoritmi più utilizzati sono:

- Genetic Algorithm (GA) [31] [41] [44];
- Simulated Annealing (SA) [19] [46].

Per quanto concerne l'utilizzo della tecnologie per la risoluzione del problema del Nesting 2D, dagli articoli analizzati è evidente che la tecnologia utilizzata maggiormente è la SLA, con una percentuale di adozione pari al 43% rispetto al totale dei lavori di ricerca analizzati, come illustrato in Figura 2.1.

Tecnologie Nesting 2D

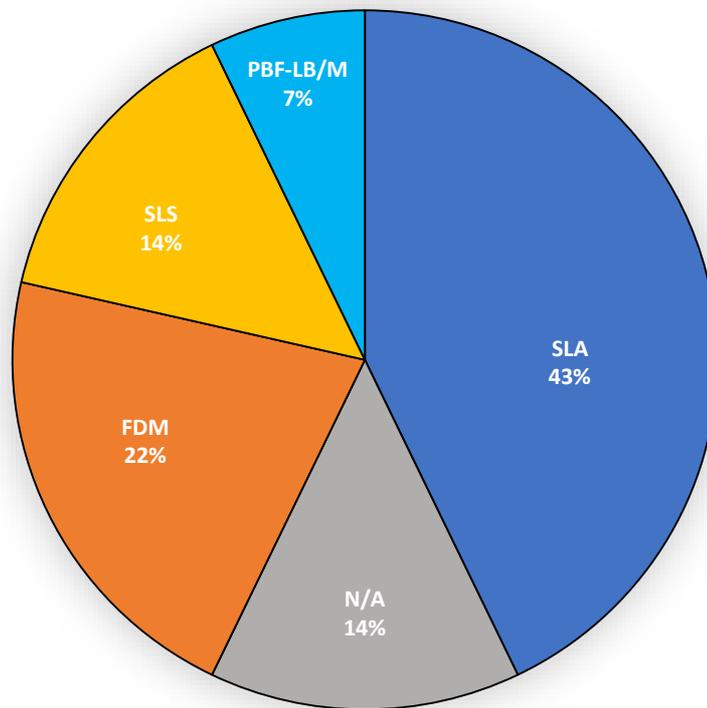


Figura 2.1: Tecnologie Nesting 2D

L'analisi effettuata in questo capitolo si basa su un confronto tra i vari articoli, raggruppati in base alle caratteristiche della modellazione in comune tra le varie metodologie proposte, con una particolare attenzione per la scelta relativa al metodo di rappresentazione delle singole parti. In Figura 2.2 sono illustrati i vari metodi adottati dai ricercatori negli articoli esaminati.

Rappresentazione Parti Nesting 2D

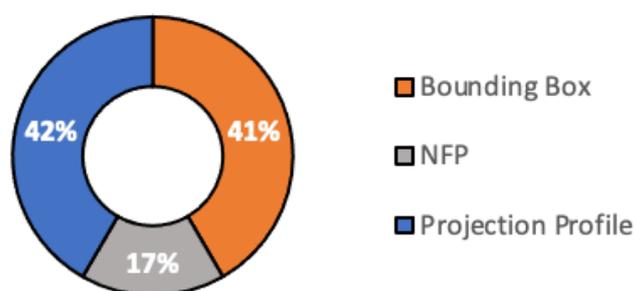


Figura 2.2: Rappresentazione delle parti

L'obiettivo di questo capitolo è quello di comprendere l'importanza delle scelte riguardanti il tipo di produzione e come queste influenzano i risultati finali. Dopo aver raggruppato gli articoli sulla base del metodo di rappresentazione delle parti adottato, si sono valutati i risultati in funzione delle altre caratteristiche di modellazione dei singoli lavori di ricerca: il metodo di posizionamento adottato (Serial/Parallel Nesting) e il metodo di produzione (Subset/Full Placement). Nelle figure rappresentate successivamente sono illustrate le decisioni prese dai ricercatori per quanto riguarda il metodo di posizionamento (Figura 2.3) e il metodo di produzione (Figura 2.4).

Metodo di posizionamento Nesting 2D

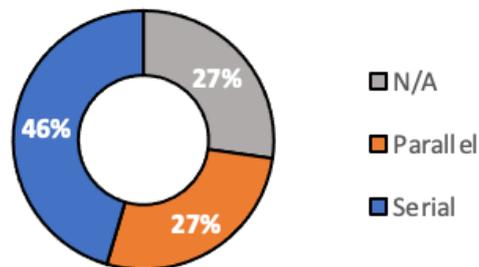


Figura 2.3: Metodo di posizionamento

Produzione Nesting 2D

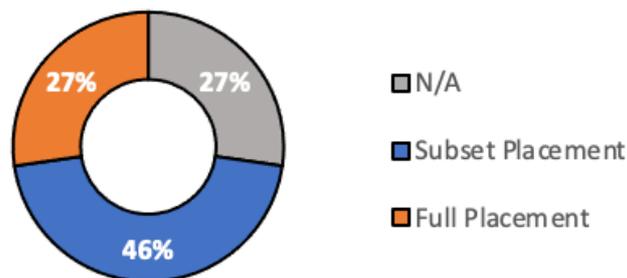


Figura 2.4: Metodo di produzione

Si evince come per il Nesting 2D, a priori, venga mediamente preferito un metodo di posizionamento Serial Nesting, una rappresentazione delle parti tramite Projection Profile o Bounding Box e una produzione Subset Placement. Come detto, queste scelte sono fatte a priori, e non significa che le scelte effettuate per il singolo lavoro di ricerca siano le migliori possibili. Si tratta di assunzioni per sviluppare la propria metodologia. Come si vedrà dal confronto tra i vari articoli raggruppati sulla base delle caratteristiche di produzione adottate, non esiste una combinazione di caratteristiche che permetta di ottenere una soluzione ottimale per il problema analizzato, ma

una combinazione che può favorire la risoluzione del problema e far ottenere risultati migliori.

2.1 Ottimizzazione del posizionamento di più parti rappresentate tramite Projection Profile

In questo paragrafo sono analizzati i lavori di ricerca svolti da Zhang et al (2016) [27] e Zhang et al (2018) [41] per comprendere l'importanza del Parallel Nesting e della rappresentazione delle parti tramite Projection Profile per ottimizzare i tempi e i costi di produzione. In entrambe le ricerche l'obiettivo principale è quello di ottenere un layout che possa garantire sia la qualità del prodotto finito che il miglioramento della compattezza delle parti posizionate sulla superficie di lavoro, ottimizzando così il tasso di utilizzo della macchina. Per le due ricerche sono state utilizzate le tecnologie che necessitano di strutture di supporto per la realizzazione delle singole parti, come SLA e FDM, poiché per queste è permesso il posizionamento dei pezzi su un solo strato (Single Layer). La differenza tra il posizionamento dei pezzi su un solo strato e su più strati è rappresentata in Figura 2.5.

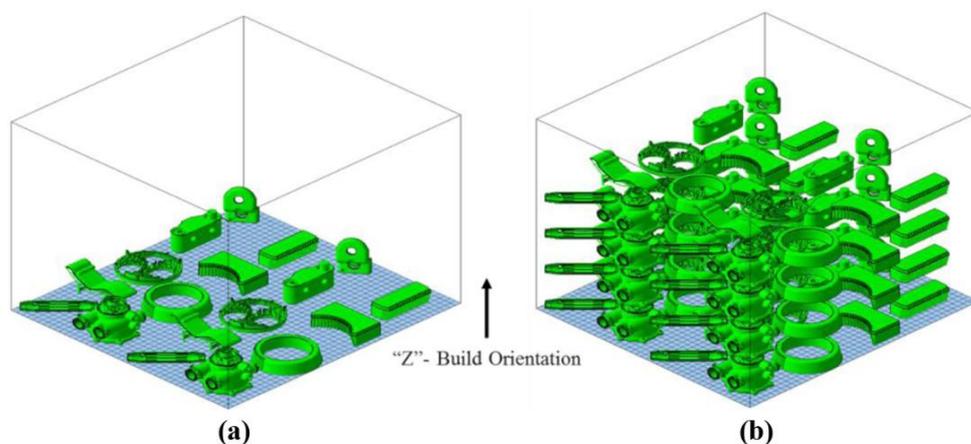


Figura 2.5: a) Single Layer b) Multiple Layers [41]

Questo deriva dal fatto che la presenza delle strutture di supporto, nel caso di pezzi sovrapposti l'uno sull'altro, danneggerebbe la superficie superiore dei pezzi non posizionati sullo strato più alto, in quanto la superficie superiore di una parte sarebbe utilizzata come base di sostegno per la struttura di supporto dei pezzi posizionati nello strato superiore (Figura 2.6).

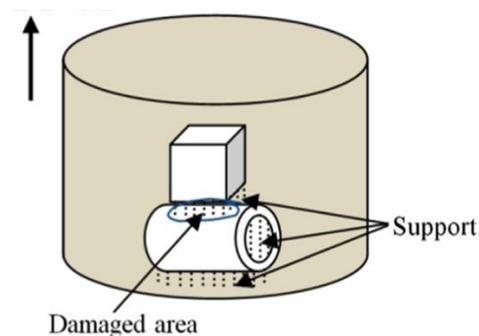


Figura 2.6: Danneggiamento della superficie superiore del pezzo in presenza delle strutture di supporto [27]

Quanto appena detto risulta fondamentale per il raggiungimento dell'obiettivo definito inizialmente: garantire la qualità del prodotto finito. Per quanto concerne le fasi del processo, sono pressoché le medesime, in quanto alcuni ricercatori hanno lavorato su entrambe le ricerche. Inizialmente viene stabilito l'orientamento dei singoli pezzi, ma anche un set di orientamenti alternativi che possano garantire la qualità richiesta. Successivamente, viene generato per ogni parte il corrispondente Projection Profile e proiettato sul piano XY. Infine, viene applicato

l'algorithmo GA per ottenere il miglior layout possibile. Dai due lavori di ricerca è emerso che:

- Il Parallel Nesting, consentendo la sovrapposizione dei pezzi, permette a questi ultimi, rappresentati dai singoli Projection Profile, di scorrere gli uni sugli altri. In questo modo, una parte può posizionarsi nella parte cava interna di un altro pezzo, nel caso in cui le dimensioni lo permettano e non ci sia quindi interferenza. In questo modo, l'area soggetta al processo di lavoro si riduce e, di conseguenza, si riducono i tempi e i costi di produzione. Un esempio rappresentativo è illustrato in Figura 2.7.

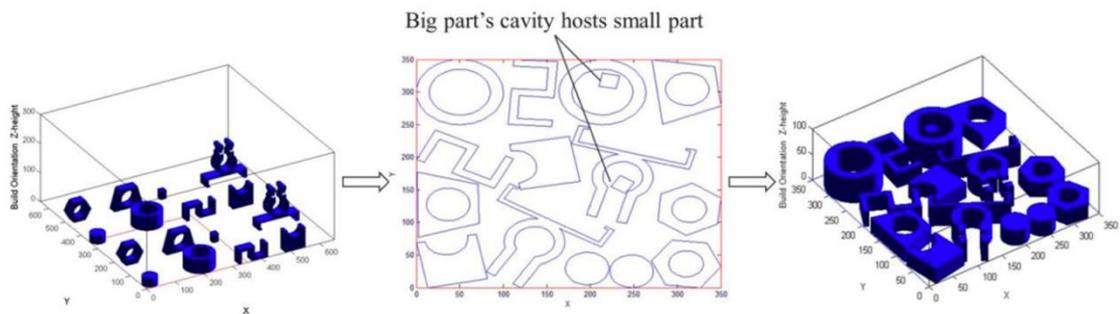


Figura 2.7: Riduzione dell'area di lavoro grazie al Parallel Nesting e ai Projection Profiles [41]

- Nonostante le ricerche abbiano avuto un esito positivo in termini di compattezza viene esplicitato come in futuro, grazie al miglioramento continuo degli algoritmi di ottimizzazione e, in generale, dei metodi di Nesting, si potranno ottenere tassi di utilizzo delle macchine sempre più elevati.

Non si giunge quindi ad una soluzione ottimale definitiva: il problema non viene risolto in modo esatto.

2.1.1 Ottimizzazione del processo per la tecnologia SLA

Ulteriori lavori di ricerca per l'ottimizzazione del processo per la Stereolitografia, oltre a quelli citati precedentemente di Zhang et al (2016) [27] e Zhang et al (2018) [41], sono stati svolti da Wodziak et al (1994) [42], Canellidis et al (2006) [40], Canellidis et al (2013) [31],

Il lavoro meno recente, di Wodziak et al (1994) [42], propone un metodo basato sull'algoritmo GA per ottimizzare il processo di posizionamento di più parti sulla superficie di lavoro. È interessante esaminare questa ricerca in quanto, essendo realizzata nel 1994, presenta alcuni limiti, tra cui il numero massimo di parti realizzabili attraverso la tecnologia scelta, la SLA, pari a 11. Per cui, anche il numero massimo di parti stampabili è limitato dalla tecnologia. Inoltre, viene esplicitato come l'obiettivo fosse quello di minimizzare il tempo totale di produzione, senza fare riferimenti alla qualità del prodotto e alla precisione dimensionale. Nonostante i risultati ottenuti fossero positivi, in quanto sono riusciti ad ottenere un tasso di utilizzo della superficie di lavoro pari al 98%, viene messo in evidenza il vincolo dovuto alla SLA relativamente al numero di parti e come questo abbia un'influenza negativa sull'algoritmo, sviluppato per poter controllare un numero infinito di parti.

In entrambi i lavori di ricerca svolti da Canellidis et al (2006) [40] e Canellidis et al (2013) [31], l'obiettivo è quello di ottenere il miglior posizionamento possibile di più parti sulla superficie di lavoro attraverso l'utilizzo di un algoritmo GA, assumendo una produzione di tipo Subset Placement con un

orientamento di costruzione fisso. Inoltre, tutti e due i lavori di ricerca analizzati sono caratterizzati da due fasi sequenziali per ottimizzare il layout di stampa: nella prima fase viene ottimizzato l'orientamento dei singoli pezzi sulla base dei requisiti di qualità imposti, nella seconda si ottimizza il posizionamento delle parti per massimizzare il tasso di utilizzo della macchina. Le differenze tra i due lavori risiedono nel metodo di produzione scelto e nel metodo di rappresentazione delle parti: Canellidis et al (2006) [40] adottano un posizionamento di tipo Parallel Nesting, rappresentando i pezzi tramite Bounding Box, mentre Canellidis et al (2013) [31] ricorrono ad un metodo di posizionamento Serial Nesting e una rappresentazione delle parti tramite Projection Profile. Questa differenza è fondamentale per effettuare un confronto tra le conclusioni ottenute dalle due ricerche. Il parametro di riferimento per comparare i due lavori è il tasso di utilizzo della piattaforma. Nello specifico, possono essere fatte due considerazioni:

- Lo spazio occupato dalle parti rappresentate tramite Bounding Box è maggiore rispetto a quello che sarebbe occupato nel caso di Projection Profile, rappresentante la forma effettiva della parte da realizzare. Di conseguenza, con il metodo Projection Profile è possibile migliorare l'occupazione dello spazio, posizionando più parti sulla piattaforma. Un esempio è rappresentato in Figura 2.8. In questa illustrazione il pezzo da realizzare è rappresentato in nero (Projection Profile) mentre in verde è evidenziato il relativo Bounding Box.

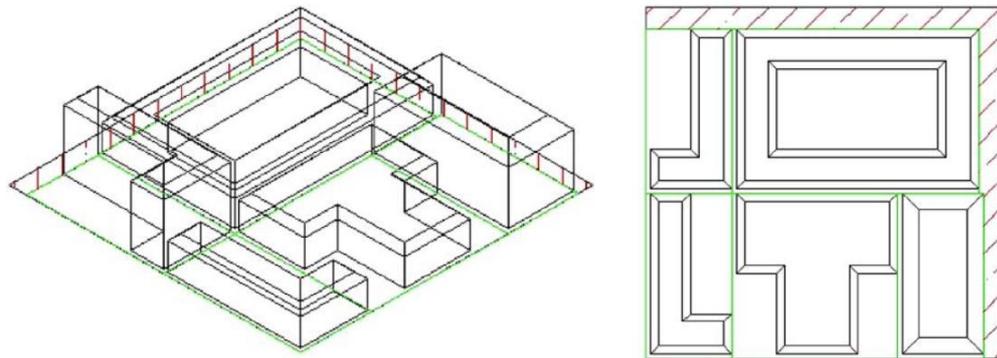


Figura 2.8: Occupazione dello spazio – Differenza tra BB e PP [40]

- Il lavoro svolto con il metodo di produzione Parallel ha un tasso di occupazione più alto rispetto a quello svolto con il metodo Serial. Quest'ultimo permette però di aggiungere ulteriori pezzi nel caso in cui ci fosse spazio libero sulla piattaforma, senza dover effettuare nuovamente tutto il processo, passaggio necessario nel caso in cui si volesse aggiungere un pezzo con il metodo Parallel, in quanto tutti i pezzi vengono posizionati contemporaneamente sulla piattaforma.

Alla luce di quanto appena detto si evince come, sulla base degli studi analizzati, una buona soluzione al problema del Nesting 2D, quando si utilizza la tecnologia SLA, è quella di posizionare i pezzi da produrre sulla piattaforma con il metodo Serial, rappresentandoli singolarmente attraverso il metodo Projection Profile, come effettuato da Canellidis et al [31]. In questo modo, ottimizzando il posizionamento dei pezzi si può ottenere, in base al singolo caso di studio, un tasso di utilizzo minore rispetto alla produzione con metodi differenti, ma, al contempo, si possono aggiungere ulteriori pezzi da produrre senza dover svolgere nuovamente

l'intero processo, incrementando il tasso di utilizzo della piattaforma senza aumentare in modo rilevante i tempi e i costi di produzione.

2.1.2 Metodi di risoluzione del problema tramite Projection Profile per una produzione Full Placement

Recentemente sono state sviluppate nuove metodologie per risolvere il problema del Nesting 2D rappresentando le parti tramite Projection Profile. Queste sono state elaborate da Griffiths et al (2019) [49] e Yang et al (2022) [37]. Questi metodi sono innovativi e, pertanto, i risultati ottenuti dai singoli lavori di ricerca sono confrontati con quelli ottenuti tramite l'utilizzo di un software commerciale, chiamato Magics, a causa dell'assenza di benchmark.

Il lavoro di ricerca svolto da Griffiths et al [49] considera due problemi da risolvere contemporaneamente. Il primo riguarda la ricerca del miglior orientamento di costruzione possibile delle singole parti mentre il secondo problema riguarda l'allocazione dei pezzi: l'obiettivo è quello di posizionare tutti i pezzi desiderati (Full Placement) all'interno del minor numero di box possibile (si suppone un numero di box disponibili maggiore rispetto al numero delle parti totali). Questa combinazione di problemi non era mai stata considerata precedentemente. La metodologia è stata sviluppata per il processo PBF-LB/M ed è caratterizzata dall'utilizzo dell'algoritmo Tabu Search (TS), che opera in modo iterativo cercando un orientamento di costruzione considerato sufficientemente buono, per evitare che il processo si prolunghi troppo durante la ricerca di una soluzione ancora migliore [49]. Questa scelta è dovuta anche alla funzione obiettivo che deve

essere minimizzata, rappresentata dai costi totali di produzione che, a loro volta, sono funzione tempi di produzione. Per questo motivo hanno imposto un limite di tempo massimo per ogni iterazione dell'algoritmo pari a 5 minuti per trovare il miglior orientamento possibile per ogni parte. Questo vincolo non permette di ottenere l'orientamento migliore possibile per ogni pezzo, come illustrato in Figura 2.9 per uno dei ventisette casi di studio svolti dai ricercatori.

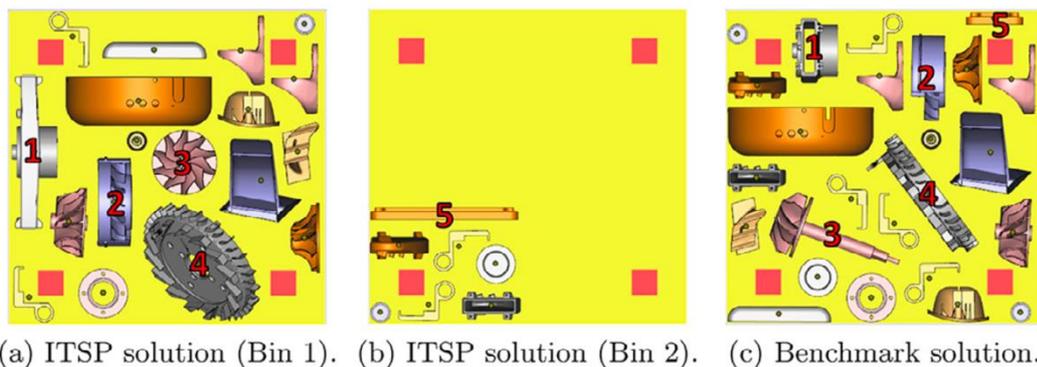


Figura 2.9: Confronto tra caso di studio del lavoro di ricerca e Benchmark
[49]

Nonostante ciò, per ognuno dei 27 casi svolti per testare il metodo, è stato verificato un miglioramento dei costi rispetto al benchmark in un range di valori che va dal 14.6% al 33.2% [49].

Yang et al [37] propongono un metodo basato sulla similarità dei contorni delle parti rappresentate tramite Projection Profile, applicabile sia ad una produzione di tipo Subset Placement che Full Placement, per minimizzare i tempi e i costi di produzione. Il loro obiettivo, per aumentare la

compattezza e quindi ottenere un layout migliore, è quello di posizionare le proiezioni dei profili delle parti con contorni simili vicini, riducendo la quantità di spazio non utilizzata. Inoltre, permettono il posizionamento di una parte all'interno della parte cava di un'altra, nel caso in cui le dimensioni lo permettano. Per comprendere meglio il processo, è illustrato un esempio in Figura 2.10.

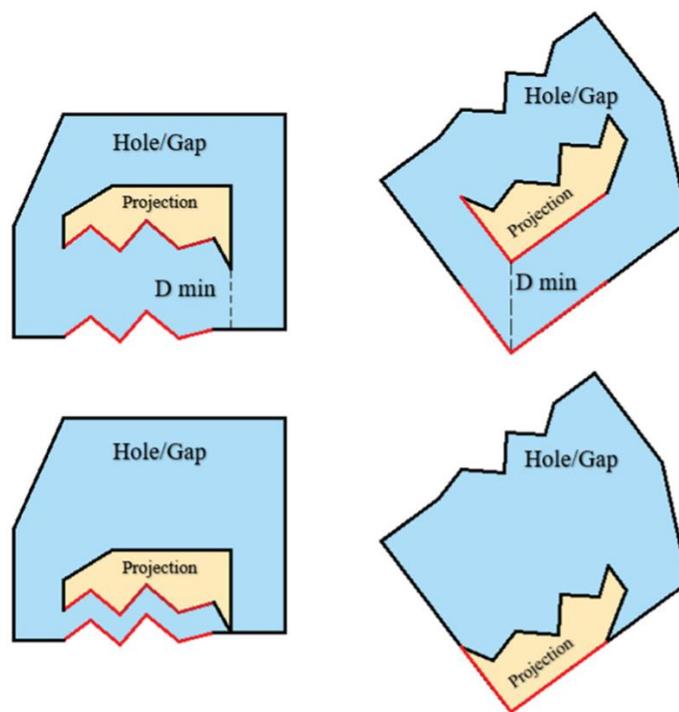


Figura 2.10: Accoppiamento delle parti basato su contorni simili [37]

Il metodo proposto risulta quindi molto conveniente in quanto permette di migliorare il tasso di utilizzo della piattaforma e, soprattutto, di trattare indifferentemente sia parti con forma regolare che parti con forma irregolare. I risultati dei test, effettuati utilizzando parti reali, sono confrontati con i risultati ottenuti utilizzando il software Magics per l'orientamento e il posizionamento delle stesse parti. Il software per posizionare tutte le parti ha avuto bisogno di due piattaforme, a differenza

della metodologia proposta, a cui ne è servita soltanto una. Ha quindi un tasso di utilizzo più alto. Questo algoritmo riesce a sfruttare meglio le parti cave dei pezzi e gli spazi vuoti tra le parti rispetto ai tipici algoritmi utilizzati.

Le ricerche analizzate in questo paragrafo offrono risultati promettenti in ottica futura e possono rappresentare un punto di svolta per la risoluzione del problema del Nesting 2D. Innanzitutto, bisogna sottolineare che entrambi i lavori sono stati svolti con una metodologia Full Placement (per Yang et al [37] vale anche la metodologia Subset Placement) per cercare la soluzione migliore possibile, comprendendo tutti i pezzi. Inoltre, entrambi i metodi rappresentano le parti tramite Projection Profile che, grazie alla sua versatilità e facilità d'uso, lo rende uno dei metodi di rappresentazione più utilizzati e così sarà anche in futuro.

Ricordando che il metodo proposto da Griffiths et al [49] non era ancora stato elaborato da nessuno, effettuando ricerche in futuro si possono migliorare notevolmente le prestazioni. In particolare si può superare il vincolo di tempo imposto da Griffiths et al [49] e quindi migliorare i tempi di produzione totali. Per quanto concerne il lavoro svolto da Yang et al [37], per migliorare le performance, gli studi futuri dovranno focalizzarsi in particolar modo sul posizionamento: a partire da questa ricerca, comprendere come limitare sempre meno il posizionamento delle parti affinché il metodo possa essere sfruttato totalmente. Bisognerà cercare di ottimizzare l'occupazione degli spazi vuoti e l'occupazione delle parti cave dei singoli pezzi per poter migliorare il posizionamento delle parti.

È utile, inoltre, effettuare un confronto con quanto detto nel paragrafo 2.1.1. Nel paragrafo citato è stato affermato che il metodo di posizionamento delle parti Serial Nesting era preferibile rispetto al Parallel

Nesting, mentre ora è stato dichiarato il contrario. Questo è dovuto al fatto che il metodo di posizionamento Serial Nesting per una produzione Subset Placement permette di aggiungere ulteriori pezzi nel caso in cui ci sia spazio libero sulla superficie di lavoro una volta che tutti i pezzi selezionati sono stati posizionati. Viceversa, per una produzione Full Placement, è preferibile posizionare le parti tramite il metodo Parallel Nesting poiché permette la sovrapposizione delle stesse e quindi garantisce che tutti i pezzi siano posizionati sull'area di lavoro. Ogni metodo ha quindi pro e contro che devono essere valutati in base ai propri requisiti e vincoli progettuali.

2.2 Comparazione di ricerche con orientamento di costruzione fisso e parti rappresentate tramite Bounding Box

L'orientamento di costruzione delle parti sulla superficie di lavoro influisce in modo rilevante sul processo di stampa. Questo parametro ha un impatto sui costi e sui tempi di produzione (un orientamento orizzontale, generalmente, determina una riduzione dei tempi in quanto si riduce l'altezza lungo l'asse Z e quindi il numero di strati), ma anche sulla qualità di stampa e sulla precisione dimensionale dell'oggetto da realizzare. Nel caso in esame, il Nesting 2D, l'orientamento di una parte riguarda l'orientamento della stessa lungo gli assi X e Y. Le parti, durante il processo di ottimizzazione, possono avere un orientamento fisso oppure non fisso, in base alla strategia adottata per raggiungere gli obiettivi stabiliti. Pande et al (2012) [43], Oh et al (2018) [44] e Calabrese et al (2022) [45], cercando di trovare una soluzione al problema del Nesting 2D, effettuano una ricerca basata sulle seguenti assunzioni: orientamento di costruzione fisso,

rappresentazione delle parti tramite Bounding Box, rotazione permessa alle parti per trovare la migliore soluzione possibile.

Il lavoro di Pande et al (2012) [43] fa riferimento a quanto elaborato da Wodziak et al (1994) [42] per l'elaborazione dell'algoritmo GA ma, nonostante le assunzioni siano le stesse, cambiano sia la tecnologia di riferimento che gli obiettivi iniziali. Nello specifico, la tecnologia adottata non è la SLA ma la SLS, in quanto permette la realizzazione di parti in metallo. Inoltre, l'obiettivo è di trovare un migliore orientamento della singola parte per migliorare la produttività, la qualità superficiale del pezzo e i tempi e i costi di produzione. Non si ha soltanto l'obiettivo di minimizzare il tempo totale di produzione come nell'articolo analizzato precedentemente. La particolarità del lavoro di Pande et al [43] risiede nel fatto che si voglia migliorare l'orientamento di una singola parte, nonostante il metodo possa essere applicato anche a più parti contemporaneamente. La metodologia si basa su un'architettura modulare caratterizzata da 3 fasi [43]:

- Realizzazione del modello CAD;
- Vuotatura della parte;
- Orientamento della parte tramite l'algoritmo GA.

La fase centrale è fondamentale e consiste nell'eliminazione del materiale in eccesso all'interno di un pezzo per utilizzare solo il materiale strettamente necessario, e quindi ridurre i tempi e i costi di produzione, ma anche per poter gestire meglio lo spessore delle pareti dell'oggetto e ottenere così un prodotto con una buona precisione dimensionale. La fase di vuotatura avviene sul modello STL. Hanno dimostrato che il risparmio di

materiale che si ottiene sottoponendo un pezzo al processo descritto è compreso tra il 50-70% del materiale, con conseguenti benefici sulla produttività, sulla qualità del prodotto e sui costi di produzione.

Il lavoro svolto da Oh et al (2018) [44] sviluppa una metodologia per stampare un pezzo le cui dimensioni sono superiori rispetto a quelle della superficie di lavoro. Anche in questo caso, viene considerato un solo pezzo, ma quando questo viene decomposto in più parti, il problema diventa un problema riguardante parti multiple e non solo una singola parte. Come illustrato in Figura 2.11, la singola parte viene decomposta in più parti e, per ogni parte ottenuta dal procedimento, viene calcolata la dimensione diagonale del relativo Bounding Box. Il processo si ripete finchè questo valore è minore della dimensione più piccola dello spazio di lavoro tra quelle possibili, ovvero larghezza, lunghezza e altezza.

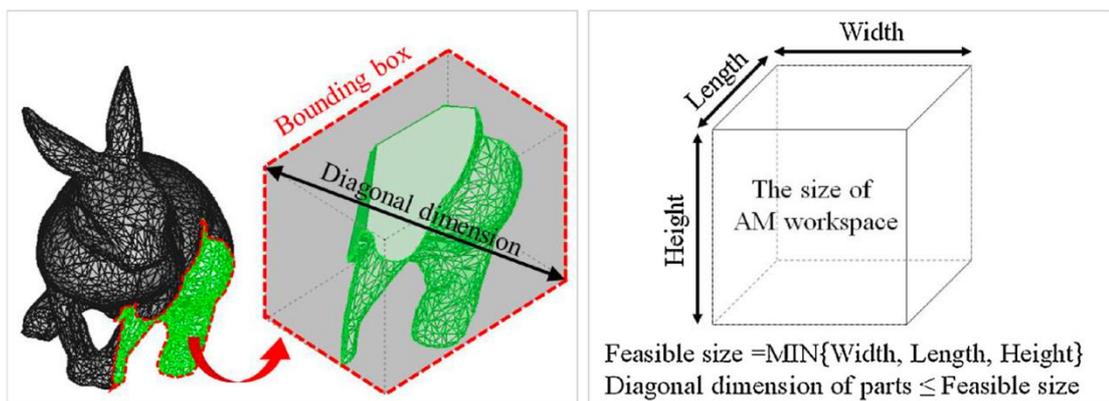


Figura 2.11: Dimensione diagonale del Bounding Box e relativo vincolo per il processo di stampa [44]

Dopo aver decomposto la parte, l'algoritmo GA viene applicato per ottenere il miglior posizionamento possibile per ogni Bounding Box. La particolarità di questo studio è che non considera un solo Batch su cui posizionare le singole parti, ma ne considera più di uno.

Inoltre, essendo le parti ottenute da una singola parte decomposta, è presente una fase finale di assemblaggio delle parti nel momento in cui tutte sono state stampate. Questo determina un tempo totale di produzione caratterizzato dalla somma di due tempi diversi (rappresentato in Figura 2.12): il tempo di realizzazione delle singole parti (in rosso) e il tempo di post-processo (in verde).

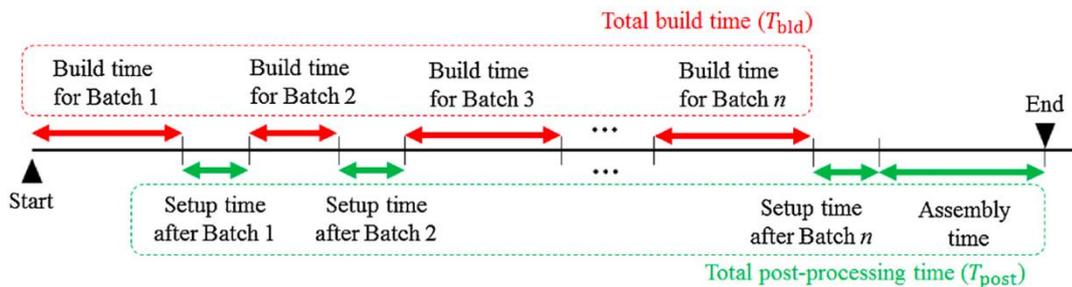


Figura 2.12: Tempo totale del processo [44]

È facile quindi comprendere gli obiettivi della ricerca: elaborare un metodo per stampare un oggetto le cui dimensioni sono superiori a quelle dell'area di lavoro e minimizzare il tempo totale del processo.

L'ultimo lavoro di ricerca analizzato in questo paragrafo è quello di Calabrese et al (2022) [45], nel quale si cerca di sviluppare un algoritmo che permetta di ottenere il miglior layout possibile per componenti di pari

dimensioni, rappresentati da Bounding Box, aventi un orientamento di costruzione fisso. Inoltre, si cerca il numero massimo di componenti “m” realizzabili sulla stessa piattaforma di lavoro, che può essere sia di forma circolare che di forma rettangolare, per poter effettuare una stima dei costi di produzione. Questa metodologia è stata sviluppata per le tecnologie del gruppo Powder Bed Systems, come SLS, EBM, PBF-LB/M (Figura 1.7). Gli autori concludono la ricerca affermando che per ottenere risultati migliori e quindi migliorare l’algoritmo, in futuro non dovrà essere considerato soltanto il piano XY, ma anche l’asse Z (in questo caso trascurato, si parla infatti di Nesting 2D). Affermano infatti che l’algoritmo non è stato sviluppato per essere integrato nei sistemi commerciali di Fabbricazione Additiva, in quanto non permette di ottenere soluzioni ottimali ma, appunto, dovrà essere soggetto a modifiche di miglioramento [45].

Come detto precedentemente, gli articoli esaminati in questo paragrafo hanno in comune le seguenti caratteristiche: orientamento di costruzione fisso, rappresentazione delle parti tramite Bounding Box e rotazione permessa alle parti per trovare la migliore soluzione di posizionamento possibile. Per quanto concerne l’orientamento di costruzione imposto come fisso, non sono state riscontrate criticità rilevanti. Questa assunzione permette di trovare l’orientamento di costruzione migliore per ogni singola parte e, soltanto dopo aver raggiunto questo obiettivo, il pezzo è posizionato sulla piattaforma ed è libero di ruotare per trovare la migliore soluzione per la costruzione dello stesso. Risulta quindi conveniente assumere un orientamento di costruzione fisso. Infatti, quasi tutte le ricerche esaminate per questo lavoro di tesi assumono questa condizione. Le principali criticità rilevate riguardano la scelta di rappresentare i pezzi

tramite Bounding Box. È evidente come la scelta di utilizzare i Bounding Box non sia una scelta corretta per quanto riguarda l'utilizzo dello spazio: per esempio, sia Oh et al [44] che Calabrese et al [45] affermano che per risparmiare spazio sulla superficie di lavoro bisogna scegliere un altro metodo di rappresentazione delle parti, poiché la stampa, in questi casi, fa riferimento ai Bounding Box e non all'effettiva geometria delle parti da stampare. Sarebbe meglio scegliere, quindi, il metodo di rappresentazione Projection Profile per migliorare l'occupazione dello spazio.

2.3 Il problema del Nesting 2D per parti con forma irregolare rappresentate tramite NFP

Nel momento in cui si vuole cercare una soluzione al problema del Nesting 2D, bisogna tenere in considerazione la forma dei poligoni da posizionare sulla superficie di lavoro. Questi possono avere forma regolare o irregolare. Il problema riguardante le forme irregolari è stato esaminato da Martins et al (2010) [46] e Sato et al (2015) [47]. In entrambi i lavori di ricerca viene utilizzato un algoritmo SA e viene scelto di rappresentare le singole parti tramite il No Fit Polygon (NFP), posizionando i pezzi sull'area di lavoro attraverso il metodo di posizionamento Serial Nesting. Nonostante le assunzioni siano diverse, in quanto il primo considera un box di lavoro di dimensioni fisse (lunghezza e larghezza) mentre il secondo considera un box con larghezza fissa e lunghezza variabile, le condizioni imposte per la risoluzione del problema sono le medesime. Questo è dovuto all'obiettivo comune delle due ricerche: ottenere un layout in cui tutte le parti sono posizionate sulla superficie di lavoro senza essere sovrapposte l'una sull'altra, massimizzando il tasso di utilizzo. Questo obiettivo si può

raggiungere grazie al posizionamento delle parti in modo Serial, ovvero posizionandole una alla volta, evitando così la sovrapposizione grazie all'utilizzo del NFP. Durante questo processo, l'algoritmo SA verifica e controlla i vari parametri. La ricerca di Martins et al [46] è stata la prima a ipotizzare un box con dimensione fisse, per cui non era presente nella letteratura un benchmark per confrontare i risultati ottenuti. Nonostante ciò, per tutti i casi di studio presenti nella ricerca, tutti i pezzi sono stati posizionati sulla superficie di lavoro con successo.

Nel lavoro svolto da Sato et al (2015) [47] è proposto un metodo di posizionamento a coppie basato su quello proposto da Sato et al (2012) [48]. Questa metodologia assicura che almeno una delle due parti sia posizionata sulla superficie di lavoro senza essere sovrapposta con altre parti. Infatti, un pezzo viene inizialmente traslato finché l'altro pezzo non trova una posizione che possa garantire la non-sovrapposizione tra le parti. A differenza del caso precedente, questo lavoro è stato confrontato con alcuni casi già presenti nella letteratura ed è emerso che i risultati ottenuti sono migliori di alcuni risultati ottenuti in passato da altri ricercatori. In ogni caso, il metodo basato sul posizionamento a coppie deve essere perfezionato tramite studi e ricerche future.

CAPITOLO 3 – NESTING 3D

Lo scopo di questo capitolo è quello di analizzare gli articoli presenti nella letteratura riguardanti il problema del Nesting 3D. Il Nesting 3D, a differenza del Nesting 2D, considera l'altezza degli oggetti durante il processo di ottimizzazione del posizionamento e dell'orientamento degli stessi all'interno del volume di stampa. Il processo di ottimizzazione considera quindi parti tridimensionali, come illustrato in Figura 3.1.

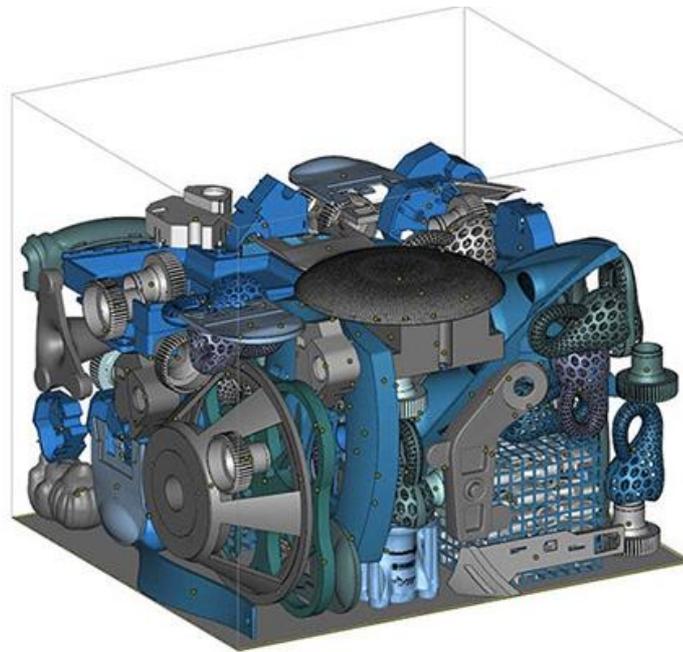


Figura 3.1: Nesting 3D [58]

Ogni lavoro di ricerca presenta diverse caratteristiche di produzione che influenzano i risultati ottenuti. Nelle seguenti figure sono mostrati dei grafici che rappresentano le scelte effettuate dai ricercatori inerenti a al

metodo di posizionamento (Figura 3.2), alla rappresentazione delle parti (Figura 3.3) e al metodo di produzione (Figura 3.4).

Metodo di posizionamento Nesting 3D

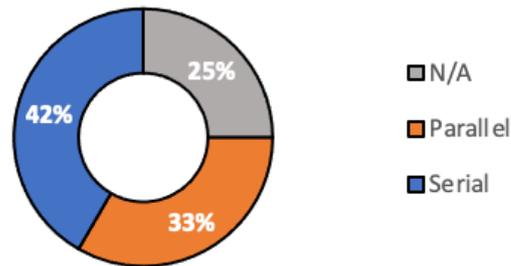


Figura 3.2: Preferenze per il metodo di posizionamento

Rappresentazione Parti Nesting 3D

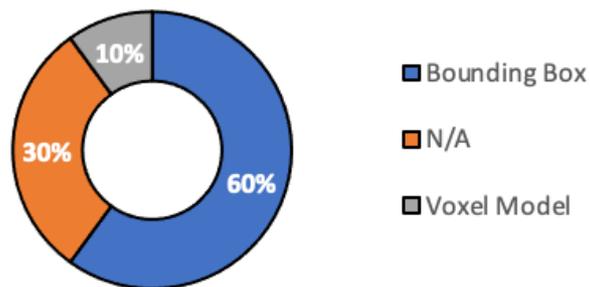


Figura 3.3: Preferenze per la rappresentazione delle parti

Produzione Nesting 3D

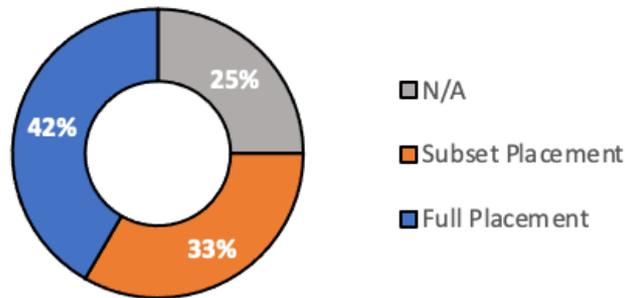


Figura 3.4: Preferenze per il metodo di produzione

Attraverso questo capitolo si vuole effettuare un'analisi dei lavori di ricerca svolti dai ricercatori fino a questo momento, per capire qual è la situazione attuale e quali sono le principali problematiche che devono essere risolte per ottenere soluzioni sempre più efficienti in futuro.

Gli articoli sono stati suddivisi sulla base della tecnologia adottata nella singola ricerca: sono confrontati gli articoli che adottano la stessa tecnologia, per valutarne i progressi e i possibili sviluppi futuri.

Il problema del Nesting 3D è stato oggetto di analisi, da parte dei ricercatori, per varie tecnologie dell'Additive Manufacturing, tra cui la tecnologia FDM la tecnologia SLS, la tecnologia SLA ed infine la tecnologia SGC. La Figura 3.5 mostra graficamente che la tecnologia SLS è stata adottata nel 43% degli articoli analizzati per il problema del nesting 3D. Questo è dovuto al fatto che la tecnologia SLS non richiede le strutture di supporto, in quanto generate dalla polvere non fusa durante il processo. In questo capitolo, sono analizzati i lavori di ricerca effettuati per le tecnologie citate.

Tecnologie Nesting 3D

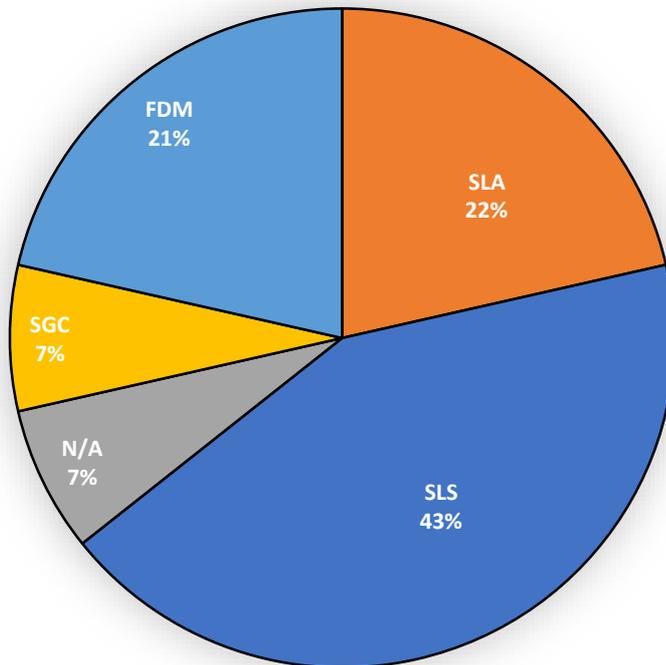


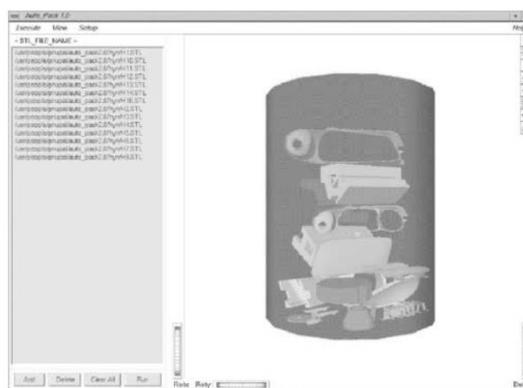
Figura 3.5: Tecnologie Nesting 3D

3.1 Lavori di ricerca per la tecnologia SLS

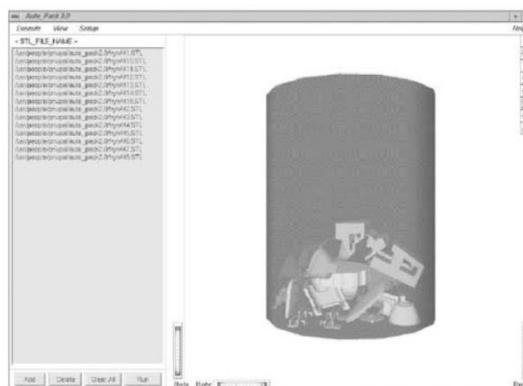
La tecnologia SLS è stata oggetto di varie ricerche per lo studio del problema del Nesting 3D per l'Additive Manufacturing. A partire dal lavoro svolto da Nyaluke et al (1996) [62], in cui viene proposto un metodo per ottimizzare l'utilizzo dello spazio di lavoro attraverso il metodo di posizionamento Serial Nesting delle parti per una produzione di tipo Subset Placement. L'anno successivo, nel 1997, Ikonen et al [63] hanno pubblicato il loro lavoro di ricerca, anch'esso basato su una produzione Subset Placement, ma, a differenza di Nyaluke et al [62], hanno deciso di adottare un posizionamento di tipo Parallel Nesting e un algoritmo GA per la risoluzione del problema. I risultati della loro ricerca erano buoni ma hanno esplicitato il fatto che non fosse una soluzione ottimale, a causa della difficoltà

riscontrata nel posizionamento delle parti all'interno degli spazi vuoti di altre parti, dovuta alla mancanza di conoscenze rispetto a quelle contemporanee.

Un ulteriore lavoro basato sulla tecnologia SLS, che utilizza un algoritmo GA per cercare una soluzione al problema del Nesting 3D è quello svolto da Hur et al (2001) [64]. Il loro lavoro ha l'obiettivo di ottenere una soluzione efficiente per il posizionamento e l'orientamento delle parti da produrre minimizzando l'altezza totale di costruzione. Per raggiungere l'obiettivo, hanno confrontato due metodi di rappresentazione delle parti, il Bounding Box e il Voxel Model affermando che quest'ultimo garantisce un'altezza di costruzione totale minore, come illustrato in Figura 3.6 [64]:



(a) Packing using bounding box



(b) Packing using voxel

Figura 3.6: Altezza totale ottenuta con Bounding Box (a) e Voxel Model (b) [64]

Per lo svolgimento del metodo proposto hanno adottato una produzione Full Placement e un metodo di posizionamento Serial Nesting in cui l'ordine di posizionamento dei pezzi è determinato dall'algoritmo GA. Le parti sono posizionate secondo la logica del Bottom-Left Approach (BL) [65]. Questo approccio prevede il posizionamento dei pezzi il più in basso e il più a sinistra possibile all'interno del volume di stampa [65]. La metodologia elaborata ha permesso di evitare la sovrapposizione dei pezzi, di ottenere una buona precisione dimensionale delle parti realizzate e una riduzione dei tempi di produzione.

Hong-Tzong Yau et al (2022) [66] trattano il Nesting 3D per parti con forme irregolari considerando come vincolo la distanza minima tra le parti per evitare la sovrapposizione tra di esse. Sono stati i primi a studiare l'effetto di questo vincolo sui risultati ottenibili dal processo di Nesting 3D e hanno dimostrato che questo influenza l'efficienza del processo di ottimizzazione del posizionamento e dell'orientamento delle parti. Per fare ciò, hanno utilizzato l'algoritmo FPA poiché, rispetto agli algoritmi GA e SA, risulta più preciso ed efficiente [66]. I risultati ottenuti dal loro metodo, utilizzando l'algoritmo FPA, sono stati confrontati con quelli ottenuti dai software commerciali Netfabb e Magics e hanno evidenziato una diminuzione dell'altezza di costruzione pari al 12.4% e 13%, rispettivamente. Inoltre, l'imposizione del vincolo relativo alla distanza minima tra le parti permette all'algoritmo di impiegare un tempo minore per il rilevamento di eventuali collisioni, riducendo così il tempo necessario per determinare il miglior posizionamento e orientamento possibile. Nonostante i risultati positivi, gli autori affermano che in futuro i risultati potranno essere ancora più promettenti qualora fossero considerati ulteriori fattori come, ad esempio, la precisione dimensionale (qui trascurata) per ottenere la combinazione

migliore possibile per ottimizzare le performance del metodo sviluppato [66].

3.2 Il problema del Nesting 3D per la tecnologia FDM

Thrimurthulu et al (2003) [59] e Arndt et al (2015) [60] nei loro lavori di ricerca hanno trattato il problema del Nesting 3D per la tecnologia FDM attraverso l'implementazione dell'algoritmo GA, con l'obiettivo di trovare, per ogni singola parte posizionata all'interno del volume di stampa, il miglior orientamento possibile.

I primi vogliono raggiungere l'obiettivo appena descritto migliorando, al contempo, sia la qualità superficiale del prodotto che il tempo di stampa necessario per la realizzazione dello stesso. Si ha quindi una funzione obiettivo da minimizzare, che comprende la somma pesata dei due fattori appena citati. Il metodo proposto può essere usato per l'orientamento di parti con geometrie semplici o complesse poiché si adatta alla forma della parte da realizzare. Questo è il grande punto di forza del lavoro svolto da Thrimurthulu et al [59].

Arndt et al [60] propongono una metodologia che prevede due fasi di orientamento della singola parte. Inizialmente, si orienta la parte sul piano xy e, solo dopo che questa fase è terminata, si orienta il pezzo lungo l'asse z. Solo nel caso in cui non si riesca a trovare una soluzione migliore per quanto concerne l'orientamento del pezzo, si procede con la fase di posizionamento all'interno del volume di stampa. Il tutto, come accennato all'inizio del paragrafo, avviene tramite l'utilizzo dell'algoritmo GA. Questo metodo però non considera soltanto la geometria delle parti durante il

processo ma anche gli aspetti tecnici, ritenuti fondamentali per ottenere risultati soddisfacenti. Questa valutazione non era ancora stata fatta in precedenza e, di conseguenza, i risultati ottenuti non sono stati confrontati con altri lavori, ma costituiscono la base di partenza per i futuri lavori di ricerca dei ricercatori che effettueranno le stesse assunzioni.

Si può quindi affermare che si è sulla giusta strada per quanto concerne la soluzione del problema del Nesting 3D per la tecnologia FDM. Infatti, entrambi i metodi sono promettenti: nel primo, i risultati ottenuti sono in linea con quelli ottenuti da Cheng et al [61], mentre il secondo rappresenta un nuovo modo di affrontare il problema e, se sviluppato correttamente in futuro, può condurre a soluzioni sempre più efficienti.

3.3 Metodologie per la tecnologia SLA

La tecnologia SLA è stata oggetto di analisi per la ricerca di una soluzione efficiente per il problema del Nesting 3D nei lavori di Wodziak et al [42] e Nezhad et al (2010) [67].

Wodziak et al [42] hanno esaminato, oltre al problema del Nesting 2D analizzato nel paragrafo 2.1.1, anche il problema relativo al Nesting 3D per la tecnologia SLA. Anche in questo caso hanno sviluppato un algoritmo GA con l'obiettivo di posizionare all'interno del volume di stampa il maggior numero di parti possibili, affinché fosse massimizzato il tasso di utilizzo. Le parti, nella loro metodologia proposta, sono posizionate secondo la logica del Serial Nesting. I risultati evidenziano che tutte le parti sono state posizionate poiché il volume totale era inferiore al volume totale del box

di stampa, utilizzando il 51.2% dello spazio disponibile, una percentuale non soddisfacente.

Nezhad et al (2010) [67] sviluppano un metodo per minimizzare il tempo totale di produzione e il volume totale delle strutture di supporto per la tecnologia SLA. La metodologia prevede l'utilizzo dell'algoritmo GA, basato sull'ottimizzazione di Pareto per ottimizzare l'orientamento delle singole parti, in funzione del tempo di produzione, delle strutture di supporto e della finitura superficiale dei pezzi. Si hanno quindi più funzioni obiettivo, tutte considerate individualmente. La scelta di utilizzare un algoritmo basato sull'ottimizzazione di Pareto è dovuta al fatto che una soluzione si dice Pareto efficiente se non esiste nessuna soluzione alternativa che permette di ottenere risultati migliori rispetto a quella determinata, per ogni funzione obiettivo considerata [67]. Per quanto riguarda la fase di Slicing, utilizzano il cosiddetto "Adaptive Slicing", ovvero lo Slicing Adattivo [67]. Lo Slicing Adattivo permette di calcolare lo spessore del singolo strato in funzione della geometria della parte considerata, con l'obiettivo di ottenere la migliore qualità possibile della superficie del prodotto [67]. Per valutare l'efficienza del metodo proposto hanno utilizzato principalmente parti con forme semplici, come forme cilindriche o rettangolari, ottenendo risultati soddisfacenti. I due casi di studio svolti non hanno evidenziato un orientamento ottimale delle parti e quindi non sono state individuate soluzioni Pareto efficienti. La soluzione del primo caso è caratterizzata da un tempo totale di produzione minore rispetto al secondo caso di studio, viceversa per quanto concerne il volume totale delle strutture di supporto. Il punto di forza dell'algoritmo proposto, affermano gli autori, è proprio questo: l'operatore che gestisce il processo di produzione sceglie

l'orientamento che preferisce in base alle proprie esigenze e ai requisiti di progetto [67].

In nessuno dei due casi analizzati è stata trovata una soluzione ottimale al problema del Nesting 3D per la tecnologia SLA. Questo problema rimane quindi irrisolto e gli studi futuri potranno basarsi sul metodo proposto da Nezhad et al [67], in quanto più elaborato e più recente rispetto a quello presentato da Wodziak et al [42]. Lo Slicing Adattivo e l'algoritmo basato sull'ottimizzazione di Pareto, se implementati con le tecnologie e conoscenze contemporanee, potrebbero rappresentare un punto di partenza per la risoluzione ottimale del problema.

Il problema della divisione delle parti in più parti per le tecnologie FDM e SLA

Il problema della divisione della singola parte in più parti nasce nel momento in cui le dimensioni dell'oggetto da stampare sono superiori rispetto a quelle del box di stampa che viene utilizzato per la realizzazione della stessa. Vanek et al (2014) [56] e Chen et al (2015) [57] hanno provato a risolvere il problema in questione, poiché rappresenta uno degli svantaggi della fabbricazione additiva rispetto alla produzione convenzionale, come affermato nel paragrafo 1.1.2.

Il processo consiste nella decomposizione dei modelli 3D, la successiva produzione delle singole parti decomposte ed infine l'assemblamento delle stesse nella fase di post-processo. Queste metodologie sono state sviluppate da Vanek et al (2014) [56] e Chen et al (2015) [57], adottando un metodo di posizionamento Serial Nesting ed una produzione Full Placement.

Vanek et al (2014) [56] hanno elaborato il metodo proposto per la tecnologia FDM e la SLA, mentre Chen et al (2015) [57] hanno considerato la tecnologia FDM (affermando che i risultati ottenuti sarebbero stati simili se si fosse considerata la tecnologia SLA) e le tecnologie caratterizzate dall'utilizzo della polvere.

Vanek et al [56] hanno sviluppato un algoritmo chiamato PackMerger che permette di scomporre la parte da produrre in varie parti per poi essere riassemblate nella fase di post-processo ed è applicabile alla singola parte da produrre, a più parti da stampare o alle parti le cui dimensioni sono maggiori rispetto al volume di stampa disponibile. Il metodo è caratterizzato da tre fasi principali: dopo aver scomposto il pezzo vengono individuate le singole parti che saranno unite alla fine del processo, successivamente viene stabilito l'ordine con cui le parti ottenute dalla prima fase saranno posizionate all'interno del volume di stampa in funzione della funzione obiettivo, una funzione di costo, in quanto diverse sequenze di posizionamento conducono a costi totali differenti. Infine, le singole parti vengono posizionate e orientate nel volume di stampa una alla volta cercando la posizione migliore possibile affinché lo spazio libero risultante dal posizionamento sia minimo. Questo processo è illustrato in Figura 3.7.

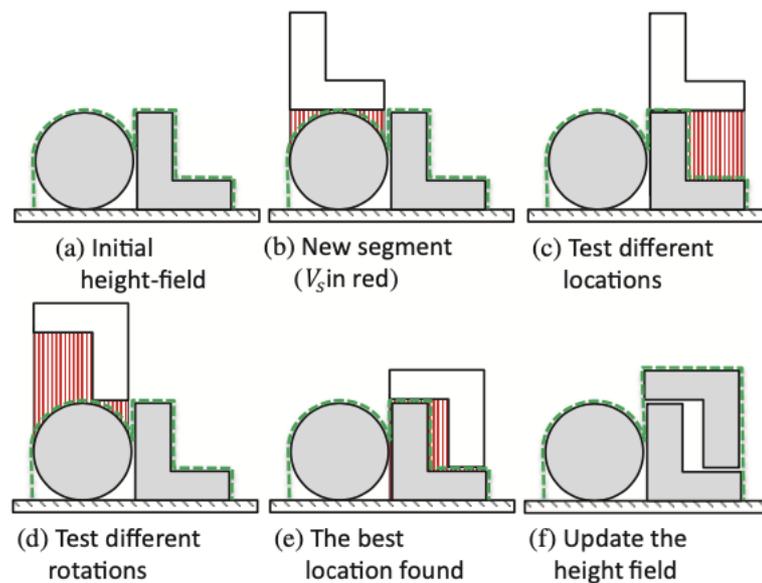


Figura 3.7: Fasi del processo [56]

Questa ricerca è stata svolta utilizzando sia la tecnologia SLA che la FDM. I risultati ottenuti evidenziano che questa metodologia è più efficiente per la tecnologia SLA, in quanto i risultati sono decisamente migliori rispetto a quelli ottenuti con la tecnologia FDM. Infatti, può far ottenere una riduzione del tempo di stampa pari al 30% circa e una riduzione del materiale di supporto pari al 60%. Il vincolo di questo metodo è, come prevedibile, la necessità di incollare le singole parti manualmente dopo averle realizzate. Per questo motivo, l'obiettivo deve essere quello di dividere il pezzo nel minor numero di parti possibili.

Anche il lavoro svolto da Chen et al [57] tratta il problema relativo alla decomposizione delle parti e il successivo assemblaggio nella fase di post-processo, cercando di minimizzare il numero di parti ottenuto dalla fase di decomposizione per ridurre i costi di assemblaggio. Hanno sviluppato un algoritmo chiamato Dapper per la risoluzione del problema, i cui risultati

sono stati poi confrontati con la ricerca effettuata da Vanek et al [56]. L'algoritmo Dapper lavora in modo iterativo e cerca di ottenere la migliore posizione possibile per le parti affinché gli spazi vuoti siano ridotti al minimo. Dopo aver scomposto la parte da realizzare in singole parti, queste vengono posizionate una alla volta all'interno del volume di stampa (Serial Placement), considerando il vincolo di non-penetrazione tra le parti che permette di evitare che la distanza tra due o più parti sia minore di un valore limite, basato sulla distanza tra i punti del singolo pezzo considerato e gli altri pezzi.

Vanek et al [56] hanno fornito il codice dell'algoritmo PackMerger a Chen et al [57] per poter effettuare un confronto tra i risultati ottenuti dai due algoritmi. Questo confronto è stato effettuato utilizzando la stessa macchina per il processo di stampa. Dai risultati dei singoli algoritmi si evince come l'algoritmo Dapper sia più performante rispetto all'algoritmo PackMerger sia in termini di tempo richiesto per il completamento del processo per ottenere la migliore soluzione possibile, sia per quanto riguarda l'efficienza di stampa. Nell'esempio considerato, l'algoritmo Dapper ha trovato una soluzione al problema in un tempo compreso tra 1 e 80 secondi, mentre il Pack Merger ha impiegato un tempo compreso tra 55 e 410 secondi. Nonostante ciò, Chen et al [57] evidenziano come in futuro, considerando ulteriori vincoli relativi alla produzione delle parti come, ad esempio, vincoli relativi ai tagli simmetrici del singolo pezzo durante la fase di decomposizione, possono portare a risultati migliori di quelli ottenuti nel loro lavoro di ricerca. Inoltre, la scelta relativa al taglio da effettuare per scomporre la parte incide anche sulla fase di assemblaggio delle parti, poiché non tutti i tagli permettono di poter assemblare le singole parti in modo corretto.

3.4 Nesting 3D per la tecnologia SGC

Il lavoro di ricerca svolto da Zhang et al [19] propone una metodologia per la risoluzione del problema del Nesting 3D, tramite l'utilizzo dell'algoritmo SA, per la tecnologia Solid Ground Curing (SGC). La metodologia si basa sull'assunzione che il box utilizzato per contenere le parti da stampare sia limitato superiormente, dal punto di vista dell'altezza. Di conseguenza, l'obiettivo principale è quello di minimizzare l'altezza totale di costruzione, evitando allo stesso tempo la sovrapposizione tra le parti, posizionandole all'interno del volume di lavoro basandosi sull'approccio Bottom-Left (BL) [65]. Nonostante l'algoritmo SA venga definito sia efficace che efficiente per la risoluzione del problema descritto e abbia quindi permesso di ottenere risultati soddisfacenti, gli autori rendono esplicito il fatto che è necessario condurre ulteriori ricerche per ridurre i costi di produzione e migliorare la produttività della macchina. Questa tecnologia però, come citato nel paragrafo 1.1.4.1 (Solid Ground Curing) a causa dei costi elevati non viene più utilizzata per la produzione di oggetti tramite la Fabbricazione Additiva.

CONCLUSIONI

L'Additive Manufacturing è un metodo di produzione che, grazie ai suoi numerosi vantaggi rispetto alla produzione convenzionale, viene adottato sempre di più in vari settori industriali, tra cui il settore Automobilistico, Aeronautico e Biomedicale. Per poter sfruttare totalmente i vantaggi che la Fabbricazione Additiva comporta, bisogna risolvere il problema del Nesting per ottimizzare i tempi e i costi di produzione.

Per questo motivo si è scelto di effettuare, in questo lavoro di tesi, un'analisi della letteratura relativa al problema del Nesting in ambito Additive Manufacturing. Sono stati analizzati gli articoli dei ricercatori che avevano l'obiettivo di provare a risolvere il problema in questione, proponendo una soluzione basata su assunzioni riguardanti le caratteristiche della modellazione e sulla tecnologia utilizzata, per sviluppare algoritmi di ottimizzazione per il posizionamento e l'orientamento delle singole parti all'interno del volume di stampa per poter ridurre i costi e i tempi di produzione. Si è potuto comprendere l'evoluzione del problema nel tempo, effettuando un'analisi a partire dai primi lavori di ricerca pubblicati fino a quelli più recenti, con l'obiettivo di poter definire l'attuale stato dell'arte, sia per il Nesting 2D che per il Nesting 3D.

Per quanto riguarda il Nesting 2D la situazione è più chiara rispetto a quella relativa al Nesting 3D in quanto, per il Nesting 2D, è più facile trovare una buona soluzione al problema in quanto tratta forme bidimensionali.

Per il Nesting 2D, dall'analisi effettuata, si evince come sui risultati finali abbia un peso importante la scelta tra un metodo di posizionamento Serial Nesting o Parallel Nesting. Infatti, se si vuole produrre

contemporaneamente un numero di parti stabilito, senza aggiungerne altre successivamente, è consigliabile utilizzare il metodo Parallel, in quanto permette la sovrapposizione dei pezzi e quindi un'ottimizzazione dello spazio di lavoro. Viceversa, se si prevede di stampare ulteriori parti oltre a quelle concordate inizialmente, il metodo Serial è preferibile poiché permette di posizionare ulteriori parti nel caso in cui ci fosse spazio libero sulla superficie di lavoro, a differenza del metodo Parallel che non permette ciò. Il metodo di rappresentazione delle parti preferibile tra quelli analizzati è il metodo del Projection Profile in quanto permette di occupare il minor spazio possibile sulla superficie di lavoro grazie alla sola rappresentazione della proiezione del profilo della parte da realizzare. Questo metodo di rappresentazione permette quindi di posizionare più parti rispetto al metodo NFP e soprattutto del Bounding Box, che comunque è utilizzato da vari ricercatori, soprattutto nel caso della divisione della singola parte da stampare in più parti a causa delle dimensioni eccessive rispetto al box di stampa.

Per quanto concerne il Nesting 3D la situazione è più complessa in quanto vengono considerate le parti da un punto di vista tridimensionale. Per questo motivo, il metodo di posizionamento mediamente preferito è il Serial Nesting, mentre il metodo di rappresentazione delle parti più utilizzato è il Voxel Model, come illustrato rispettivamente in Figura 3.2 e in Figura 3.3. Il Voxel Model viene utilizzato maggiormente poiché, essendo realizzato attraverso pixel tridimensionali, permette di eliminare la fase di Slicing e permette di ottimizzare gli spazi e l'altezza di costruzione totale all'interno del volume di stampa rispetto al secondo metodo più utilizzato il Bounding Box che è, logicamente, più ingombrante.

Il Nesting 3D però, nonostante gli studi tendano sempre più a focalizzarsi sulla tecnologia SLS, grazie al grande vantaggio dell'assenza delle strutture di supporto, e anche se le caratteristiche della modellazione da adottare per ottimizzare gli spazi siano chiare, risulta in una situazione più complessa rispetto a quella per il Nesting 2D. Infatti, sono stati analizzati vari lavori i cui risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti dai software commerciali in quanto soltanto recentemente sono state introdotte nuove ipotesi per la risoluzione del problema [60] [66]. Questo fatto mette in evidenza come la situazione relativa al Nesting 3D sia in costante evoluzione ma, dopo aver analizzato i lavori più recenti pubblicati dai ricercatori, si può affermare che si sta andando verso la giusta direzione e che si siano poste le basi per ottenere risultati sempre più promettenti in futuro.

Le conclusioni descritte per i due problemi analizzati non rappresentano però le migliori soluzioni possibili per quanto riguarda le scelte relative alle caratteristiche della modellazione e/o la tecnologia da adottare, in quanto queste scelte vanno effettuate in base al singolo lavoro di ricerca da svolgere, basato a sua volta su specifici vincoli progettuali. Non esiste quindi per nessuno dei due problemi analizzati una soluzione ottimale che possa garantire, con certezza, di sfruttare al massimo il potenziale offerto dall'Additive Manufacturing. L'obiettivo deve quindi essere quello di ottenere, nel breve periodo, soluzioni sempre più efficienti vista la crescente adozione della produzione tramite Fabbricazione Additiva da parte delle imprese di tutto il mondo appartenenti a vari settori industriali. Come si evince dall'analisi effettuata in questo elaborato, sia per il Nesting 2D che per il Nesting 3D, sono state poste le basi per gli studi futuri affinché possano essere raggiunti risultati sempre più importanti. Tutto ciò, però,

deve essere agevolato dalla presenza di figure sempre più competenti in ambito Additive Manufacturing e il progresso di queste competenze dovrà essere favorito e finanziato anche dalle aziende stesse.

BIBLIOGRAFIA

[1] Wohlers, T., & Gornet, T. (2015). History of Additive Manufacturing.

[2] Standard EN ISO/ASTM 52900:2021

[3] Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5), 677–688.

[4] Lacroix, R., Seifert, R. W., & Timonina-Farkas, A. (2021). Benefiting from additive manufacturing for mass customization across the product life cycle. *Operations Research Perspectives*, 8.

[6] Kurdve, M., Persson, K. E., Widfeldt, M., Berglund, J., & Drott, A. (2020). Lead-Time Effect Comparison of Additive Manufacturing with Conventional Alternatives. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 13, 672–679.

[7] Mehrpouya, M., Vosooghnia, A., Dehghanghadikolaei, A., & Fotovvati, B. (2021). The benefits of additive manufacturing for sustainable design and production. In *Sustainable Manufacturing* (pp. 29–59). Elsevier.

[9] M. Szilvési-Nagy, Gy. Mátyási. (2003). Analysis of STL files

[11] Negi, S., Kumar Sharma, R., & Dhiman, S. (2013). Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review. Article in *Journal of Manufacturing Technology Research* · March, 5(1).

- [13] Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M. I. H., & Haq, M. I. U. (2022). Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 258–274.
- [15] Dvořák, V., Votrubec, R., Šafka, J., & Kracík, J. (2018). Experimental investigation of centrifugal fans for personal protection equipment - Effect of used 3D printing technologies. *EPJ Web of Conferences*, 180.
- [16] Legutko, S. (2018). Additive techniques of manufacturing functional products from metal materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 393(1).
- [17] Konta, A. A., García-Piña, M., & Serrano, D. R. (2017). Personalised 3D printed medicines: Which techniques and polymers are more successful? In *Bioengineering* (Vol. 4, Issue 4). MDPI AG.
- [19] Zhang, X., Zhou, B., Zeng, Y., & Gu, P. (2002). Model layout optimization for solid ground curing rapid prototyping processes. In *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (Vol. 18).
- [20] Galati, M., & Iuliano, L. (2018). A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. In *Additive Manufacturing* (Vol. 19, pp. 1–20). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.001>

[25] Framinan, J. M., Perez-Gonzalez, P., & Fernandez-Viagas, V. (2023). An overview on the use of operations research in additive manufacturing. *Annals of Operations Research*, 322(1), 5–40.

[27] Zhang, Y., Gupta, R. K., & Bernard, A. (2016). Two-dimensional placement optimization for multi-parts production in additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 38, 102–117.

[28] Oh, Y., Witherell, P., Lu, Y., & Sprock, T. (2020). Nesting and Scheduling Problems for Additive Manufacturing: A Taxonomy and Review.

[29] Bennell, J. A., & Oliveira, J. F. (2008). The geometry of nesting problems: A tutorial. *European Journal of Operational Research*, 184(2), 397–415.

[30] Mahadevan A. (1984). Optimisation in computer-aided pattern packing. Ph.D. thesis, North-Carolina State University.

[31] Canellidis, V., Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2013). Efficient parts nesting schemes for improving stereolithography utilization. *CAD Computer Aided Design*, 45(5), 875–886.

[32] E.K. Burke, R.S.R. Hellier, G. Kendall, G. Whitwell. (2007). Complete and robust no-fit polygon generation for the irregular stock cutting problem (pp. 27-49).

- [33] Yanyan Wu, Jami J. Shah, Joseph K. Davidson. (2003). Improvements to algorithms for computing the Minkowski sum of 3-polytopes. *Computer-Aided Design*, Volume 35, Issue 13, Pages 1181-1192.
- [34] Sambit Ghadai, Anushrut Jignasu, Adarsh Krishnamurthy. (2021). Direct 3D printing of multi-level voxel models.
- [36] Yang, Y., Li, H., Zhang, K., Jia, X., Wang, G., & Liu, B. (2023). A 3D nesting method based on the convex-concave coding similarity of the voxelized model for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 64.
- [37] Yang, Y., Liu, B., Li, H., Li, X., Wang, G., & Li, S. (2023). A nesting optimization method based on digital contour similarity matching for additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(6), 2825–2847.
- [38] Fastowicz, J., Grudziński, M., Teclaw, M., & Okarma, K. (2019). Objective 3D printed surface quality assessment based on entropy of depth maps. *Entropy*, 21(1).
- [39] Dickinson, J. K. (1999). Packing Subsets Of Arbitrary Three-Dimensional Objects.
- [40] Canellidis, V., Dedoussis, V., Mantzouratos, N., & Sofianopoulou, S. (2006). Pre-processing methodology for optimizing stereolithography apparatus build performance. *Computers in Industry*, 57(5), 424–436.

[41] Zhang, Y., Bernard, A., Harik, R., & Fadel, G. (2018). A new method for single-layer-part nesting in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(5), 840–854.

[42] Wodziak, J. R., Fadel, G. M., & Kirschman, C. (1994). A Genetic Algorithm For Optimizing Multiple Part Placement To Reduce Build Time.

[43] Phatak, A. M., & Pande, S. S. (2012). Optimum part orientation in Rapid Prototyping using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), 395–402.

[44] Oh, Y., Zhou, C., & Behdad, S. (2018). Part decomposition and 2D batch placement in single-machine additive manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 131–139.

[45] Calabrese, M., Primo, T., del Prete, A., & Filitti, G. (2022). Nesting algorithm for optimization part placement in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(7–8), 4613–4634.

[46] Martins, T. C., & Tsuzuki, M. S. G. (2010). Simulated annealing applied to the irregular rotational placement of shapes over containers with fixed dimensions. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 1955–1972.

[47] Sato, A. K., Martins, T. de C., & Tsuzuki, M. de S. G. (2016). A pairwise exact placement algorithm for the irregular nesting problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(11), 1177–1189.

[48] Sato, A. K., Martins, T. C., & Tsuzuki, M. S. G. (2012). An algorithm for the strip packing problem using collision free region and exact fitting placement. *CAD Computer Aided Design*, 44(8), 766–777.

[49] 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.

[56] Vanek, J., Galicia, J. A. G., Benes, B., Měch, R., Carr, N., Stava, O., & Miller, G. S. (2014). PackMerger: A 3D print volume optimizer. *Computer Graphics Forum*, 33(6), 322–332.

[57] Chen, X., Zhang, H., Lin, J., Hu, R., Lu, L., Huang, Q., Benes, B., Cohen-Or, D., & Chen, B. (2015). Dapper: Decompose-and-Pack for 3D Printing.

[59] 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.

[60] Arndt, A., Hackbusch, H., & Anderl, R. An Algorithm-Based Method For Process-Specific Three-Dimensional Nesting For Additive Manufacturing Processes.

[61] Cheng, W., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C., Wong, Y.S., Loh, H.T., Miyazawa, T. (1995). Multi-objective optimization of part- building orientation in stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1 No. 4, pp. 12-23.

[62] Nyaluke, A., Nasser, B., Leep, H. R., & Parsaei, H. R. (1996). Rapid Prototyping Work Space Optimization. In *Computers ind. Engng* (Vol. 31).

[63] Ikonen, I., Biles, W. E., Kumar, A., Ragade, R. K., & Wissel, J. C. (1997). A Genetic Algorithm for Packing Three-Dimensional Non-Convex Objects Having Cavities and Holes.

[64] Hur, S.-M., Choi, K.-H., Lee, S.-H., & Chang, P.-K. (2001). Determination of fabricating orientation and packing in SLS process.

[65] Araújo, L. J. P., Panesar, A., Özcan, E., Atkin, J., Baumers, M., & Ashcroft, I. (2020). An experimental analysis of deepest bottom-left-fill packing methods for additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(22), 6917–6933.

[66] Yau, H.-T., & Hsu, C.-W. (2022). Nesting of 3D irregular shaped objects applied to powder-based additive manufacturing.

[67] Nezhad , A. S., Vatani, M., Barazandeh, F., Rahimi, A. (2010). Multi objective optimization of part orientation in stereolithography.

SITOGRAFIA

- [1] https://ozeki.hu/p_1018-introduction-to-3d-printing.html
- [5] https://www.energygroup.it/applicazioni/additive-manufacturing-fabbricazione-additiva#close_newsletter
- [8] <https://www.ridix.it/blog/approfondimenti/additive-manufacturing-cosa-e/>
- [10] <https://3dprinting.com/software/>
- [12] <https://www.3dmakerengineering.com/blogs/3d-printing/how-3d-printing-works>
- [14] <https://www.internet4things.it/3d-printing/differenti-tecnologie-e-metodi-di-additive-manufacturing/>
- [18] <https://www.linkedin.com/pulse/sls-ed-sla-qual-è-la-differenza-prosilas-am/?originalSubdomain=it>
- [21] [http://www.tecnologiaedesign.it/web/tecnologie/additive-manufacturing/ebm/#:~:text=La%20tecnologia%20EBM%20\(Electron%20Beam,polvere%20metallica%2C%20superiore%20alla%20sinterizzazione](http://www.tecnologiaedesign.it/web/tecnologie/additive-manufacturing/ebm/#:~:text=La%20tecnologia%20EBM%20(Electron%20Beam,polvere%20metallica%2C%20superiore%20alla%20sinterizzazione)
- [22] <https://www.makepartsfast.com/what-is-electron-beam-melting/>
- [23] <https://www.ifam.fraunhofer.de/en/technologies/laser-beam-melting.html>
- [24] <https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting>
- [26] <https://sintratec.com/software/sintratec-nesting-solution/>
- [35] <https://www.drububu.com/tutorial/voxels.html>

[50]

https://it.wikipedia.org/wiki/Modellazione_a_deposizione_fusa#:~:text=L a%20tecnologia%20fu%20svilupata%20e,possiede%20il%20marchio%20 commerciale%20FDM

[51] https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_ground_curing

[52] https://polyd.com/it/blog/nested_build

[53] <https://3d4growth.com/stampa-3d-voxel>

[54]

<https://gasparisrl.it/nesting/#:~:text=Il%20termine%20%E2%80%9Cnestin g%E2%80%9D%20deriva%20dal,o%20pi%C3%B9%20semplicemente%20% E2%80%9Cannidare%E2%80%9D>

[55] [https://www.3dpeople.uk/3dpeopleuk-blog/additive-manufacturing-lead-](https://www.3dpeople.uk/3dpeopleuk-blog/additive-manufacturing-lead-times#:~:text=In%20summary%2C%20additive%20manufacturing%20has, and%20be%20more%20cost%20effective.)

[times#:~:text=In%20summary%2C%20additive%20manufacturing%20has, and%20be%20more%20cost%20effective.](https://www.3dpeople.uk/3dpeopleuk-blog/additive-manufacturing-lead-times#:~:text=In%20summary%2C%20additive%20manufacturing%20has, and%20be%20more%20cost%20effective.)

[58] <https://www.3dnatives.com/it/nesting-stampa-3d-290820239/>