



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2023/2024

Analisi Bibliografica dei Problemi di Nesting e Scheduling in Additive Manufacturing

Candidato: Giorgia Gatti

Relatrice: Erica Pastore

Corelatrice: Manuela Galati

ABSTRACT

La tesi proposta è una revisione della letteratura che analizza il problema del nesting in un un contesto di fabbricazione additiva, concentrandosi su come i vincoli tecnologici dello stesso si modificano se trattati congiuntamente a problemi di scheduling e come queste due fasi siano correlate.

È fornita, inizialmente, una disamina delle diverse tecnologie di fabbricazione additiva per inquadrare l'argomento oggetto di analisi. Successivamente, è proposta una classificazione che fa riferimento ad articoli che trattano problemi di ottimizzazione del nesting ponendo particolare attenzione all'orientamento di costruzione delle parti. In seguito, sono stati revisionati articoli che, oltre all'ottimizzazione dell'orientamento, affrontano anche il problema dell'ottimizzazione della disposizione delle parti in macchina. Il lavoro prosegue correlando il problema del nesting allo scheduling, dando evidenza di come i vincoli del primo si modifichino se considerati insieme alla fase di scheduling.

In conclusione, sebbene parte della letteratura tratti le due fasi in maniera sequenziale, per raggiungere un'ottimizzazione complessiva alcuni autori suggeriscono di trattarle integralmente risolvendo i due problemi simultaneamente.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di revisione della letteratura si pone l'obiettivo di analizzare come il tema del nesting abbia una importante rilevanza nella pianificazione della produzione in un contesto AM e come i vincoli tecnologici dell'attività si rilassano se considerati unitamente allo scheduling.

Si è deciso di ricercare in letteratura il trattamento delle suddette tematiche analizzando diversi articoli. Dapprima ci si concentra sul problema del nesting preso singolarmente per poi correlarlo ai problemi di scheduling mettendo a confronto i vincoli tecnologici e il loro diverso trattamento nel raggiungimento delle funzioni obiettivo per rendere più efficiente possibile la pianificazione della fabbricazione additiva.

In prima istanza, viene inquadrato il contesto della fabbricazione additiva in generale, soffermandosi sull'evoluzione che ha subito nel corso degli ultimi decenni e fornendo al lettore una disamina dei diversi processi di fabbricazione additiva. Sono messe in risalto, nel corso della trattazione, le similitudini, le differenze, i campi di applicazione, gli svantaggi e i vantaggi dei diversi processi, esaminandoli in base alle tecnologie utilizzate.

Nel prosieguo, il lavoro si concentra più nello specifico sul nesting e sullo scheduling. Si analizzano, in un primo momento, i problemi relativi al nesting e quali sono le principali similitudini e differenze della pianificazione della produzione in un contesto AM rispetto ad un contesto tradizionale. Sono poi esaminati i fattori di ottimizzazione che incidono sull'orientamento di costruzione e sulle modalità di disposizione delle parti all'interno della camera di costruzione delle macchine AM, fattori che influiscono significativamente sull'efficienza di questa fase, in termini di utilizzo di risorse, costi e tempi di costruzione. In un secondo momento, si esamina il problema dello scheduling, mettendo, anche stavolta, in risalto le similitudini e le differenze tra un contesto di fabbricazione

additiva ed un contesto tradizionale. Si pone particolare attenzione a come l'efficientamento di questa fase sia fortemente correlato alla fase di nesting precedentemente descritta e come i problemi di *batching* sono adattati al contesto AM per ottimizzare l'assegnazione dei *job*, risultanti dalla fase di nesting, alle macchine AM.

Successivamente, attraverso la classificazione degli articoli proposta nell'elaborato si esamina come i vincoli tecnologici cambiano considerando problemi di ottimizzazione incentrati sul nesting preso singolarmente o congiuntamente allo scheduling.

In una prima disamina sono affrontati i problemi di ottimizzazione relativi all'orientamento di costruzione delle parti da produrre, classificandoli in base al tipo di processo AM, all'ottimizzazione considerata (se singolo o multi-obiettivo), alle funzioni obiettivo dei modelli studiati e al tipo di rappresentazione utilizzata per le parti. In seguito si esamina l'ottimizzazione del layout, dove viene preso in considerazione, oltre all'orientamento di costruzione, anche la disposizione delle parti in macchina, classificando gli articoli trovati in letteratura in base ai processi AM utilizzati, al tipo di nesting adottato (se seriale o parallelo), alla tipologia di *packing* (se bidimensionale o tridimensionale), alle funzioni obiettivo del *packing* e dell'orientamento, alla rappresentazione della parte, alle possibili rotazioni e alle regole di posizionamento delle parti.

In ultima analisi, si correlano le problematiche di scheduling a quelle di nesting, ponendo attenzione a come i vincoli relativi al nesting si rilassino nel momento in cui considerati congiuntamente allo scheduling. La classificazione degli articoli proposta in questa parte prevede la loro suddivisione in base al processo AM utilizzato, alla determinazione dell'orientamento di costruzione (se fisso o da determinare), alle funzioni obiettivo, alla tipologia di macchine utilizzate, alla rappresentazione della parte e alle possibili rotazione e regole di posizionamento.

In conclusione, si evidenzia come, sebbene parte della letteratura tratti le due attività in maniera sequenziale, altri autori le considerano integralmente, mirando

ad un'ottimizzazione complessiva e risolvendo simultaneamente la disposizione delle parti in macchina e lo scheduling delle *build* sulle macchine.

INDICE

ABSTRACT.....	3
INTRODUZIONE	4
1. PRIMO CAPITOLO.....	1
1.1. Evoluzione dell' Additive Manufacturing	1
1.1.1. Definizione.....	1
1.1.2. Evoluzione tecnologica.....	2
1.2. Tecnologie dell' Additive Manufacturing	3
1.2.1. Ciclo di Additive Manufacturing.....	3
1.2.2. Processi di Additive Manufacturing	5
1.2.2.1. Binder Jetting.....	5
1.2.2.2. Directed Energy Deposition.....	7
1.2.2.3. Powder Bed Fusion.....	8
1.2.2.4. Material Extrusion	10
1.2.2.5. Material Jetting	11
1.2.2.6. Sheet Lamination	12
1.2.2.7. Vat Photopolimerization.....	12
1.3. Vantaggi dell' Additive Manufacturing.....	14
1.4. Svantaggi dell' Additive Manufacturing	16
1.5. Applicazioni.....	17
2. SECONDO CAPITOLO.....	19
2.1. Pianificazione della produzione in AM	19
2.2. Problemi di nesting in AM.....	22

2.2.1.	Definizione di nesting.....	23
2.2.2.	Differenze con problem di C&P	23
2.2.3.	Ottimizzazione del nesting.....	26
2.2.3.1.	Orientamento di costruzione.....	26
2.2.3.2.	Problemi di packing.....	30
2.3.	Problemi di scheduling in AM.....	32
2.3.1.	Problemi di batching.....	34
3.	TERZO CAPITOLO.....	36
3.1.	Nesting in AM	36
3.1.1.	Ottimizzazione dell'orientamento.....	37
3.1.1.1.	Ottimizzazione a singolo obiettivo	39
3.1.1.2.	Ottimizzazione multi-obiettivo	46
3.2.	Ottimizzazione dell'orientamento e della disposizione delle parti in macchina	56
3.2.1.	Problemi bidimensionali.....	58
3.2.2.	Problemi tridimensionali.....	70
3.3.	Nesting e scheduling in AM	75
3.3.1.	Progettazione layout	77
3.3.2.	Layout preimpostato	81
	CONCLUSIONI	96
	BIBLIOGRAFIA	98

1. PRIMO CAPITOLO

Nel presente capitolo viene inquadrato il contesto della fabbricazione additiva, ponendo attenzione alla sua evoluzione nel corso degli ultimi anni. Sono esaminati i diversi processi di Additive Manufacturing, mettendo in risalto le somiglianze, le differenze, gli svantaggi, i vantaggi e i campi di applicazione in base alle tecnologie utilizzate.

1.1. Evoluzione dell' Additive Manufacturing

Nel presente paragrafo si fornisce la definizione di fabbricazione additiva e una breve evoluzione della tecnologia negli anni.

1.1.1. Definizione

L' *Additive Manufacturing* (AM), o Fabbricazione Additiva è il termine generale per le tecnologie produttive che creano oggetti fisici attraverso la successiva aggiunta di materiale. Lo standard ISO-ASTM 52900-2021 definisce l'AM come “un processo di unione di materiali per realizzare parti partendo dai dati del modello 3D, solitamente strato su strato in contrapposizione alle metodologie di produzione sottrattiva e di produzione formativa”.

Il processo parte dall'elaborazione di dati CAD 3D, software di progettazione assistita da computer, che generano oggetti tridimensionali sovrapponendo e legando unità di misura del volume del materiale, anche chiamato voxel (Gebhardt et al, 2018).

1.1.2. Evoluzione tecnologica

In questo paragrafo viene trattata brevemente l'evoluzione della fabbricazione additiva negli anni, facendo riferimento ai processi di Additive Manufacturing più conosciuti.

Negli anni '80 è stata sviluppata la prima versione delle tecnologie di stampa 3D presso l'istituto municipale di ricerca industriale di Nagoya, rapidamente superata da quella brevettata da A. Le Méhauté, O. de Witte e J. C. André delle società francesi General Electric e CILAS (Zhang et al., 2018(a)).

Ciononostante, la tecnologia di prototipazione rapida (processo in cui si crea un modello più velocemente rispetto alle tecniche tradizionali) ampiamente più conosciuta e diffusa è quella brevettata da Chuck Hull nel 1986, con il nome di Stereolitografia (SLA), che consiste in una forma di fotopolimerizzazione in vasca, tecnica di fabbricazione additiva per polimeri. L'azienda 3D Systems, fondata dallo stesso Hull, ha anche introdotto il formato file STL, un tipo di file stampabile in 3D, ampiamente utilizzato ancora oggi (Gao et al., 2015).

Nel 1987, sulla base del metodo stereolitografico, l'americano Carl Deckard introdusse il concetto di Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS), fondando la società DTM in cui il polimero liquido veniva sostituito da un termoplastico in polvere e utilizzava un laser più potente rispetto alla tecnologia precedente. Rispetto alla SLA, il processo permette di realizzare parti definitive in materiale termoplastico, le quali conservano eccellenti proprietà meccaniche (Gebhardt et al, 2018; Shanthar et al., 2023).

Nel 1989 è stata introdotta una nuova tecnologia di stampa 3D, chiamata Modellazione a Deposizione Fusa (FDM). Inventata da Scott Crump, fondatore dell'azienda Stratasys, la tecnica si basa sul processo di estrusione di un materiale termoplastico, solitamente sottoforma di filamenti. La tecnologia è conosciuta per la possibilità di formare parti più robuste rispetto alla SLS (Zhang et al., 2018(a)).

Nel 1995, sulla base del metodo SLS, viene sviluppato il concetto di Selective Laser Melting (SLM), per superare alcune carenze del metodo precedente, come la bassa densità del materiale nel processo. Il Fraunhofer ILT Laser Technology Institute, in Germania e l'Università di Osaka, in Giappone, hanno proposto questo metodo innovativo che utilizza polveri metalliche e riesce a realizzare parti con densità paragonabile a quella risultante dalle tecniche di produzione tradizionali (Shanthar et al., 2023).

Nel 1997, l'azienda inglese Arcam, sviluppa la prima tecnologia di fabbricazione additiva basata su un fascio di elettroni (EBM). Il processo è considerato simile alla SLS e rientra nella famiglia della fusione a letto di polvere (Kaufui et al., 2012).

Nel 2001, è stato presentato, dall'azienda tedesca EnvisionTEC, un approccio unico alla tecnica di fotopolimerizzazione in vasca, chiamata Elaborazione Digitale della Luce (DLP). Il processo utilizza un proiettore UV su una vasca di resina per polimerizzare uno strato completo alla volta, consentendo una maggior precisione nei dettagli e velocità di stampa più elevate, a differenza della SLA, che utilizza un laser per polimerizzare la resina fotosensibile un punto alla volta. (Zhang et al., 2018(a)).

1.2. Tecnologie dell'Additive Manufacturing

Nel presente paragrafo è spiegato il funzionamento di un ciclo AM, condiviso da tutte le tipologie di processi e successivamente si esaminano le diverse tipologie di processi AM.

1.2.1. Ciclo di Additive Manufacturing

La fabbricazione additiva è un processo automatizzato per la creazione di oggetti tridimensionali utilizzando dati CAD 3D. Il ciclo di trasformazione di un generico processo di *additive manufacturing* è rappresentato nella Figura 1.

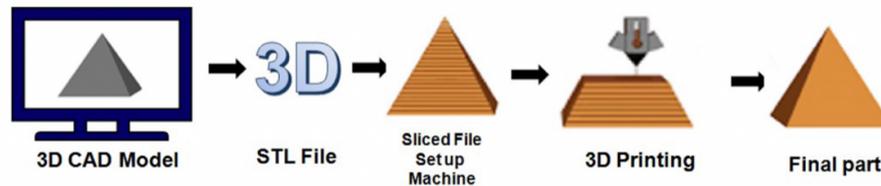


Figura 1: ciclo di trasformazione di un processo di additive manufacturing (Deepak Kumar et al., 2022).

Il ciclo inizia con la conversione di un disegno o un'immagine in un file dati CAD 3D, che racchiude le informazioni geometriche della parte da realizzare, anche detto modello di prodotto virtuale. Se siamo nel caso di un processo che necessita di una struttura di supporto, utile alla stabilizzazione della parte sul piano e a supportare eventuali sporgenze, questa viene generata separatamente, con un apposito programma, e poi aggiunta al file del prodotto. Con il termine “*AM front end*” si definisce l'interfaccia tra la creazione del database e l'inizio del processo. La trasmissione dei dati avviene attraverso un formato standard STL (*Standard Transformation Language*), anche chiamato linguaggio di tessellazione. Per creare un database STL, partendo da un file CAD 3D, si approssimano le superfici interne ed esterne del prodotto con triangoli. Si utilizzano triangoli grandi per approssimare aree con poca curvatura o piane, e triangoli più piccoli per aree con molte curve. Ognuno dei triangoli è definito dalle coordinate x, y, z, (riferite ai tre angoli) e, per definire il loro orientamento sulla superficie, si usa un vettore normale. STL è considerato un formato standard, poiché questi database sono compatibili con ogni macchina di fabbricazione additiva. Dopo che il database STL è stato importato sulla macchina, viene verificato attraverso un software, che ha il compito di supportare posizionamento e orientamento della parte e di raggruppare parti multiple, se necessario, sulla piattaforma di stampa. Inoltre, il software è responsabile del controllo del processo, come la gestione del materiale, e fornisce il tempo necessario per la costruzione. La possibilità di variare le dimensioni dei triangoli e quindi la precisione del set di dati è considerato un

vantaggio dei file STL, rendendo possibile degli adattamenti alle specifiche fornite dai clienti.

Prima di effettuare la stampa viene eseguito lo “*slicing*” che consiste nel sezionare il modello virtuale in una serie di piani tra loro paralleli e perpendicolari all’asse z (direzione di costruzione). Si creano così gli strati necessari alla realizzazione della parte. Alla fine del processo di lavorazione automatizzato, le parti vengono fatte raffreddare e separate dalla macchina e dal supporto, se presente. Molto spesso sono necessari trattamenti non additivi, come l’infiltrazione e altri trattamenti di finitura, per assicurare alle parti le proprietà richieste. Questi ultimi processi rientrano nella fase di post-trattamento (Gebhardt et al, 2018).

1.2.2. Processi di Additive Manufacturing

Secondo lo standard ISO-ASTM 52900-2021 i processi di *additive manufacturing* sono suddivisi in 7 categorie:

- Binder Jetting (BJT)
- Directed Energy Deposition (DED)
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Material Extrusion (MEX)
- Material Jetting (MJT)
- Sheet Lamination (SHL)
- Vat Photopolimerization (VPP)

1.2.2.1. Binder Jetting

Lo standard ISO-ASTM 52900-2021 definisce la tecnologia Getto di Legante (BJT) come “processo di *additive manufacturing* in cui un agente legante liquido viene depositato selettivamente per unire materiale in polvere”.

Il processo fa parte delle tecnologie a base di polvere e consiste nell'infiltrazione di un polimero liquido nella superficie della polvere creando un primitivo agglomerato di polvere stampato, anche detto *green part*. Successivamente avviene la distribuzione della polvere sulla piattaforma di costruzione e viene depositato uno strato di polvere per ogni livello attraverso un rullo controrotante, una testina di stampa a getto spruzza il legante sul letto di polvere e si crea lo strato (Figura 2). Non sono necessarie strutture di supporto e solitamente non sono richieste fonti di calore, ma talvolta sono presenti riscaldatori per controllare i livelli di umidità ed essiccazione. Concluso uno strato la piattaforma di costruzione si abbassa per permettere la lavorazione dello strato successivo e il processo viene ripetuto fino all'ultimazione della parte (Ziaee et al., 2019).

Le parti così prodotte non hanno sufficiente resistenza, quindi necessitano di infiltrazioni durante il processo di post-trattamento. Inoltre, la parte finita può presentare porosità elevate.

I vantaggi della metodologia consistono nella possibilità di utilizzare qualsiasi materiale in polvere che può essere distribuito e bagnato con successo dal legante (metalli, ceramica, sabbia di fonderia, materiali polimerici) e di stampare oggetti a colori (Gao et al., 2015; Gebhardt et al., 2018). Non è necessaria alcuna struttura di supporto e, utilizzando un apporto di calore minimo rispetto ad altre tecnologie a base di polvere, evita la creazione di stress termici e ossidazione nella parte realizzata (Shanthar et al., 2023). Il sistema BJT è rappresentato nella Figura 2.

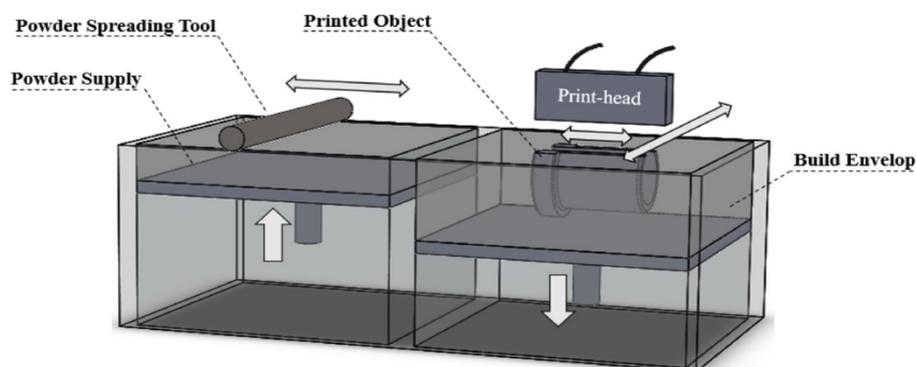


Figura 2: sistema a getto di legante (Ziaee et al., 2019).

1.2.2.2. Directed Energy Deposition

La tecnologia Deposizione Diretta di Energia è definita dallo standard ASTM 52900-2021 come “processo di *additive manufacturing* in cui energia termica focalizzata viene utilizzata per fondere materiale durante la deposizione”.

Questi processi utilizzano principalmente polveri o filamenti metallici. Il processo inizia con la deposizione su un substrato del materiale su cui agisce una fonte di calore ad alta densità di energia come un laser, un fascio di elettroni o un arco elettrico, creando un bacino di fusione e fondendo il materiale strato per strato. Completato uno strato, la testa di deposizione e il sistema che aggiunge il materiale, si spostano verso l'alto di una distanza pari allo spessore dello strato, creando lo strato successivo fino alla conclusione della parte.

Questo processo consente la creazione di microstrutture con complesse caratteristiche interne mediante l'esposizione a cicli di riscaldamento e raffreddamento rapido durante la deposizione degli strati. I continui sbalzi termici, però, possono portare anche ad elevate tensioni residue, porosità del materiale e deformazione ed essendo la deposizione del materiale di natura direzionale può capitare che le parti presentino caratteristiche di anisotropia.

Alcuni dei vantaggi del processo in esame sono la possibilità di utilizzare una vasta gamma di materiali e garantire proprietà meccaniche statiche, la possibilità di stampare parti complete, parti locali e rivestimenti, in un'unica macchina.

Il DED con laser utilizza particelle di polvere di dimensioni maggiori rispetto a quelle utilizzate da altri processi a base di polvere (ad esempio PBF con laser). Inoltre, rispetto ai processi di fusione a letto di polvere, le parti mostrano un'accuratezza dimensionale e una rugosità superficiale peggiore (Svetlizky et al., 2021).

1.2.2.3. Powder Bed Fusion

I processi conosciuti con il nome di Powder Bed Fusion sono definiti dallo standard ASTM 52900-2021 “processi di *additive manufacturing* in cui l’energia termica fonde selettivamente regioni del letto di polvere”.

Consistono in una delle tecniche maggiormente applicate nella fabbricazione additiva per la qualità e il costo di produzione. Nella maggior parte dei casi non è richiesto un supporto per il materiale durante il processo, poiché la stessa polvere inutilizzata funziona da supporto. Nei processi PBF una fonte di calore agisce direttamente su un letto di polvere per fonderlo e creare uno strato. Una volta che è stato realizzato uno strato, il letto su cui è posizionata la polvere si abbassa, muovendosi sull’asse z (direzione di costruzione), di una distanza pari allo spessore dello strato, permettendo la distribuzione del nuovo strato di polvere, procedimento che si ripete fino alla conclusione della parte.

Le tecniche di fusione utilizzate nel processo comprendono fusione laser, fusione a fascio di elettroni e fusione termica. I processi che rientrano nella prima categoria sono la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) e la Fusione Laser Selettiva (SLM), i quali portano alla fusione parziale o totale della polvere (di seguito trattati più nel dettaglio). Nella seconda categoria si ricorda la tecnologia di Fusione a Fascio di elettroni (EBM), che utilizza un fascio di elettroni ad alta tensione per la fusione completa della polvere. Nell’ultima, la tecnologia di Sinterizzazione Termica Selettiva (SHS), che scioglie i materiali in polvere attraverso l’assorbimento delle radiazioni da parte del substrato (Singh et al., 2020).

SLS

Nella tecnologia SLS le macchine sono formate da uno scanner laser posizionato al di sopra di un’area di stampa in cui viene depositata la polvere, il quale riscaldando il materiale genera il contorno della parte sulla piattaforma di costruzione. L’area di stampa è formata da un pistone che può muoversi sull’asse z, di modo che, dopo il completamento di uno strato, si abbassi di una distanza

pari allo spessore dello strato e permettendo ad un rullo di distribuire il materiale per la creazione dello strato successivo (Figura 3). Per evitare le deformazioni e ridurre la potenza del laser, l'area di stampa è completamente riscaldata, in più, per prevenire l'ossidazione, viene riempita con un gas protettivo (Gebhardt et al., 2018). La SLS si basa sul principio della fusione parziale del materiale in polvere, utilizzando un laser e sovrapponendo strati sinterizzati al fine di realizzare la parte richiesta. I vantaggi del metodo sono l'accuratezza, la rapidità e la capacità di restituire una buona qualità superficiale, sprecando poco materiale. Le polveri polimeriche sono quelle maggiormente utilizzate in questo processo. Pertanto, è particolarmente adatto ad applicazioni nel settore biomedico (Singh et al., 2020). Essendo il processo SLS caratterizzato da alte temperature è possibile che si verifichi il *curling phenomenon* o fenomeno dell'incurvamento a causa della differenza di temperatura tra uno strato inferiore e uno strato superiore. Si verifica maggiormente nella parte inferiore della camera di costruzione per la posizione del riscaldatore (Hur et al., 2001).

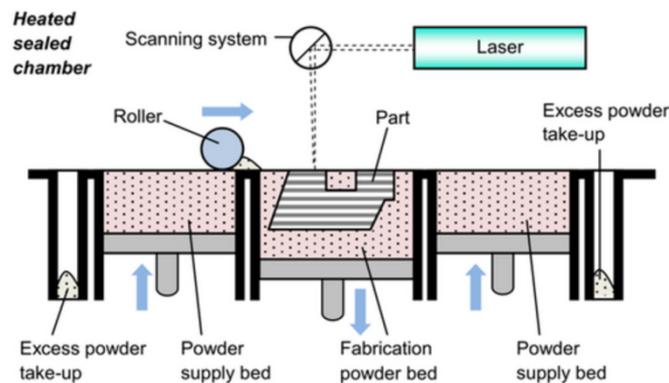


Figura 3: sistema di sinterizzazione laser selettiva (Shanthar et al., 2023).

SLM

La Fusione Laser Selettiva è stata sviluppata come miglioramento del processo SLS. Il procedimento è simile. Si realizzano prodotti strato su strato, utilizzando un raggio laser ad alta energia, il quale agisce su un letto di polvere. La differenza sostanziale con il metodo precedentemente descritto è il modo in cui vengono riscaldate le polveri. SLS si basa sul principio della sinterizzazione, che lavora

parti ad alta temperatura, ma senza raggiungere il punto di fusione del materiale, mentre SLM riscalda il materiale fino a raggiungere il punto di fusione; perciò, lavora a temperature più elevate e permette una riduzione nei tempi di processo. Pertanto, è adatto principalmente a lavorazioni di parti metalliche (Singh et al., 2020).

Il metodo SLM presenta come vantaggi ottime proprietà meccaniche, creazione di parti con microstrutture più sottili ed elevate velocità di raffreddamento. Anche questo tipo di processi sono soggetti al fenomeno dell'incurvamento. Inoltre, presentano la necessità di strutture di supporto, non solo per stabilizzare la parte durante la produzione, ma anche perché il materiale di supporto aiuta a dissipare il calore e quindi a ridurre le sollecitazioni termiche residue all'interno della parte (Griffiths et al., 2019). Le applicazioni di SLM riguardano principalmente il settore automobilistico, medico e aerospaziale (Dev Singh et al., 2021).

1.2.2.4. Material Extrusion

Questa categoria di processi si fonda sul principio di Estrusione del Materiale (MEX) ed è definita dallo standard ASTM 52900-2021 come “processo di *additive manufacturing* in cui il materiale viene erogato selettivamente attraverso un ugello”.

Il processo più conosciuto è chiamato Fused Deposition Modeling (FDM), che attraverso il processo di estrusione crea strati di materiale termoplastico. Il materiale viene fuso in ugelli riscaldati sottoforma di filamenti. Le macchine comprendono un'area di stampa riscaldata in cui è presente una testa di estrusione ed una superficie di stampa. La testa di estrusione deposita il materiale in base al contorno della parte. Il materiale termoplastico alimenta continuamente la macchina e la superficie di stampa si muove in direzione z per generare uno strato. Per la creazione della parte è necessaria una struttura di supporto. Quest'ultima è fabbricata da un secondo ugello, che estrude un materiale plastico diverso. Dopo che entrambi i materiali sono stati applicati, essi si solidificano e la

superficie si abbassa di una distanza pari allo spessore dello strato, si ripete la procedura fino alla creazione della parte. I macchinari utilizzati consentono la produzione di parti colorate e non sono costosi. D'altro canto, non presentando ottime finiture superficiali, sono solitamente accompagnate da processi di finitura. Inoltre, è necessario un tempo di lavorazione elevato per produrre parti complesse o di grandi dimensioni, sono richieste elevate temperature operative durante il processo e le parti finite possono presentare porosità e comportamenti anisotropi (è possibile ridurli con preriscaldamento o modificando i parametri di costruzione). La tecnologia non si limita all'utilizzo di materiali termoplastici, ma si presta anche a materiali ceramici o paste metalliche (Gao et al., 2015; Kaufui et al., 2012; Gebhardt et al, 2018).

1.2.2.5. Material Jetting

Il processo di Getto di Materiale (MJT) è definito dallo standard ASTM 52900-2021 come “un processo di *additive manufacturing* in cui gocce di materiale di base (es. resina fotopolimerica e cera) vengono depositate selettivamente”.

Multi Jet Printing (MJP) è una delle tecnologie più note. La macchina è formata da testine di stampa a getto d'inchiostro piezoelettriche, che hanno il compito di depositare una resina plastica o della cera su un substrato. Attraverso la polimerizzazione, permessa da una luce UV, lo strato solidifica e il procedimento viene ripetuto fino al completamento della parte. Più recentemente è stata proposta la tecnica di polimerizzazione chiamata PolyJet. Durante il processo è necessario una struttura di supporto che viene fabbricata insieme alla parte, tramite differenti ugelli. La parte finale ha una superficie più liscia rispetto al MJP, grazie allo spessore sottile che si riesce ad ottenere, ma non presenta elevata resistenza. Inoltre, consente la produzione di una parte con diversi tipi di materiali (Gebhardt et al, 2018; Zhang et al., 2018(a)).

1.2.2.1. Sheet Lamination

La tecnica di Laminazione dei fogli è definita dallo standard ASTM 52900-2021 “processo di *additive manufacturing* in cui fogli di materiale vengono uniti insieme per formare una parte”.

Il processo funziona con una stampante standard a getto che riproduce una forma su un foglio di carta, il quale viene incollato su un foglio sottostante. La macchina è dotata di un materiale di stampa formato da bobine di carta con dell'adesivo sulla parte inferiore che si attiva con il calore, di una superficie di stampa che può muoversi in direzione z per la creazione dei vari strati e da un dispositivo che srotola la carta utile e arrotola quella in eccesso. Il processo parte con il posizionamento e il fissaggio della carta, tramite un rullo riscaldato che aziona la colla. Il contorno della parte viene tagliato ad una profondità regolabile in base allo spessore della carta, da un plotter a laser. Il materiale che è presente sulla superficie di stampa, tra il contorno e la cornice, ottenuto attraverso un ulteriore taglio laser che delimita la parte, funge da supporto. Il materiale in eccesso attorno alla cornice viene sollevato e avvolto su un secondo rullo. La parte è completa dopo una fase di verniciatura. Le parti finali hanno buoni dettagli di finitura superficiale ma elevata fragilità. Il processo è adatto a materiali metallici, plastici e ceramici, ed è considerato un processo a basso costo (Gao et al., 2015; Zhang et al., 2018(a)).

1.2.2.7. Vat Photopolimerization

La Fotopolimerizzazione in Vasca è una tecnica di *additive manufacturing* definita dallo standard ASTM 52900-2021 “processo di fabbricazione additiva in cui un fotopolimero liquido viene polimerizzato in una vasca selettivamente, la polimerizzazione è attivata da una luce”.

I processi di polimerizzazione richiedono strutture di supporto per la stabilizzazione della parte, le quali vengono aggiunte al file CAD e rimosse

manualmente o automaticamente al completamento del processo. La stereolitografia proposta da Hull, come detto in precedenza, è la prima tecnologia di *additive manufacturing* in cui l'area di stampa è riempita con una fotopolimero liquido (o resina liquida) che viene polimerizzata da un raggio laser UV, posto sulla parte superiore, il quale crea il contorno della parte muovendosi sull'area di stampa. La resina polimerizzandosi si solidifica appena il laser tocca il materiale. La superficie di stampa ha la possibilità di muoversi in direzione z così da abbassarsi per la generazione di un nuovo strato. La procedura continua dal basso verso l'alto fino alla conclusione della parte (Figura 4). Al completamento, la parte viene pulita e indurita in una camera UV (fase di post-trattamento) e può essere sottoposta a processi di finitura. La potenza e la velocità di tracciamento del laser permettono di modificare lo spessore dello strato (Gebhardt et al, 2018).

Una caratteristica delle lavorazioni che si basano su questa tecnologia è l'ottima qualità superficiale delle parti fabbricate e la possibilità di utilizzare materiali diversi. Uno degli svantaggi di questo processo è che il tempo per la costruzione di una parte è maggiore rispetto agli altri processi AM, in quanto è fortemente influenzato dal "ritardo" causato dalla solidificazione del polimero, dovuto all'elevata viscosità, essendo necessario che uno strato si solidifichi prima di passare al successivo (Lan et al., 1997). Inoltre, i fotopolimeri hanno la tendenza a degradare il loro colore nel tempo e se esposti al sole. In aggiunta, essendo termoindurenti, una volta trasformati in solidi non possono essere fusi o modellati nuovamente e se sottoposti a stress, le parti tendono a spezzarsi, piuttosto che a cedere (Zhang et al., 2018 (a)). È stata sviluppata una versione più recente di questo processo chiamata Micro-stereolitografia, che presenta una maggior risoluzione e la possibilità di creare strati di materiali più sottili (Kaufui et al., 2012).

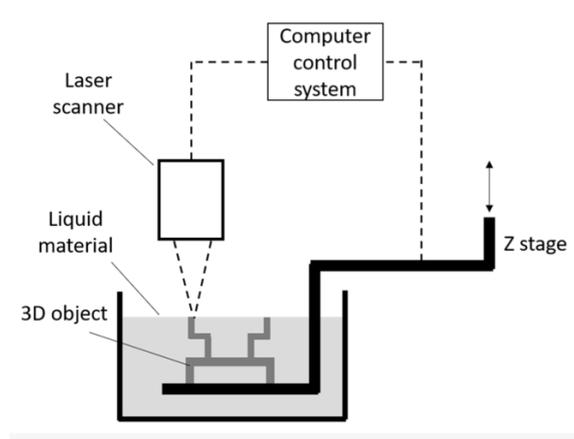


Figura 4: sistema SLA (Huang et al., 2020).

1.3. Vantaggi dell'Additive Manufacturing

La fabbricazione additiva, in contrapposizione alla sottrattiva, presenta diversi vantaggi, tra i quali si evidenziano:

- Flessibilità progettuale: permette la fabbricazione di forme geometriche complesse senza dover scontare i vincoli stringenti delle lavorazioni sottrattive, che limitano la libertà di progettazione, a causa dell'utilizzo di attrezzature specifiche e ulteriori difficoltà tecniche.
- Personalizzazione di massa: adattamento dei prodotti ai clienti in modo sostenibile.
- Ottimizzazione topologica: il progettista ha la possibilità di posizionare selettivamente i materiali, dove strettamente necessario, con un rilevante risparmio di materie prime e massa lavorata.
- Precisione dimensionale: capacità di lavorare con tolleranze molto strette, addirittura inferiori ai centesimi di millimetro, distante da quelle ottenibili tradizionalmente.
- Necessità di assemblaggio: viene eliminata la necessità di processi di assemblaggio, poiché è possibile realizzare qualsiasi geometria, solamente con una macchina.

- Assenza di attrezzature: non sono necessarie alcun tipo di attrezzature durante la produzione.
- Riduzione degli sprechi: trattandosi di una produzione a forma netta (*net-shape*) gli scarti di materiale sono quasi nulli, rappresentando un importante contributo alla sostenibilità ambientale.
- Velocità di produzione: i processi hanno la capacità di produrre strutture complesse molto rapidamente.
- Tempi e Costi in funzione della complessità geometrica: all'aumentare della complessità geometrica della parte da realizzare, l'incremento dei parametri di tempo e costo è notevolmente ridotto, rispetto alla produzione tradizionale. Nella Figura 5 è riportato l'andamento dei costi di produzione in relazione alla complessità della parte da realizzare.

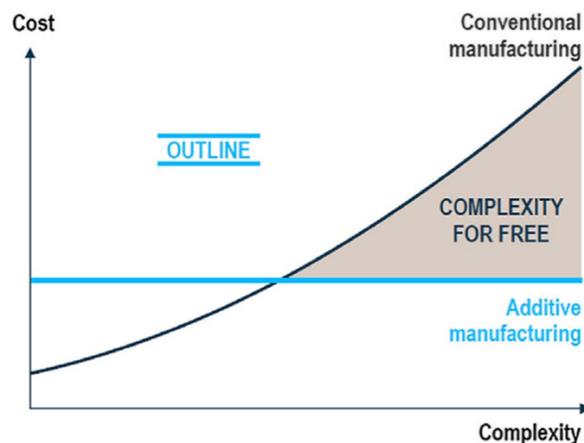


Figura 5: relazione tra costi di produzione e complessità (Shanthar et al., 2023).

Risulta evidente come all'aumentare della complessità della geometria i processi basati sull'AM mantengano costi costanti a differenza delle tecnologie tradizionali dove i costi aumentano esponenzialmente in relazione alla complessità (Shanthar et al., 2023; Deepak Kumar et al., 2022; Gao et al., 2015).

1.4. Svantaggi dell'Additive Manufacturing

Dopo aver citato i principali vantaggi della fabbricazione additiva è necessario sottolineare anche alcuni svantaggi (Canellidis et al., 2020):

- Problemi di misure: a causa delle dimensioni ridotte dei volumi di stampa, della maggior parte delle macchine AM, a volte risulta difficile la produzione di elementi di grandi dimensioni. Solo le tecniche di BJ e DED presentano volumi di costruzione maggiori rispetto alle altre tecniche.
- Tempo di produzione: le macchine AM possono richiedere tempi di fabbricazione elevati, inoltre è necessario assicurare equilibrio tra velocità di produzione e finitura superficiale richiesta.
- Presenza del supporto: di solito sono necessarie strutture di supporto per stabilizzare la parte da fabbricare, che a fine lavorazione devono essere rimosse, che si traducono in scarti di materiale.
- Finitura superficiale: rendono necessari processi di post-trattamento in quanto la parte spesso presenta una bassa qualità superficiale dovuta a (Cheng et al., 1995):
 - *Staircase effect*: difetto superficiale caratteristico della fabbricazione strato su strato, presente maggiormente sulle superfici inclinate. Si può ridurre assottigliando lo spessore degli strati e attraverso un orientamento di costruzione adatto.
 - *Distorsion and shrinkage*: influiscono sull'accuratezza della parte e sono legati alle proprietà del materiale e alle caratteristiche geometriche, come le superfici di sporgenza. In questi casi sono necessarie strutture di supporto adatte per ridurre gli effetti.
 - *Tessellation*: difetto causato dal formato file STL che approssima i dati sui quali agisce l'algoritmo di sezionamento. Il difetto può essere ridotto utilizzando altri formati dati.

1.5. Applicazioni

Inizialmente l'*Additive Manufacturing* era concepito come un processo di Prototipazione Rapida e trovava applicazione nelle fasi di progettazione e produzione. Durante tali fasi la creazione di prototipi aiutava a modificare rapidamente il prodotto, se necessario, con sostanziali risparmi in termini di costi e tempi di produzione.

Nel tempo l'AM si è evoluto molto attraverso lo sviluppo di metodi e materiali di stampa 3D e come si evince dalla Figura 6, a partire dall'anno 2010, il fatturato totale sui servizi e sui prodotti AM è aumentato notevolmente, passando da 2 miliardi di dollari a più di 15 nel 2021.

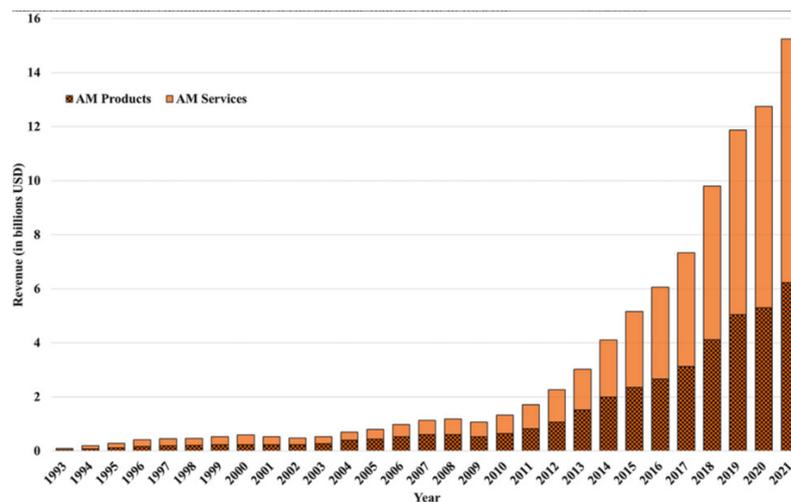


Figura 6: andamento del fatturato totale dei servizi e dei prodotti AM dal 1993 al 2021 (Shanthar et al., 2023).

Data la sua natura innovativa l'AM, negli ultimi anni, ha sviluppato diversi prodotti, sempre più comuni nella vita di tutti i giorni, rendendo le aziende ben più consapevoli del potenziale di questa nuova tecnologia. Difatti, come rappresentato nel grafico sottostante (Figura 7), diverse industrie, che spaziano dal settore manifatturiero, all'aerospaziale, dalle apparecchiature mediche al militare, si avvalgono oggi giorno dell'AM. Il grafico mette in relazione il fatturato derivante dall'applicazione delle tecnologie AM, con il settore di riferimento.

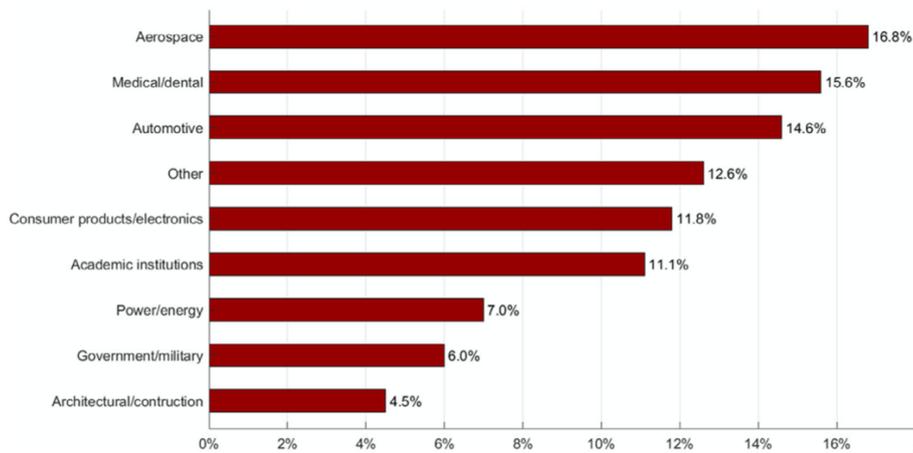


Figura 7: settori di applicazione additive manufacturing (Shanthar et al., 2023).

Come si evince dal grafico i settori aerospaziale, medico e automobilistico sono quelli che maggiormente utilizzano la fabbricazione additiva. Anche il settore medico beneficia particolarmente dell'AM, in quanto permette la creazione di impianti personalizzati (come apparecchi acustici). La categoria "Altro", che comprende i settori dei prodotti chimici, del legname e il settore minerario, sta adoperando sempre più questa tecnologia. Infine, il settore dell'elettronica utilizza la fabbricazione additiva per la realizzazione di sistemi integrati in materiali solidi, tipici dei sistemi RFID (identificazione a radiofrequenza) (Deepak Kumar et al., 2022).

2. SECONDO CAPITOLO

Nel presente capitolo si affronta il tema della pianificazione della produzione in AM, sottolineando le similitudini e le differenze rispetto ad un contesto di produzione tradizionale. Successivamente si pone l'attenzione sui fattori di ottimizzazione della fase di nesting, concentrandosi sull'orientamento di costruzione e sulla disposizione delle parti nella camera di costruzione. Infine, si affronta il problema dello scheduling in correlazione al nesting, focalizzando l'attenzione sui problemi di *batching* e come sono adattati al contesto della fabbricazione additiva.

2.1. Pianificazione della produzione in AM

Inizialmente il termine “pianificazione” nel contesto produttivo veniva utilizzato per descrivere semplicemente l'allocazione dei compiti alle risorse e le tempistiche connesse, considerando il loro sequenziamento come un problema separato. Successivamente, il significato è stato ampliato considerando, oltre all'assegnazione dei compiti alle risorse e le relative tempistiche, anche il numero di compiti da produrre e la sequenza dei compiti su ciascuna risorsa (De Antón et al., 2022). La pianificazione della fabbricazione additiva differisce da quella tradizionale in quanto considera il raggruppamento di più parti eterogenee, che devono essere prodotte simultaneamente su macchine con diverse caratteristiche in termini di velocità, dimensioni e costi (Kucukkoc, 2019). L'eterogeneità delle parti, in termini di dimensioni, altezze e orientamenti, crea lotti con differenti altezze, aree di stampa e strutture di supporto, caratteristiche che influenzano notevolmente i tempi e i costi dell'intero processo AM (De Antón et al., 2022).

Nel contesto dell'*Additive Manufacturing* la pianificazione della produzione identifica le seguenti principali problematiche: “*nesting parts into build*” e “*scheduling build into machine AM*”,

ovvero, come raggruppare le parti in lotti seguendo una specifica strategia (*nesting*) e come sequenziare i lotti sulle macchine AM (*scheduling*), considerando la capacità di stampa di queste ultime, come vincolo più importante (De Antón et al., 2022).

Al fine di chiarire la terminologia utilizzata, di seguito, si fa riferimento allo standard ISO-ASTM 52900-2021, in cui si definisce:

- *Part*: materiale unito per formare un elemento funzionale che può costituire un prodotto o una parte di esso.
- *Build*: gruppo di parti prodotte simultaneamente da una macchina AM in un ciclo di costruzione.
- *Costruzione*: configurazione della macchina AM che consente di creare un lotto di parti per la produzione simultanea. I parametri di costruzione (dimensione e velocità) sono ottenuti dalla corrispondente macchina.
- *AM machine*: parte dell'*additive manufacturing system*, compresi hardware, software di controllo macchina, software di configurazione richiesto e accessori periferici, necessari per completare un ciclo di costruzione per produrre parti.

Vi sono, oltre a quelli già citati, ulteriori problemi connessi a questo tipo di pianificazione, come il dimensionamento dei lotti di produzione e il posizionamento delle parti sulla superficie di stampa, argomenti che saranno trattati nel capitolo successivo.

La Figura 8 rappresenta una *build*, in cui un insieme di parti eterogenee sono annidate su una piattaforma di costruzione di una macchina AM.

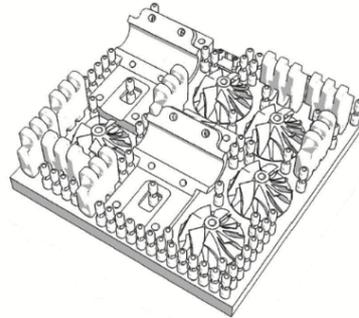


Figura 8: rappresentazione di una build in AM (Fera et al., 2018).

In letteratura i problemi relativi alla pianificazione della produzione AM sono degli argomenti di recente trattazione. I problemi relativi al nesting e allo scheduling mirano entrambi all'aumento dell'efficienza della fabbricazione additiva e possono essere suddivisi in numerosi sotto problemi che possono essere considerati sia congiuntamente per raggiungere determinati obiettivi di ottimizzazione della produzione, sia separatamente, ognuno con il proprio obiettivo di ottimizzazione.

Nel caso in cui le parti da produrre hanno delle specifiche priorità, in base alle *due date*, possono essere raggruppate nella stessa *build* durante il processo di nesting, influenzando in questo modo la fase di scheduling. In più, i problemi di nesting (es. *bin-packing*) possono considerare le diverse dimensioni delle *build* a seconda delle macchine non identiche disponibili, influenzando la mappatura dei lavori e delle risorse nei problemi di scheduling.

Inoltre, una caratteristica distintiva dei problemi di pianificazione in un contesto AM è che il tempo e il costo per ogni ciclo di costruzione variano a seconda degli orientamenti di costruzione, del posizionamento nella camera di costruzione e delle geometrie degli oggetti in input (De Antón et al., 2022; Oh et al., 2020).

Nell'ambito della fabbricazione additiva i problemi di nesting e scheduling sono classificati in tre tipi (Figura 9): *Nesting for AM* (NfAM); *Scheduling for AM*

(SfAM); *Nesting and Scheduling for AM* (NSfAM). Il presente lavoro si concentra sui problemi di tipo NfAM e NSfAM, esulano dalla trattazione i problemi di tipo SfAM, i quali si concentrano solo su tematiche di scheduling.

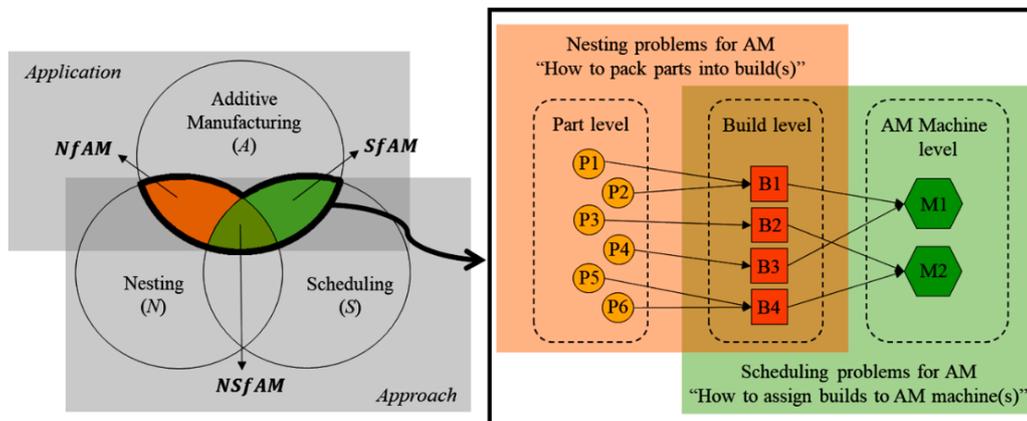


Figura 9: nesting e scheduling in additive manufacturing (Oh et al., 2020).

La Figura 9 evidenzia che la pianificazione della produzione è associata alla transizione tra tre livelli: *part level*, *build level* e *AM machine level*.

Come già accennato, i problemi di nesting in AM riguardano il modo con cui disporre più parti nelle *build*, ovvero dal *part level* al *build level*. Le decisioni da effettuare in questa fase includono l'orientamento di costruzione di più parti, il posizionamento delle parti all'interno della camera di costruzione, le loro rotazioni e la modalità di raggruppamento in *build*.

I problemi di *scheduling* AM, invece, riguardano come assegnare le *build* alle macchine AM, ovvero dal *build level* al *AM machine level*. In questo caso le decisioni da effettuare riguardano l'ordine di elaborazione delle *build* sulle macchine e la mappatura delle *build* e delle macchine AM (Oh et al., 2020).

2.2. Problemi di nesting in AM

Nel seguente paragrafo si introduce il tema del nesting in un contesto di fabbricazione additiva, sottolineando, dapprima le principali differenze rispetto

alla produzione tradizionale ed in seguito i fattori di influenza in un contesto di ottimizzazione.

2.2.1. Definizione di nesting

Il termine nesting è stato definito per la prima volta in ambito di ricerca operativa da Dyckhoff et al. (1990) come un problema di *Cutting & Packing* (C&P) caratterizzato da un *packing* bidimensionale di parti con forma irregolare che devono essere disposte su un oggetto rettangolare di grandi dimensioni. Qualche anno dopo Ikonen et al. (1997) notarono come la definizione dei problemi di nesting fosse in linea con le caratteristiche dei problemi di posizionamento delle parti sul piano di lavoro delle macchine AM. Successivamente la definizione viene estesa considerando la possibilità di rotazione degli elementi irregolari durante la fase di *packing* dagli autori Bennel et al. (2008).

2.2.2. Differenze con problem di C&P

Gli autori De Antón et al. (2022) approfondiscono la tematica del nesting in un contesto AM, riadattando la struttura generale dei problemi di C&P, proposta da Wäscher et al. (2007).

In un problema di C&P, che mira all'ottimizzazione di una determinata funzione obiettivo, si considerano due gruppi di oggetti uno formato da elementi di grandi dimensioni e l'altro da elementi di piccole dimensioni. Gli elementi piccoli vengono raggruppati in sottoinsiemi ed assegnati agli oggetti grandi nel rispetto del vincolo secondo cui un sottoinsieme di elementi piccoli deve essere interamente contenuto nell'oggetto grande evitando la loro sovrapposizione.

Come sottolineato dagli autori De Antón et al. (2022) “per il raggiungimento dell'obiettivo vengono individuati cinque sotto problemi da risolvere simultaneamente. I cinque obiettivi vengono adattati al contesto AM sostituendo i

termini *part orders* al posto di piccoli oggetti e *AM machine* o *build* al posto di grandi oggetti. I problemi identificati sono i seguenti:

1. Problema di selezione relativo ai *part orders*.
2. Problema di selezione delle *AM machine*.
3. Problema di raggruppamento relativo ai *part orders* selezionati.
4. Problema di allocazione relativo all'assegnazione dei sottoinsiemi di *part orders* in *build*.
5. Problema di layout relativo al posizionamento dei *part orders* su ogni *build* selezionata, considerando le condizioni geometriche delle parti.

La struttura proposta è generale, quindi è possibile che vi siano problemi che non includono tutti i sotto problemi sopra citati”.

Si evidenzia che il problema 1 esula dal contesto produttivo, pertanto, i sotto problemi relativi al nesting diventano quattro. Si precisa, inoltre, che il termine “grandi oggetti” è sostituito con *build* nel problema 4 e 5, e con *AM machine* nel problema 2, ad indicare rispettivamente il raggruppamento delle parti assegnate allo stesso ciclo di costruzione e la scelta delle macchine da utilizzare.

Gli autori Bennel et al. (2008) forniscono un'ulteriore definizione dei problemi di *nesting* che differisce da altri problemi C&P.

I problemi di nesting sono classificati come problemi che implicano una gestione non banale della geometria delle parti, in cui più pezzi di forma irregolare devono essere posizionati in configurazione con altri pezzi al fine di ottimizzare un obiettivo. La rappresentazione più comune delle forme irregolari, presente in letteratura, è il poligono, ma è possibile trovare anche rappresentazioni date da riquadri di delimitazione delle parti (*bounding box*), che semplificano il problema. Le caratteristiche chiave per identificare tali problemi sono l'eterogeneità dei dati, dimensioni e forme delle parti, obiettivi di ottimizzazione singoli o multipli. Tuttavia, l'infinita varietà di dimensioni e forme rende infinito il numero dei possibili posizionamenti sul piano di lavoro, quindi l'implementazione di tali problemi deve includere approcci che permettono la riduzione dello spazio delle soluzioni, ponendo particolare attenzione a non rimuovere le soluzioni migliori.

Rispetto ai problemi di C&P tradizionali il calcolo è più complesso e necessita di un maggior tempo di esecuzione.

Inoltre, i problemi di nesting in AM differiscono da quelli presenti nelle produzioni tradizionali, in quanto gli oggetti sono rappresentati da modelli CAD 3D e non attraverso modelli 2D di forma regolare o irregolare. In questi problemi i modelli 3D non solo possono traslare e ruotare lungo e attorno all'asse di costruzione, ma possono anche ruotare attorno agli altri due assi nello spazio 3D. In realtà, tali modelli hanno sei gradi di libertà (DoF), sebbene la traslazione lungo la direzione negativa dell'asse di costruzione nello spazio di costruzione di una macchina AM non sia consentita (Figura 10).

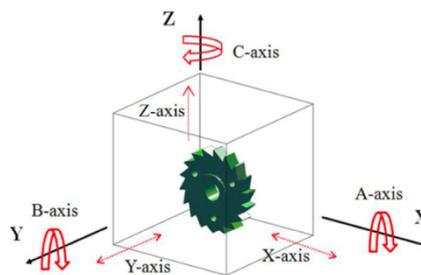


Figura 10: libertà di uno stencil 3D all'interno dell'involucro di costruzione (Zhang et al., 2018 (b)).

Nella pratica reale, la traslazione di un modello CAD 3D lungo l'asse di costruzione solitamente non ha senso e causerebbe costi aggiuntivi o addirittura problemi di qualità, poiché, nella maggior parte dei casi, sono necessarie strutture di supporto per sostenere la base del modello. Pertanto, un modello CAD 3D in AM ha in realtà cinque DoF, ossia tre rotazioni e due traslazioni lungo gli assi x e y. Risulta necessaria la presenza di cinque parametri per descriverne la posizione e l'orientamento.

Nel caso del *packing* 3D, poiché è possibile la disposizione degli oggetti su più strati, un oggetto ha sei DoF e sono necessari sei parametri per descriverne la posizione e l'orientamento (Zhang et al., 2018 (b)). I problemi di nesting, gestendo la geometria delle parti, trovano maggior applicazione nei processi

industriali del mondo reale (e.g., industria tessile, dell'abbigliamento, della lavorazione dei metalli, dei mobili e delle calzature) (Bennel et al., 2008).

2.2.3. Ottimizzazione del nesting

Nel contesto di ottimizzazione del layout per la fabbricazione simultanea di più parti su una macchina AM, la pianificazione della produzione fa riferimento a due problemi principali, la selezione dei parametri di costruzione (orientamento di costruzione, spessore dello strato) e l'utilizzo efficiente del tempo della macchina, e dello spazio di lavoro (*packing*).

Il primo è relativo alla fabbricazione di una parte singola e ricerca un compromesso tra costo di produzione e qualità della parte, ed è risolto, solitamente, attraverso un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, ciononostante può essere risolto anche attraverso ottimizzazioni a singolo obiettivo, incentrate sulla qualità superficiale.

Il secondo, invece, si riferisce alla fabbricazione simultanea di più parti diverse in modo da minimizzare i costi di produzione e le tempistiche, attraverso la riduzione del volume di produzione, al fine di massimizzare la compattezza del *packing* (Canellidis et al., 2013).

2.2.3.1. Orientamento di costruzione

Relativamente alla selezione dei parametri di costruzione, un parametro di fondamentale rilevanza è l'orientamento di costruzione di una parte, che influisce in modo significativo sulla riduzione di tempi e costi del processo. Un orientamento adeguato della deposizione delle parti può migliorare la precisione e la finitura superficiale, e ridurre i tempi di produzione e le strutture di supporto necessarie per la costruzione della parte. Pertanto, i criteri maggiormente studiati in letteratura per la determinazione dell'orientamento sono la qualità della

superficie, l'accuratezza dimensionale, le proprietà meccaniche, il tempo di costruzione, il volume della struttura di supporto e il costo di costruzione (Pandey et al., 2007). Nella Figura 11 sono rappresentati due possibili orientamenti per una parte.

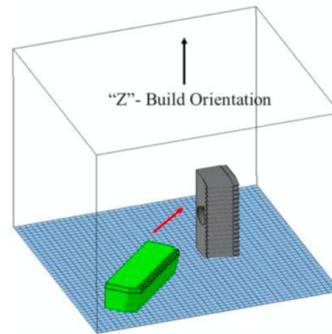


Figura 11: esempio di due orientamenti per una parte (Zhang et al., 2018).

Qualità superficiale

Per la natura del processo strato su strato, la qualità superficiale non è sempre garantita, a causa dell'effetto a gradino. Le superfici parallele o perpendicolari all'orientamento di costruzione presentano una miglior finitura superficiale rispetto a quelle in cui il vettore normale alla superficie crea un angolo con la direzione dell'orientamento. Difatti le superfici inclinate sono maggiormente colpite dall'effetto a gradino (Zhang et al., 2016).

In letteratura la stima più comunemente utilizzata per la qualità superficiale di una parte è attraverso la rugosità superficiale e gli obiettivi ad essa associati sono la minimizzazione della rugosità media delle parti e l'area delle superfici che presentano una rugosità stimata inferiore ad un valore limite (Che et al., 2021). Un altro modo per effettuare tale stima è attraverso l'errore volumetrico di una parte, definito come differenza tra il volume di materiale usato nella costruzione e il volume specificato dal modello CAD. L'obiettivo ad esso associato è dato dalla sua minimizzazione (Rattanawong et al., 2001, Masood et al., 2000 e Masood et al., 2003).

Accuratezza dimensionale

Per accuratezza dimensionale di una parte si intende la differenza tra la parte prodotta e il modello di progettazione, determinata principalmente da fattori come il ritiro, l'incurvamento e la distorsione. L'orientamento di costruzione influisce su questi fattori in quanto il tasso di ritiro è diverso in base alla direzione di costruzione e alla direzione di esposizione. Anche la distorsione è diversa per la parte, o per qualche caratteristica della parte, a seconda dell'orientamento scelto. Ad esempio, una struttura a parete larga e sottile parallela alla direzione di costruzione soffre maggiormente dell'effetto dovuto alla distorsione rispetto ad una struttura perpendicolare alla direzione di costruzione (Zhang et al., 2016). Il fenomeno dell'incurvamento (molto comune nei processi che richiedono elevate temperature) si verifica a causa della differenza di temperatura tra uno strato inferiore ed uno superiore. L'incurvamento della prima sezione influenza la precisione dell'intera parte nell'orientamento di costruzione (Hur et al., 2001).

Proprietà meccaniche

Le proprietà di una parte prodotta con un processo AM sono generalmente anisotrope (Zhang et al. 2016). Difatti, la resistenza a trazione e la resistenza di snervamento sono maggiori per provini costruiti secondo la direzione orizzontale rispetto che in quella verticale, cioè nella direzione di costruzione. Le proprietà meccaniche di una parte prodotta in AM dipendono principalmente dalla tipologia di processo e dal materiale utilizzato. Inoltre, sono anche influenzate dalla rugosità superficiale e dall'accuratezza dimensionale, e risultano quindi dipendenti dal suo orientamento di costruzione. Inoltre, l'orientamento influenza altre proprietà come la densità, la conduttività termica ed elettrica (Darvishi et al., 2023; Zhang et al. 2016).

Tempo di costruzione

Il tempo di costruzione differisce a seconda dei diversi processi AM. Ad esempio, nei processi a letto di polvere il tempo di costruzione comprende principalmente il tempo impiegato per l'esposizione degli strati, per la loro stesura e per la

distribuzione del materiale (Zhang et al., 2016), mentre per i processi SLA si tiene anche conto del tempo necessario alla polimerizzazione di ogni strato, del tempo necessario alla rimozione dei supporti e del tempo di post-trattamento (Lan et al., 1997). I parametri che determinano il numero di sezioni sono lo spessore dello strato e l'altezza della parte nell'orientamento di costruzione. Pertanto, poiché diversi orientamenti portano a diverse altezze di una stessa parte, l'orientamento influenza l'altezza della parte (Zhang et al., 2016) e per rendere minimo il tempo di costruzione si procede con la riduzione del numero di sezioni, che indica una riduzione dell'altezza della parte. Inoltre, se sono presenti supporti, a causa del maggior tempo di costruzione richiesto, una parte dovrebbe essere orientata minimizzando anche l'altezza della struttura di supporto richiesta (Cheng et al., 1995).

Supporti

Tra i criteri di selezione per la determinazione dell'orientamento di costruzione di un oggetto, si evidenzia l'importanza della struttura di supporto, richiesta dalla maggior parte dei processi AM (e.g. SLA, FDM). La struttura di supporto, formata dallo stesso materiale usato per la costruzione della parte, oltre ad avere il compito di stabilizzare la parte durante la produzione, ne sostiene la superficie quando sono presenti sezioni sporgenti, precisamente nel momento in cui una sporgenza presenta un angolo rispetto all'asse orizzontale inferiore di 45 gradi. Inoltre, la struttura di supporto può essere richiesta anche in processi caratterizzati da un'elevata diffusione del calore (e.g. SLM), non solo per sostenere le parti, ma anche perché il materiale aggiuntivo aiuta a dissipare il calore e, quindi, a ridurre le sollecitazioni termiche all'interno della parte da realizzare. La presenza del supporto implica che sia necessario un tempo maggiore per la fase di distribuzione del materiale, fase in cui viene aggiunto il materiale sulla piattaforma di costruzione per la creazione di uno strato. Per questo motivo si cerca di minimizzare sia il volume di queste strutture, sia l'area totale delle superfici che necessitano il supporto, al fine di ridurre il tempo di costruzione. La Figura 12 rappresenta una parte (in blu) ed il suo supporto (in grigio) (Che et al., 2021).



Figura 12: rappresentazione di una parte e del suo supporto (Che et al., 2021).

Costo di costruzione

Il costo di costruzione si riferisce alle risorse consumate durante la produzione di una parte in AM. Solitamente si compone di costi diretti, come materiali, e costi indiretti, come macchinari, energia, manodopera (ecc.). Il costo diretto può essere calcolato in base ai materiali consumati durante la produzione e al supporto necessario o ad altri materiali utilizzati durante la fase di post-trattamento. Il costo indiretto, invece, viene stimato attraverso una relativa tariffa moltiplicata per il tempo di realizzazione. Il costo totale per la creazione di una parte dovrebbe essere tenuto in considerazione durante la determinazione dell'orientamento di costruzione, in quanto orientamenti diversi causano un diverso consumo di materiale, volume di supporto, modalità di esposizione degli strati, post-trattamento e tempi di costruzione (Zhang et al., 2016).

2.2.3.2. Problemi di packing

I diversi processi AM, sebbene condividano il principio generale della lavorazione AM, ovvero l'aggiunta di materiale strato dopo strato, hanno caratteristiche e vincoli diversi. I processi possono essere divisi in due classi fondamentali, la prima classe è formata da quei processi che necessitano di strutture di supporto durante la fabbricazione, come SLA, MEX, MJT, FDM, EBM, SLM, la seconda, invece, da quei processi che utilizzano il materiale depositato inutilizzato come supporto per la struttura, come SLS e BJT.

Per la prima classe, le parti possono essere posizionate solo in singolo strato sulla piattaforma di costruzione (*packing* 2D). Per questa tipologia di processi non ha senso considerare il *packing* su più livelli, in quanto, se le parti vengono posizionate su più strati con strutture di supporto intermedie, la qualità della produzione non può essere garantita per le seguenti motivazioni: superfici danneggiate poiché direttamente a contatto con il supporto (Figura 13), deformazioni causate dagli effetti della gravità, della diffusione del calore o da altri fattori fisici, termici o chimici nel processo di costruzione. Tutto ciò porterebbe ad un aumento significativo dei costi, in quanto aumenterebbe il tempo e la difficoltà dei processi di post-trattamento.

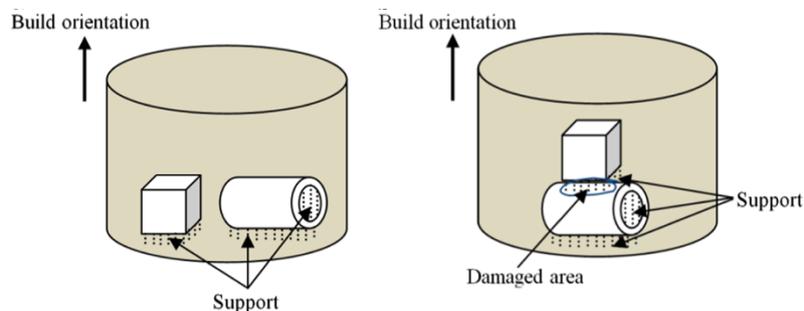


Figura 13: posizionamento delle parti con strutture di supporto (Zhang et al., 2015).

Per la seconda classe di processi, le materie prime depositate ed inutilizzate hanno funzione di supporto per la struttura, senza danneggiare le superfici delle parti da produrre. Pertanto, le parti possono essere disposte le une sulle altre nella direzione di costruzione, trasformando il problema in *packing* 3D. In generale, anche per processi che non richiedono la presenza di strutture di supporto, a causa della diffusione del calore, sarebbe preferibile considerare il *packing* bidimensionale, per garantire la qualità della produzione (Zhang et al., 2015). La Figura 14 rappresenta le due tipologie di *packing*:

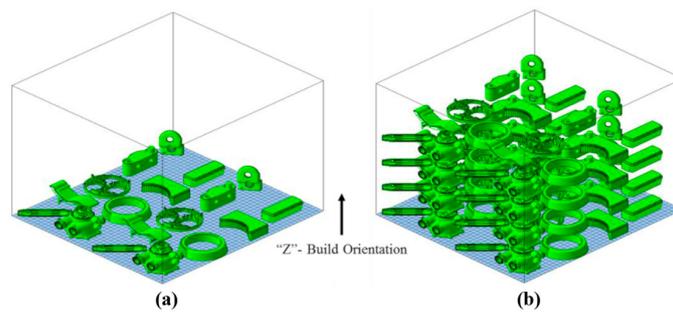


Figura 14: packing 2D e 3D (Zhang et al., 2018).

Nei problemi di nesting tridimensionali l'obiettivo è disporre una serie di modelli 3D irregolari in un contenitore di dimensioni fisse, cioè nel volume di costruzione. Al fine di trovare la soluzione di ottimizzazione che offre l'altezza di costruzione minore è necessario tenere in considerazione la sequenza di selezione dei modelli, la posizione e l'orientamento di ciascun modello (Yau et al., 2021).

2.3. Problemi di scheduling in AM

Il termine scheduling, nella produzione tradizionale, indica la pianificazione di più compiti su più risorse (Kucukkoc, 2019).

Gli autori De Antón et al. (2022) identificano anche quattro sotto problemi relativi allo scheduling, i quali vengono adattati al contesto della fabbricazione additiva.

“Per l'adattamento dei sotto problemi al contesto AM i termini attività e macchine sono stati sostituiti rispettivamente da *build* e *AM machine*. I quattro problemi sono i seguenti:

- a. Problema della determinazione del numero di *build* da produrre.
- b. Problema dell'allocazione delle *build* sulle *AM machine*.
- c. Problema del sequenziamento delle *build* su ciascuna *AM machine*.
- d. Problema della tempistica delle *build* su ciascuna *AM machine*.”

Nel loro lavoro emerge che il primo problema è già risolto nel problema 4 relativo al nesting, in cui i sottoinsiemi di *part orders* vengono assegnati alle *build*. Ciò evidenzia come il nesting e lo scheduling abbiano una forte correlazione in AM, dato il processo di pianificazione della produzione.

La Figura 15 rappresenta graficamente il problema dello scheduling su macchine AM.

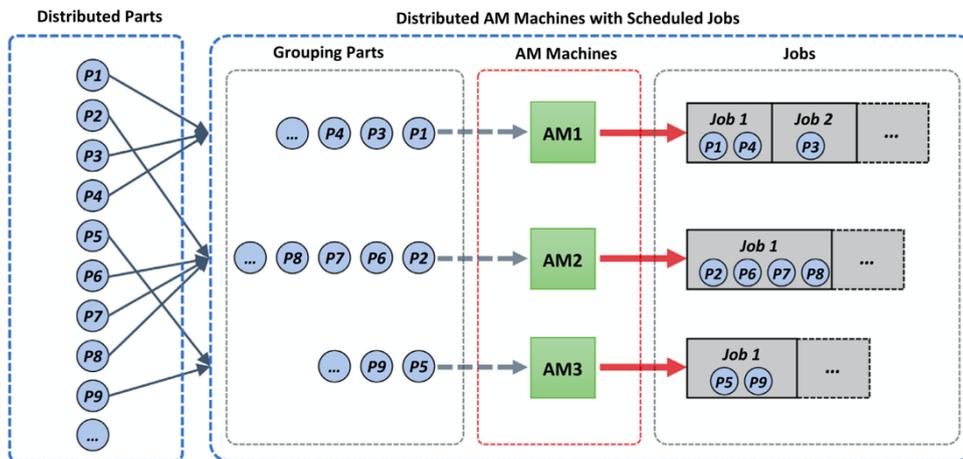


Figura 15: scheduling in AM (Kucukkoc, 2019).

Gli ordini ricevuti da clienti distribuiti vengono raggruppati e assegnati alle macchine come diversi *job*. Durante la fase di raggruppamento è necessario garantire che la capacità fisica della macchina (altezza e superficie) sia sufficiente per produrre i pezzi assegnati. Questo corrisponde ad un vincolo essenziale in termini di praticità. Inoltre, è necessario tenere conto delle diverse caratteristiche delle macchine AM, in modo tale da ottenere una produzione efficiente in termini di costi e tempi. Il problema si riassume nel raggruppamento delle parti e nella loro assegnazione a *job* da produrre sulle macchine al fine di ottimizzare le misure di prestazione come il costo totale ed il *makespan* (Kucukkoc, 2019). Quindi, una macchina AM può produrre più parti contemporaneamente in base alla sua capacità e all'area di produzione richiesta dalle parti.

Risulta importante precisare che il termine *job* in un problema di scheduling su macchine AM è definito come un insieme di parti da produrre simultaneamente.

Nel presente lavoro il termine *job* ha lo stesso significato del termine *build*.

Pertanto, qualsiasi parte prodotta all'interno di un *job* non può essere rimossa fino al completamento dell'intero *job*, cioè finché non sono state prodotte tutte le parti che lo compongono.

Per iniziare un nuovo *job* su una macchina AM vengono eseguite una serie di operazioni per impostare la macchina (operazioni di *set-up*), come la preparazione dei dati, il riempimento del materiale e la regolazione della macchina. Il tempo richiesto per queste operazioni è condiviso da tutte le parti assegnate allo stesso *job*. Pertanto, essendo i costi per il *set-up* della macchina e i costi per le operazioni di post-trattamento condivisi da tutte le parti, si ottiene una riduzione del costo totale (Kucukkoc, 2019).

2.3.1. Problemi di batching

I problemi di scheduling trattati nel presente lavoro sono riconducibili a problemi di *batching*, in quanto le parti vengono raggruppate in *job* e assegnati alle macchine, tenendo in considerazione dimensioni arbitrarie dei *job*.

È importante notare che i termini parti e *job* utilizzati in questo contesto corrispondono rispettivamente ai termini *job* e *batch* utilizzati nei problemi tradizionali.

Questa categoria di problemi in AM si riassume in due fasi dipendenti e sequenziali, ovvero *part-packing*, in cui le parti vengono raggruppate in *build* e il *build-scheduling*, cioè l'allocazione ed il sequenziamento delle *build* sulle macchine AM, sottolineando ancora una volta la correlazione tra nesting e scheduling (Lee et al., 2023).

I problemi di scheduling su macchine AM studiati in questo lavoro differiscono dai classici problemi di *batching* in vari modi, indipendentemente dalla tipologia di macchine considerate.

In primo luogo, il tempo di produzione delle parti non è noto in anticipo, in quanto dipende dalle risorse, dal volume delle parti incluse nel lavoro e dall'altezza massima di costruzione. Inoltre, i tempi di produzione sono molto più lunghi, in quanto le parti prodotte includono strutture complesse, che spesso non è conveniente produrre attraverso processi tradizionali.

In secondo luogo, il tempo di costruzione di un *job* è calcolato tramite una funzione, quindi diverse combinazioni di parti porteranno a costi diversi.

Infine, nel contesto AM esiste un compromesso tra utilizzo della macchina e tempo di completamento di un *job*. Difatti, sebbene risulti necessario massimizzare l'utilizzo della macchina per ridurre al minimo il numero di *job* da produrre e i tempi di *set-up*, ciò potrebbe portare ad un significativo aumento del tempo di costruzione di un *job* (Zhang et al., 2020).

Nel prossimo capitolo si considereranno problemi di scheduling su macchina singola, su macchine parallele identiche e non identiche, e su macchine non identiche (caso *job shop*).

3. TERZO CAPITOLO

Nel presente capitolo verranno esaminati articoli che trattano di nesting e scheduling nella pianificazione della fabbricazione additiva, ponendo particolare attenzione ai vincoli tecnologici e come si modificano considerando il nesting singolarmente o congiuntamente allo scheduling.

Gli articoli esaminati, riassunti nel Grafico 1, sono riconducibili sostanzialmente a tre tipologie di processi: PBF, MEX e VPP.

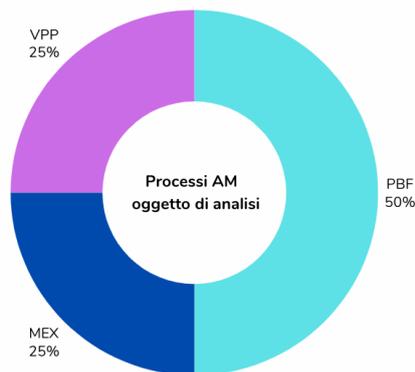


Grafico 1: processi AM oggetto di analisi.

3.1. Nesting in AM

Nel seguente paragrafo verrà esaminato più nello specifico il tema del nesting e di come viene studiato nell'ambito della fabbricazione additiva. Analizzando come la letteratura esamina il tema dell'ottimizzazione dell'orientamento di costruzione delle parti da fabbricare, viene proposta una suddivisione in base agli articoli che trattano il problema di ottimizzazione considerando singoli obiettivi separatamente e quelli che invece propongono una formulazione del problema

considerando più obiettivi contemporaneamente, anche in contrasto tra loro. Successivamente si analizzano gli articoli che, oltre all'ottimizzazione dell'orientamento delle costruzioni, studiano il posizionamento e la disposizione delle parti sulla piattaforma o nel volume di costruzione della macchina AM, proponendo una suddivisione che evidenzia le differenze tra il *packing* bidimensionale e il *packing* tridimensionale.

3.1.1. Ottimizzazione dell'orientamento

Lo studio dell'orientamento delle costruzioni è un tema fondamentale della pianificazione della fabbricazione additiva, in quanto influisce direttamente sulla qualità della parte da realizzare, sul tempo di costruzione e sui costi.

Nella Tabella 1 sono riportati gli articoli che sono stati analizzati su questa tematica, classificati in base al processo AM trattato, al tipo di ottimizzazione considerata, agli obiettivi considerati nel modello, alle funzioni obiettivo e alla rappresentazione della parte utilizzata nel modello.

Articoli	Processo AM	Multi-obiettivo	Obiettivo	Funzioni obiettivo	Rappresentazione parte
Rattanawong et al. (2001)	FDM	No	Max qualità superficiale	Min VE	Volumi primitivi di base
Masood et al. (2000)	FDM	No	Max qualità superficiale	Min VE	Volumi primitivi di base
Masood et al. (2003)	FDM	No	Max qualità superficiale	Min VE	Modello CAD tessellato
Alexander et al. (1998)	FDM	No	Max accuratezza dimensionale	Min altezza media ponderata cuspide	Modello CAD tessellato

Lan et al. (1997)	SLA	No	Max qualità superficiale; min tempo di costruzione; min struttura di supporto	Min area con peggior qualità; min altezza di costruzione; min punti di appoggio	Modello CAD tessellato
Canellidis et al. (2009)	SLA	No	Max qualità; min tempo/costo di fabbricazione	Min Ra; min FabTime	/
Padhye et al. (2011)	SLS	Si	Max qualità superficiale; min tempo di costruzione	Min Ra; min altezza di costruzione	/
Darvishi et al. (2023)	SLS	Si	Max qualità superficiale; min tempo di costruzione; max proprietà meccaniche	Min Ra; min altezza di costruzione; max resistenza dell'elemento più debole	/
Zhang et al. (2016)	SLS	Si	Max qualità superficiale; min tempo di costruzione; min costo	Min Ra; min altezza di costruzione; max favoreggiamento (F)	/
Cheng et al. (1995)	SLA	Si	Max accuratezza dimensionale; min tempo di costruzione	Min errori fabbricazione; min altezza di costruzione	/
Zhang et al. (2017)	SLA	Si	Max qualità superficiale; min tempo di costruzione; min costi	Min Ra; min altezza di costruzione; min volume di supporto; min area di proiezione	Area di proiezione sul piano xy
Pandey et al. (2004)	FDM	Si	Max qualità superficiale; min tempo di costruzione	Min Ra; min altezza di costruzione	/

Thrimurthulu et al. (2004)	FDM	Si	Max qualità superficiale; min tempo di costruzione	Min Ra; min altezza di costruzione	/
-------------------------------	-----	----	---	--	---

Tabella 1: classificazione articoli incentrati sull'ottimizzazione dell'orientamento di costruzione.

3.1.1.1. Ottimizzazione a singolo obiettivo

La ricerca, di seguito, si focalizza sui problemi di ottimizzazione dell'orientamento di costruzione di una parte, i quali si concentrano su un singolo obiettivo alla volta. Gli obiettivi si riferiscono alla massimizzazione della qualità superficiale, la massimizzazione dell'accuratezza dimensionale, la minimizzazione del tempo di costruzione e la minimizzazione dei costi.

Per quanto concerne la qualità superficiale di una parte prodotta mediante *Additive Manufacturing* uno dei più comuni difetti superficiali consiste nello *staircase effect* o “effetto a gradino”. Questo effetto è causato dalla natura del processo strato su strato e risulta più accentuato su superfici curve o inclinate.

Nonostante non possa essere totalmente eliminato, attraverso un adeguato orientamento di deposizione della parte o una corretta altezza del layer, può essere ridotto. A causa di tale difetto, si forma quello che viene chiamato errore volumetrico (VE), definito come differenza tra il volume di materiale usato nella costruzione della parte e il volume specificato dal modello CAD. L'errore volumetrico è differente a seconda dell'orientamento scelto per la parte, a causa del processo di stratificazione.

Gli autori Rattanawong et al. (2001), Masood et al. (2000) e Masood et al. (2003) minimizzano il VE come funzione obiettivo per determinare l'orientamento ottimale di deposizione di una parte e per calcolarlo assumono che i bordi degli strati siano rettangolari.

La metodologia proposta da Masood et al. (2000) e da Rattanawong et al. (2003) si basa sul presupposto che una parte complessa sia costituita da una combinazione di volumi primitivi di base, il VE della parte complessa si ottiene sommando i rispettivi VE dei volumi di base.

I primi propongono una risoluzione per una parte di forma cilindrica costruita attraverso un processo FDM, mentre i secondi considerano il caso di una forma conica, proponendo una risoluzione che possa essere adatta anche ad altri processi AM. Una tecnica generale per il calcolo del VE consiste nella determinazione dell'area dovuta all'effetto a gradino, misurata sull'angolo esterno di ogni strato dell'oggetto, moltiplicata per il perimetro esterno del rispettivo strato. In questo modo è possibile derivare l'espressione dell'errore volumetrico in diversi orientamenti della parte per diverse forme primitive. Nel lavoro di Masood et al. (2000), l'espressione è derivata per un cilindro, il cui asse non è parallelo alla direzione di costruzione ma è inclinato di una certa quantità rispetto ad essa. L'area dell'effetto a gradino è definita come l'area del triangolo formato tra uno strato orizzontale e la superficie inclinata (triangolo abc in Figura 16).

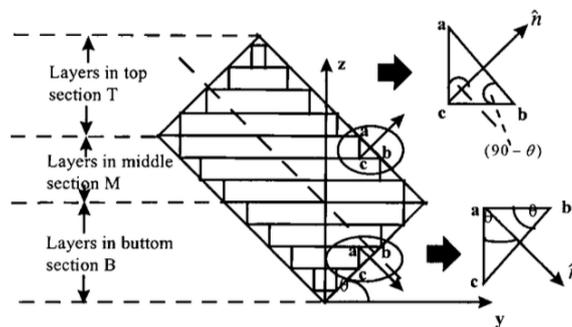


Figura 16: stratificazione ed errore dell'area in un cilindro orientato di un angolo (Masood et al., 2000).

L'errore volumetrico è rappresentato in relazione allo spessore dello strato e all'angolo di orientamento, cioè l'angolo tra il vettore normale alla superficie dell'oggetto e l'asse z (asse di costruzione).

La formula per il calcolo di VE è la seguente:

$$VE = \sum_{i=1}^n (AL)_i$$

Equazione 1: formula errore volumetrico per una parte cilindrica (Masood et al., 2000).

in cui “n” è il numero totale degli strati, “A” è l’area di errore in ogni strato, che è funzione dello spessore dello strato, “l” è il perimetro di ogni strato orizzontale.

Più recentemente, gli autori Masood et al. (2003) hanno proposto un approccio in cui una parte piuttosto che essere formata da volumi primitivi di base, è formata dal modello CAD tessellato, cioè si considerano i contorni complessi dell’oggetto generati dai piani orizzontali che intersecano la parte e si utilizza la geometria del contorno per calcolare il VE in ciascuno strato.

In particolare, calcolando il VE in uno strato, il VE della parte è ottenuto come somma dei VE di ogni strato che compone la parte. Il metodo è adatto ad ogni forma di qualsiasi complessità. Gli autori propongono una risoluzione per una semisfera. L’errore volumetrico della semisfera è rappresentato in Figura 17(a). La Figura 17(b) presenta i punti di intersezione tra la semisfera e due piani orizzontali (aa’ e bb’). Il contorno del poliedro sul piano bb’ è proiettato, lungo l’asse z, sul piano aa’ e la differenza volumetrica tra lo strato proiettato lungo l’asse z e la parte tessellata corrisponde all’errore in ciascuno strato.

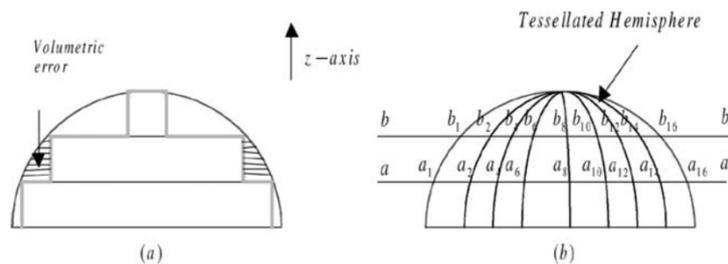


Figura 17: errore volumetrico di una semisfera (a) e punti di intersezione tra la semisfera tessellata con due piani orizzontali (b) (Masood et al., 2003).

Il VE in questa formulazione è calcolato come segue:

$$VE = \left| \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} (A_{i+1} - A_i) t \right|$$

Equazione 2: formula errore volumetrico per una semisfera tessellata (Masood et al., 2003).

Considerando i piani orizzontali che intersecano la semisfera tessellata, “A” corrisponde all’area orizzontale di ogni strato, “k” è il numero degli strati, “t” è lo spessore dello strato e $1 \leq i \leq n$, dove “n” indica il numero dei punti di intersezione in ogni strato. Inoltre, minore è lo spessore dello strato, più precisa è la parte e la precisione della superficie curva, modellata in CAD, aumenta all’aumentare del numero di superfici poligonali (*facets*) che la rappresentano. In questo modo aumentano i punti di intersezione tra il piano orizzontale e la semisfera, permettendo un aumento della risoluzione del processo. Gli autori propongono un algoritmo generico per la determinazione dell’orientamento che minimizza l’errore volumetrico, il quale è stato testato su più parti complesse, con diversi spessori dello strato, permettendo rotazioni attorno a qualsiasi asse. Questo metodo è stato verificato, oltre che per parti con contorni complessi, anche per forme primitive. Gli autori concludono che il sistema di orientamento della parte con questo algoritmo permette la fabbricazione con un miglior grado di precisione ed una migliore finitura superficiale.

L’effetto a gradino, oltre a creare problemi per la qualità superficiale, influisce sull’accuratezza dimensionale della parte. Gli autori Alexander et al. (1998) determinano l’orientamento focalizzandosi sull’accuratezza della parte. Quest’ultima viene misurata in termini di altezza della cuspide, che per le superfici triangolari si calcola come distanza normale tra il modello CAD tessellato e la parte depositata, considerando i bordi degli strati rettangolari (Figura 18).

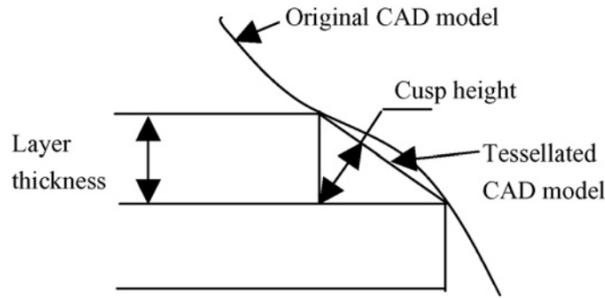


Figura 18: altezza della cuspid (Pandey et al., 2007).

Per massimizzare l'accuratezza dimensionale, si opta per la selezione dell'orientamento, tra alcuni candidati, che fornisce la minima altezza media ponderata della cuspid. Il calcolo dell'altezza ponderata della cuspid è dato dal prodotto tra l'area della superficie e l'altezza della cuspid. L'altezza totale ponderata della cuspid (H_w), calcolata attraverso l'Equazione 3, è data dalla somma di tre componenti: il primo termine corrisponde all'altezza totale ponderata della cuspid delle superfici che non necessitano supporti, il secondo, all'altezza totale delle superfici che necessitano di supporti e, il terzo, relativo alle superfici che sono toccate dall'alto dalle strutture di supporto.

$$H_w = \sum_{i=1}^{N-N_{sup}} h_{w_i} A_{fac_i} + \sum_{j=1}^{N_{sup}} (h_{w_j} + R) A_{fac_j} + \sum_{k=1}^{N_{rays}} R A_{fac_{proj_k}}$$

Equazione 3: formula dell'altezza totale ponderata della cuspid (Alexander et al., 1998).

In cui, N corrisponde alle superfici del modello, N_{sup} corrisponde alle superfici del modello che necessitano di supporti, N_{rays} corrisponde al numero dei raggi che costituiscono la struttura di supporto a raggiera. Il termine h_w indica l'altezza della cuspid di una superficie, A_{fac} indica l'area della superficie e $A_{fac_{proj}}$ indica l'area di contatto tra il raggio del supporto e la superficie del modello. Inoltre, si assume che se i supporti toccano la parte, l'altezza della cuspid della superficie triangolare viene aumentata di una costante R .

L'altezza media ponderata della cuspid si ottiene dividendo le somme delle altezze della cuspid ponderate per l'area totale delle superfici poligonali.

Nel lavoro degli autori Lan et al. (1997) viene proposto un modello per la determinazione dell'orientamento della deposizione di una parte prodotta mediante il processo SLA. Il modello si basa su tre criteri decisionali, considerati singolarmente: qualità superficiale, tempo di costruzione e struttura di supporto. Quindi propone tre diverse risoluzioni a seconda dell'obiettivo analizzato.

Per l'ottimizzazione della qualità superficiale si dovrebbe procedere attraverso la massimizzazione dell'area delle superfici che non presentano una struttura a gradino che si traduce nella scelta dell'orientamento che massimizza l'area totale, perpendicolare e orizzontale alle superfici poligonali della struttura che non presentano l'effetto a gradino indesiderato. Questa formulazione però non prende in considerazione tutte le casistiche reali, in quanto è possibile che nella parte da produrre non siano presenti superfici che siano parallele o perpendicolari tra di loro. Per superare questo limite si procede alla minimizzazione dell'area che presenta una peggior qualità superficiale, che tiene conto del grado di pendenza delle superfici. Si evidenzia che sono preferibili le superfici più ripide, in quanto, essendo lo spessore tra due strati costante, la differenza di area tra la superficie effettiva e quella desiderata, tra due strati adiacenti, nel caso di una superficie più ripida, è inferiore rispetto al caso di una superficie meno ripida, come è evidenziato nella Figura 19.

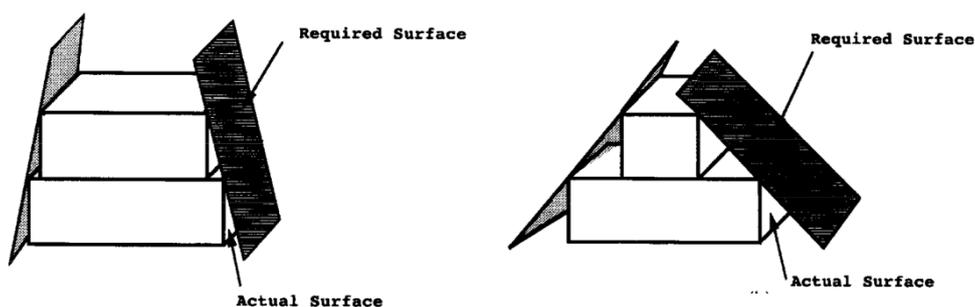


Figura 19: le superfici più ripide presentano una miglior approssimazione alle superfici reali (Lan et al., 1997).

Per ottimizzare il criterio del tempo di costruzione, si procede con la minimizzazione dell'altezza della parte, che si traduce nell'orientamento che

prevede il minor numero di strati da produrre, dato il maggior tempo di costruzione necessario al processo SLA.

Infine, considerando come obiettivo la minimizzazione della struttura di supporto, il metodo proposto si basa sulla minimizzazione dei punti di appoggio, cioè dei punti che necessitano di un supporto, in modo da limitare la fase di post-processing.

Anche gli autori Canellidis et al. (2009) affrontano il problema dell'ottimizzazione dell'orientamento in riferimento ad un processo SLA.

Gli autori valutano la bontà di un orientamento selezionato casualmente sulla base di due criteri: il tempo di fabbricazione, inteso come tempo di costruzione e tempo di post-trattamento, come criterio costo/tempo, mentre la rugosità superficiale media della parte, come criterio di qualità. Nel loro lavoro viene studiato l'effetto combinato di questi criteri attraverso una funzione ponderata, trasformando il problema in un'ottimizzazione a singolo obiettivo. Lo spessore dello strato è considerato costante per facilitare la sequenziale fabbricazione della parte. Per valutare la rugosità media di una parte, con un determinato orientamento, viene utilizzato un metodo di previsione analitica che prevede profili di rugosità superficiale misurati su parti di riferimento prodotti tramite un processo SLA. Basandosi sulla rugosità misurata sperimentalmente e sulla rappresentazione della parte in STL in un dato orientamento, la rugosità delle superfici viene stimata in base alla pendenza tra la superficie poligonale e il piano orizzontale (piattaforma di costruzione). Come fattore di tempo/costo, oltre al tempo di costruzione della parte, viene considerato anche il tempo di rimozione del supporto, ma non quello legato alle operazioni di finitura superficiale poiché rischierebbe di enfatizzare eccessivamente l'importanza della rugosità nella funzione obiettivo. I due fattori di costo sono combinati in una singola variabile "FabTime", che corrisponde alla loro somma. Per la stima del tempo di costruzione si utilizza un modello di previsione analitica che sfrutta il volume e l'altezza della parte, lo spessore dello strato e parametri per la distribuzione del materiale. Per il tempo relativo alla rimozione del supporto è utilizzata una metodologia simile che considera i tempi

di esposizione e il volume della struttura di supporto. La funzione obiettivo diventa:

$$F = a FabTime + (1 - a) Ra$$

Equazione 4: Funzione obiettivo del modello che mette in relazione il FabTime e la Ra (Canellidis et al., 2009).

in cui, Ra corrisponde alla rugosità superficiale media della parte e il valore a è il fattore di peso della funzione.

Lo spazio delle soluzioni include tutti gli orientamenti che possono derivare da rotazioni della parte rispetto agli assi x e y , rispetto all'orientamento iniziale, in quanto rotazioni rispetto all'asse z non modificano le variabili della funzione obiettivo.

3.1.1.2. Ottimizzazione multi-obiettivo

L'ottimizzazione dell'orientamento di costruzione multi – obiettivo è un'attività fondamentale della fabbricazione additiva che permette di trovare soluzioni applicabili alle casistiche reali, in quanto gli attributi presi in considerazione nella determinazione dell'orientamento ottimale sono vari e spesso in conflitto tra loro. Diventa quindi necessario trovare un trade-off tra obiettivi di qualità, di tempo e di costo.

I seguenti autori indagano lo spazio delle soluzioni dei problemi di ottimizzazione attraverso l'utilizzo di un algoritmo genetico multi-obiettivo non dominante (NSGAI), ciò significa che vengono restituite più soluzioni ottime, le quali vengono filtrate attraverso processi di *decision-making*.

Padhye et al. (2011) e Darvishi et al. (2023) propongono un problema di ottimizzazione multi-obiettivo dell'orientamento della deposizione della parte in processi SLS, che sviluppano parti con alte caratteristiche di qualità nel minor tempo possibile. I primi considerano come funzioni obiettivo del modello

matematico la rugosità superficiale (Ra) e il tempo di costruzione (T) e come variabili gli angoli di rotazione della parte attorno agli assi cartesiani. Per i processi SLS, la rugosità superficiale ha valori diversi per la superficie inferiore e superiore, e il valore medio è funzione delle Ra_i e delle aree, A_i , delle superfici triangolari del file STL:

$$Ra_{AV} = \frac{\sum Ra_i A_i}{\sum A_i}$$

Equazione 5: formula per la rugosità superficiale media (Padhye et al., 2011).

Il valore Ra_i è funzione dello spessore dello strato, dell'angolo $\alpha = 90^\circ - \theta$, in cui θ corrisponde all'angolo tra la direzione verticale e il vettore normale alla superficie, e della potenza del laser.

Non necessitando di strutture di supporto e assumendo che i tempi non produttivi siano indipendenti dall'orientamento di costruzione, il tempo più rilevante da considerare risulta quello per la distribuzione della polvere. Pertanto, minimizzando l'altezza della parte nella direzione di deposizione, è possibile minimizzare il tempo di costruzione. Considerando l'asse z come direzione di costruzione, il tempo di costruzione stimato è:

$$T = Z_{max} - Z_{min}$$

Equazione 6: formula per il tempo di costruzione (Padhye et al., 2011).

È da notare che, essendo la direzione z quella di deposizione, rotazioni attorno a tale asse sono invarianti ai fini del calcolo degli obiettivi, difatti si effettuano solo rotazioni attorno agli assi x e y .

L'orientamento in cui si ha un T minimo è ottenuto allineando la direzione minore dell'oggetto lungo la direzione di costruzione, ma in generale l'orientamento che minimizza Ra non è intuitivo, inoltre, le espressioni di Ra sono derivate statisticamente ed è possibile che in scenari pratici si presentino deviazioni dai valori predetti.

Nel lavoro di Darvishi et al. (2023), oltre alla minimizzazione della rugosità superficiale e del tempo di costruzione, emerge anche una terza funzione obiettivo relativa alle proprietà meccaniche della parte. Considerando come proprietà meccanica da massimizzare la resistenza di una parte, definiscono una funzione obiettivo che concentra l'attenzione sull'elemento più debole della parte, utilizzando il fattore di sicurezza (FS). Si utilizza il valore invertito di FS (che consiste nel rapporto tra stress effettivo e stress di snervamento) e quando il valore di FS^{-1} dell'elemento più debole viene aggiunto alla somma dei valori FS^{-1} di altri elementi, questo gioca un ruolo più importante. Infatti, il vantaggio della seguente formulazione è che gli elementi con valori più bassi di FS contribuiscono maggiormente alla funzione obiettivo, permettendo all'ottimizzazione di concentrarsi sull'aumento del FS degli elementi più critici.

Il loro obiettivo è trovare l'orientamento di costruzione, in cui l'elemento più debole della parte abbia la resistenza maggiore. La relazione matematica da minimizzare è la seguente e può essere utilizzata per qualsiasi processo AM:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^6 \left(\frac{1}{FS_i^k(x)} \right)^k \right]$$

Equazione 7: relazione matematica tra resistenza e orientamento di costruzione (Darvishi et al., 2023).

Questa formula è ripresa dal lavoro degli autori Ulu et al., (2015), i quali spiegano che per ogni elemento “i” viene calcolato un tensore di sollecitazione costituito da sei elementi che comprendono termini relativi alla tensione normale e di taglio. Per ciascuna componente di sollecitazione vengono calcolati sei valori FS indipendenti e per l'elemento “i” viene scelto quello che presenta il valore minimo. Quindi FS_i è un vettore costituito da sei elementi dati dai valori dei fattori di sicurezza per l'i-esimo elemento, x è il vettore delle variabili di progettazione che comprende gli angoli di rotazione attorno agli assi ed n è il numero di elementi considerati nell'analisi.

Il modello utilizzato genera un campione di orientamenti casuali, con una copertura completa di ciascun intervallo di variabili, e i risultati sono selezionati

in base all'importanza associata ad ogni obiettivo. Le funzioni obiettivo menzionate vengono stimate attraverso un meta-modello per rendere il calcolo più semplice e preciso.

I modelli di ottimizzazione dell'orientamento trattati nel prosieguo del lavoro suddividono la ricerca dell'orientamento ottimale in due attività principali: determinazione di un set di orientamenti candidati e selezione dell'orientamento ottimale tra quelli presenti nel set, attraverso l'ottimizzazione di più funzioni obiettivo (Zhang et al., 2016; Cheng et al., 1995; Zhang et al., 2017).

Gli autori Zhang et al. (2016) a causa della bassa efficienza degli studi sugli orientamenti delle costruzioni, tentano di utilizzare le caratteristiche AM e la conoscenza dei processi AM per risolvere il problema dell'orientamento. La soluzione proposta è applicata al processo SLS. L'idea di base nasce da Padhye et al. (2011) che avevano scoperto che un possibile modo per raggiungere l'orientamento ottimale senza procedere con metodi di ottimizzazione è analizzare le caratteristiche di un oggetto solido. Pertanto, il lavoro di Zhang et al. (2016) mira a generare gli orientamenti alternativi della parte in modo efficiente, in relazione alle *AM feature* o caratteristiche geometriche di una parte, estraendo le informazioni geometriche dei componenti da produrre. Dopo aver identificato come attributi decisionali da minimizzare la rugosità superficiale, il tempo di costruzione ed il costo di costruzione, attraverso un processo di *decision making* multi-attributo, viene determinato l'orientamento ottimale.

Le caratteristiche AM proposte sono semplici e definite in relazione all'impatto che l'orientamento ha sulla qualità della parte. Si considerano caratteristiche di tipo cilindrico, piano e conico e si utilizzano delle regole di generazione degli orientamenti.

Nel caso delle caratteristiche cilindriche, per minimizzare il difetto dovuto all'effetto a gradino, gli orientamenti dovrebbero essere impostati in modo che risultino verticali rispetto all'asse della superficie cilindrica; per le caratteristiche piane, l'orientamento dovrebbe essere parallelo o verticale rispetto alla forma

planare; per quelle coniche vengono generati più orientamenti sia in direzione verticale del piano, sia in direzione perpendicolare rispetto alla superficie conica.

Per chiarire la procedura, in Figura 20, è riportato un esempio di una parte con due caratteristiche, una planare e una cilindrica.

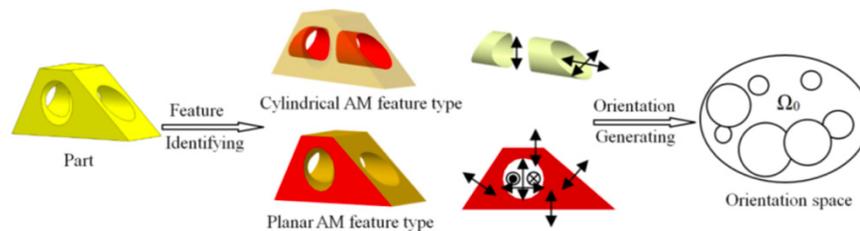


Figura 20: procedimento di formazione dello spazio finito di orientamenti alternativi originali (Zhang et al., 2016).

Secondo le regole di generazione è possibile generare due set di orientamenti alternativi che creano lo spazio degli orientamenti. Inoltre, è possibile prevedere che caratteristiche AM parallele o simmetriche possano generare orientamenti duplicati e per questo motivo lo spazio degli orientamenti necessita un perfezionamento, prima di identificare il set di orientamenti candidati. Per determinare l'orientamento ottimale, una volta identificati gli orientamenti candidati, viene aggiunto, agli attributi del processo di *decision making* indicati in precedenza, un fattore chiamato *Favorableness* (favoreggiamento della caratteristica AM). Per chiarire questo concetto si parte da una definizione, si considera una caratteristica della parte come “positiva”, se un dato orientamento si trova all'interno del set di orientamenti alternativi generati dalla specifica caratteristica AM, altrimenti è considerata “negativa”. Assumendo che tutte le superfici della parte siano identificate come caratteristiche AM, di seguito è riportato un esempio (Figura 21) per un dato orientamento di una parte composta da sei caratteristiche planari e due cilindriche:

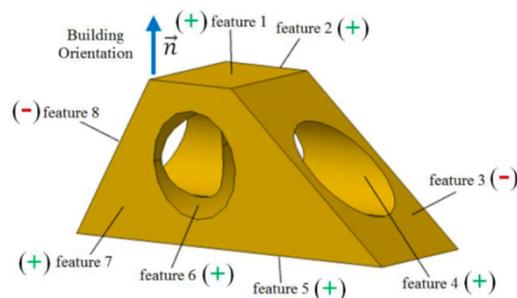


Figura 21: caratteristiche AM positive e negative per un dato orientamento (Zhang et al., 2016).

L'esempio evidenzia che, in accordo con le regole di generazione, le caratteristiche AM 1, 2, 4, 5, 6 e 7, essendo positive hanno un orientamento che rientra nel loro insieme di orientamenti alternativi. Al contrario, le caratteristiche 3 e 8 non sono posizionate in un orientamento presente nel loro set di orientamenti alternativi, ciò significa che con tale orientamento non può essere garantita la qualità superficiale. Per questo motivo sono considerate caratteristiche negative.

Il valore *Favorableness* (F) è dato dalla formula:

$$F = e^{\left[\frac{i-j}{i+j}\right]}$$

Equazione 8: formula per il favoreggiamento (F) (Zhang et al., 2016)

in cui i e j denotano rispettivamente il numero di caratteristiche positive e negative. Risulta evidente che maggiore è il valore di F, migliore è la qualità della parte.

Se un dato orientamento presenta molte caratteristiche positive, allora si ritiene che possa garantire una buona qualità di produzione, in quanto le caratteristiche identificate sono solitamente aree critiche.

Gli autori Cheng et al. (1995) determinano l'orientamento ottimale per una parte costruita mediante il processo SLA. Propongono un approccio considerando l'accuratezza dimensionale e il tempo di costruzione come funzioni obiettivo da ottimizzare simultaneamente. L'accuratezza dimensionale è stimata utilizzando diversi fattori di peso in base ai tipi di superfici geometriche. Tali fattori sono determinati prendendo in considerazione varie fonti di errori di fabbricazione (e.g.

distorsioni, effetto a gradino, polimerizzazione eccessiva). Il tempo di costruzione si considera direttamente proporzionale al numero di sezioni e dipende dalle altezze dei supporti. Il numero di sezioni è dipendente dallo spessore di taglio, determinato dalla precisione superficiale richiesta, dallo spessore dello strato e dai vincoli del processo. La minimizzazione del tempo di costruzione si ottiene riducendo il numero delle sezioni. Gli autori hanno anche introdotto l'*adaptive slicing* o "affettamento adattivo", con il quale si intende che lo spessore non è uguale per strati diversi e si differenzia dallo *uniform slicing* in cui lo spessore degli strati è sempre lo stesso. La procedura dell'*adaptive slicing* prevede come criterio, per determinare lo spessore di ogni strato, una specifica altezza della cuspidi. Questo metodo è utilizzato per trovare un compromesso tra tempo di costruzione e finitura superficiale. Per selezionare una lista di orientamenti candidati si minimizza l'accuratezza della parte e successivamente minimizzando il tempo di costruzione si estraggono gli orientamenti ottimali.

Gli autori Zhang et al. (2017) studiano il problema di ottimizzazione dell'orientamento multi-parte, in cui più parti all'interno della camera di costruzione devono essere orientate in modo ottimale simultaneamente. Il problema è definito come un tipo di problema di ottimizzazione multi-obiettivo con un unico vincolo relativo alla dimensione della camera di costruzione, in cui si assume che tutte le parti di un dato gruppo devono essere posizionate e la loro rotazione non deve causare interferenze tra le parti o con i confini della camera di costruzione. Viene proposta quindi una soluzione al problema per il processo SLA considerando la minimizzazione del tempo di costruzione, dei costi e la massimizzazione, allo stesso tempo, della qualità durante la produzione.

In primo luogo, per l'ottimizzazione multi-parte si generano un insieme di orientamenti alternativi candidati che garantiscono la qualità della produzione per ogni parte all'interno del gruppo, senza la possibilità di ruotare liberamente le parti perché potrebbe portare alla generazione di orientamenti invalidi. La seconda attività mira, invece, a identificare la combinazione ottimale, minimizzando il tempo di costruzione totale e altri obiettivi globali, con i quali si intendono quegli

obiettivi che si riferiscono all'ottimizzazione della combinazione degli orientamenti delle parti.

Come Zhang et al. (2016) per la generazione di una serie di orientamenti alternativi per ciascuna parte, gli autori utilizzano un metodo basato sulle caratteristiche AM e con un modello decisionale multi-attributo si selezionano quelli candidati, all'interno dei set. La classificazione degli orientamenti alternativi avviene identificando come attributi la rugosità superficiale, il volume di supporto, l'altezza di costruzione, il tempo di costruzione, il costo e l'area di proiezione sul piano x-y, che vengono presi in considerazione simultaneamente ed equamente.

Per la determinazione della combinazione di orientamenti di costruzione ottimali le funzioni obiettivo minimizzano l'altezza massima di costruzione, la differenza di altezze tra le parti all'interno della camera di costruzione (che determina il numero di parti che possono essere fabbricate simultaneamente in ogni strato), l'area di proiezione media sul fondo della vasca (che determina il volume di supporto del fondo e l'area media di esposizione della sezione trasversale), il volume medio della struttura di supporto e la rugosità superficiale media.

I problemi di ottimizzazione dell'orientamento proposti dai seguenti autori, invece, indagano lo spazio di tutte le possibili soluzioni, senza partire da una lista di orientamenti candidati.

Pandey et al. (2004) hanno sviluppato un sistema per determinare l'orientamento ottimale di deposizione della parte prodotta attraverso il processo FDM, considerando come funzioni obiettivo la rugosità superficiale media della parte e il tempo di costruzione. Sul modello CAD tessellato è stato effettuato un affettamento adattivo, che utilizza un valore limite della rugosità superficiale come criterio, invece dell'altezza della cuspidi, utilizzata da Cheng et al. (1995). In accordo con il modello proposto da Pandey et al. (2003), la Ra in qualsiasi punto della superficie di una parte FDM è funzione dello spessore della sezione (t) e dell'orientamento della costruzione θ che corrisponde all'angolo tra l'asse verticale e la tangente alla superficie (Figura 22).

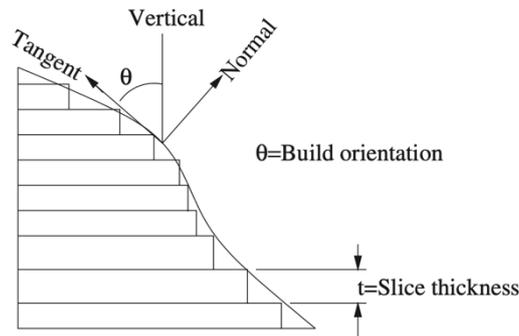


Figura 22: Effetto a gradino e definizione dell'orientamento di costruzione (Pandey et al., 2004).

Il modello per stimare la rugosità superficiale considera che nell'intervallo di orientamento $70^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ la variazione di Ra è considerata lineare ed è data da:

$$Ra(\mu m) = \frac{1}{20} [90Ra_{70^\circ} - 70Ra_{90^\circ} + \theta(Ra_{90^\circ} - Ra_{70^\circ})]$$

Equazione 9: Formula per la rugosità superficiale per l'intervallo di orientamento considerato (Pandey et al., 2004).

in cui, Ra_{70° e Ra_{90° sono rispettivamente il valore della rugosità superficiale per un orientamento di 70° e 90° . Il suo valore medio si calcola come nel lavoro di Padhye et al. (2011).

La presenza della struttura di supporto è considerata pesando il valore di Ra , poiché aderendo alla parte, dopo la sua rimozione provoca un aumento di tale valore.

Il tempo di costruzione totale della parte è stimato (Equazione 10) in relazione al numero di sezioni adattive:

$$T_{build} = \sum_{i=1}^{N_{layer}} t_{layer_i} + N_{layer} * t_{move} + \frac{N_{layer}}{k} * t_{wipe}$$

Equazione 10: Formula per il tempo di costruzione (Pandey et al., 2004).

in cui, N_{layer} è il numero di strati indipendentemente dallo schema di *slicing* effettuato. Il termine t_{layer_i} corrisponde al tempo totale per creare un singolo

strato ed è dato dalla somma di tre termini: tempo necessario per stendere il materiale della parte per l'*i*-esimo strato; tempo per il materiale di supporto dell'*i*-esimo strato; tempo non produttivo necessario alla movimentazione dell'ugello. Il termine t_{move} indica il tempo necessario per spostare la piattaforma di costruzione ad una certa altezza z e t_{wipe} indica il tempo necessario per pulire la punta dello strato dopo che un certo numero di strati k sono stati depositati.

L'effetto della struttura di supporto sul tempo di costruzione è considerato pesando il numero di sezioni rispetto al rapporto tra la frazione dell'area supportata e l'area totale:

$$T = N_l(1 + Xd_s)$$

Equazione 11: Effetto della struttura di supporto sul tempo di costruzione (Pandey et al., 2004)

in cui N_l è il numero delle sezioni adattive, d_s è la densità del materiale di supporto ed X è il rapporto tra le superfici triangolari supportate dal modello CAD tessellato e la superficie totale della parte.

Il problema dell'ottimizzazione è risolto minimizzando le due funzioni obiettivo.

Successivamente il problema è stato affrontato da Thrimurthulu et al. (2004) convertendo le due funzioni, in un problema di ottimizzazione a singolo obiettivo, attraverso la minimizzazione della loro somma pesata.

Pandey et al. (2004) e Thrimurtullu et al. (2004) utilizzano come stima della qualità superficiale della parte, invece dell'altezza ponderata della cuspide (Alexander et al., 1998), il valore Ra , che è considerato una stima più appropriata in quanto, sia l'altezza ponderata della cuspide sia l'errore volumetrico assumono implicitamente che i profili dei bordi di costruzione siano rettangolari, tuttavia, nel processo FDM tali profili sono parabolici (Pandey et al., 2007).

Inoltre, la caratteristica saliente del modello presentato dagli autori, è che l'orientamento ottimo viene scelto tra tutti gli orientamenti possibili, senza partire da una lista di orientamenti preselezionati. Difatti, la selezione di orientamenti

candidati per la deposizione della parte, oltre ad essere una limitazione, diventa impossibile nel caso di geometrie completamente libere (Pandey et al., 2007).

3.2. Ottimizzazione dell'orientamento e della disposizione delle parti in macchina

L'ottimizzazione del layout verrà trattata, nei seguenti paragrafi, focalizzando l'attenzione sulla risoluzione di due categorie di problemi riscontrate negli articoli esaminati: quelli che limitano il problema al *packing* bidimensionale e quelli che lo ampliano al *packing* tridimensionale.

In accordo con gli autori Zhang et al. (2015), la pianificazione del layout dello spazio di lavoro ha come funzioni obiettivo principali l'ottimizzazione della compattezza del nesting per ridurre i tempi e i costi totali di costruzione, e l'ottimizzazione della combinazione di orientamenti di costruzione delle parti che mira a garantire la qualità di produzione.

Di seguito è riportata la classificazione degli articoli analizzati nel presente paragrafo. La Tabella 2 presenta sulle righe i nomi degli autori e sulle colonne: il processo AM trattato, il tipo di nesting considerato (seriale o parallelo), il tipo di *packing* (bidimensionale o tridimensionale), le funzioni obiettivo del modello, le funzioni obiettivo associate all'orientamento, la rappresentazione della parte, le rotazioni permesse e le regole di posizionamento utilizzate. Le sigle presenti nella Tabella 2 verranno spiegate in seguito nel testo.

Articoli	Processo AM	Nesting	Packing	Funzioni Obiettivo	F.O. Orientamento	Rappresentazione parte	Rotazione	Regole Posizionamento
Wodziak et al. (1994)	SLA	Seriale	2D	Max compattezza; min tempo di costruzione	/	Riquadro di delimitazione	90° assi x e y	/

Canellidis et al. (2006)	SLA	Parallelo	2D	Ottimizzare layout	Min aree con effetto a gradino; min punti appoggio supporti; min altezza costruzione	Riquadro di delimitazione	90° assi x e y	LB-DB
Canellidis et al. (2013)	SLA	Parallelo	2D	Max compattezza	/	Poligono	/	LB-DB e NFP
Zhang et al. (2015)	FDM	Parallelo	2D	Ottimizzare layout	Min Ra; Min altezza costruzione; min volume di supporto	Poligono	Asse di orientamento (3 gdl)	/
Zhang et al. (2018b)	FDM	Parallelo	2D	Ottimizzare layout; min costi	Min Ra; min volume di supporto	Poligono	Qualsiasi asse (5 gdl)	/
Yang et al. (2023)	AM	Parallelo	2D	Ottimizzare layout; min tempi/costi	Min volume supporti; max accuratezza	Poligono	/	CSM
Griffiths et al. (2019)	SLM	Parallelo	2D	Min costi; ottimizzare layout	Min altezza costruzione; min volume di supporto	Poligono	Asse verticale	/
Nyaluke et al. (1996)	SLS	Seriale	3D	Max compattezza	Max qualità; min tempo costruzione	Riquadro di delimitazione	/	/
Hur et al. (2001)	SLS	Seriale	3D	Ottimizzare layout	Min altezza costruzione; min rapporto xy sezione trasversale	Struttura voxel	Assi x e y	BL
Yang et al. (2023)	SLS	Seriale	3D	Max compattezza; min costi	Max qualità	Struttura voxel	Qualsiasi asse	VCCCS

Yau et al. (2021)	SLS	Seriale	3D	Max compattezza; min costi	Min altezza costruzione	Volume di delimitazione	Qualsiasi asse	/
----------------------	-----	---------	----	----------------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------	---

Tabella 2: classificazione articoli incentrati sull'ottimizzazione dell'orientamento e del packing.

3.2.1. Problemi bidimensionali

In questo paragrafo si analizzano problemi di nesting che tengono in considerazione sia l'orientamento di costruzione sia il *packing 2D*. Di seguito lo studio è limitato a problemi bidimensionali, a causa dei vincoli dei processi AM considerati.

Esistono due strategie di annidamento, come mostrato in Figura 23: annidamento seriale e annidamento parallelo.

Nel primo caso (Figura 23(a)) i profili degli oggetti vengono posizionati uno per volta sulla piattaforma e non è consentita la loro collisione o sovrapposizione. Nel caso di annidamento parallelo (Figura 23(b)), invece, i profili degli oggetti vengono posizionati simultaneamente ed è consentita la sovrapposizione, il che offre la possibilità di poter annidare una parte più piccola nella cavità aperta o nel foro interno di un oggetto più grande. Va sottolineato che nei problemi di posizionamento bidimensionale, a causa del vincolo legato alle strutture di supporto, le parti non possono essere posizionate sotto le sporgenze di altre parti e ciò porta ad uno spreco dello spazio di costruzione (Zhang et al., 2015).

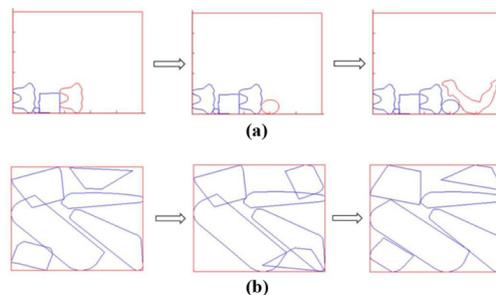


Figura 23: annidamento seriale (a) e annidamento parallelo (b) (Zhang et al., 2018(b)).

I primi a trattare il problema del posizionamento di parti su una macchina SLA sono stati gli autori Wodziak et al. (1994) che affrontano il problema utilizzando un annidamento seriale, in cui le parti vengono posizionate una alla volta nella camera di costruzione. La forma delle parti è rappresentata dai riquadri di delimitazione, i quali includono fattori di riempimento per facilitare la separazione delle parti dopo la loro creazione. Le funzioni obiettivo sono la massimizzazione della compattezza e la minimizzazione del tempo di costruzione, che si traducono nel massimizzare il rapporto tra le parti posizionate e il totale delle parti, e la percentuale del volume della vasca occupata. Le parti sono orientate verticalmente e possono ruotare sulla piattaforma di lavoro, attorno all'asse z solo di 90 gradi, cioè con un incremento fisso. I limiti della loro trattazione sono dati dall'ingombro derivante dall'utilizzo dei riquadri di delimitazione per sostituire la forma delle parti, che portano ad un notevole spreco dello spazio, anche se sono utili per facilitare il rilevamento delle collisioni. Il metodo 2D proposto dagli autori è utilizzato anche per risolvere problemi della disposizione in macchina tridimensionali nel processo SLA, cosa non esperibile a causa della presenza del supporto, fondamentale per tale processo. Inoltre, la qualità di produzione delle parti non può essere garantita dal metodo proposto, in quanto non viene affrontato l'ottimizzazione dell'orientamento di costruzione. (come sottolineato dagli autori Zhang et al., 2018(b)).

Gli autori Canellidis et al. (2006) nonostante la consapevolezza che l'annidamento seriale, pur non raggiungendo soluzioni adatte a casi reali per il processo SLA, possa ridurre il tempo di calcolo e raggiungere soluzioni accettabili, propongono un metodo di annidamento parallelo, in cui tutte le parti sono organizzate simultaneamente sulla piattaforma di costruzione. Superano i limiti del modello precedentemente descritto, considerando una fase di ottimizzazione dell'orientamento delle parti, prima di affrontare il problema di *packing*.

In accordo con Wäscher et al. (2007), il problema di *packing* proposto è un problema di *bin-packing 2D*. L'obiettivo del loro lavoro consiste nell'ottimizzazione dell'orientamento di costruzione delle parti, considerando

come fattori influenti la qualità superficiale, le strutture di supporto richieste e il tempo di costruzione, e nella massimizzazione della compattezza del nesting.

Per la fase di ottimizzazione dell'orientamento si procede con l'ottimizzazione della qualità superficiale, che avviene orientando la parte in modo che si massimizzi l'area delle superfici orizzontali e verticali che minimizzano l'effetto a gradino. Per quanto riguarda la struttura di supporto si adotta l'idea che più piccola è l'area totale delle superfici poligonali con vettori normali rivolti verso il basso, minore è la loro necessità. Come gli autori Lan et al. (1997), si procede con la minimizzazione dei punti che necessitano un supporto. Tale considerazione si differenzia da quanto affermato dagli autori Zhang et al. (2017) e Zhang et al. (2016) in quanto non conviene utilizzare il volume della struttura di supporto come criterio poiché l'operatore ha la possibilità di scegliere tra diversi tipi di supporti.

Essendo l'ottimizzazione dell'orientamento studiata insieme al problema di *bin-packing 2D*, per ottimizzare il tempo risulta necessario trovare una soluzione di *packing* in cui più parti vengono fabbricate contemporaneamente. Per questo motivo si esamina l'area di proiezione per assicurarsi che ciascuna parte occupi il minimo spazio possibile sulla piattaforma di costruzione, criterio utilizzato solo in casi in cui il numero di parti da disporre è molto elevato e non si è sicuri che tutte possano essere fabbricate contemporaneamente (Zhang et al., 2017). Gli oggetti da fabbricare sono rappresentati attraverso la loro proiezione sul piano orizzontale, definendo il rettangolo di delimitazione minimo, che racchiude la proiezione della parte. La minimizzazione dei rettangoli di delimitazione è un criterio che risulta irrilevante nel momento in cui è chiaro che le parti presenti possano essere fabbricate in un unico lavoro, in tal caso si dà priorità alla minimizzazione del numero di strati per minimizzare il tempo di costruzione. Come nel lavoro di Wodziak et al. (1994), anche qui è permessa una rotazione delle parti attorno agli assi x e y , di 90 gradi.

Quando si affrontano problemi di *packing* una delle decisioni da prendere riguarda la politica di posizionamento da usare per massimizzarne la compattezza sulla piattaforma di costruzione.

Una delle regole di posizionamento più diffuse è la regola *left – border* o LB, che tenta di ridurre al minimo la lunghezza totale della costruzione, posizionando il rettangolo, corrispondente a ciascuna parte, il più a sinistra possibile e privilegiando posizioni vicine all'estremità inferiore del piano di lavoro. Lo svantaggio di questo algoritmo è che esistono gruppi di poligoni per cui non è possibile generare un *packing* ottimale.

Gli autori Canellidis et al. (2006) ne propongono una versione migliorata, chiamata *left border – down border* o LB-DB, in cui con LB si intende la linea normale al lato inferiore della piattaforma, adiacente al lato più a destra dell'ultimo rettangolo posizionato sulla piattaforma di fabbricazione. Corrispondentemente DB è la linea più bassa, in direzione *y*, parallela all'asse *x* della piattaforma che impedisce la sovrapposizione del rettangolo da posizionare con i rettangoli già presenti sulla piattaforma. I due bordi, così, definiscono una sotto-area sulla piattaforma di fabbricazione, dove viene posizionato il "nuovo" rettangolo.

Il metodo proposto dagli autori, utilizzando i riquadri di delimitazione per la rappresentazione della forma degli oggetti, presenta gli stessi limiti del lavoro di (Wodziak et al., 1994), fatta eccezione per l'ottimizzazione dell'orientamento di costruzione.

Più recentemente, sono stati proposti dagli stessi autori dei miglioramenti all'approccio appena descritto (Canellidis et al., 2013). In particolare, per la rappresentazione della parte, utilizzano il profilo esterno della proiezione della forma reale di una parte, sulla piattaforma di costruzione, il quale viene approssimato da un poligono. L'unica funzione obiettivo presa in esame è la massimizzazione dell'area della piattaforma che è coperta da poligoni non sovrapposti. Per assicurarne la realizzazione la regola di posizionamento adottata è data da una combinazione di LB-DB e *No-Fit-Polygon* (NFP). Quest'ultimo metodo considera l'insieme delle posizioni ammissibili che un poligono può assumere rispetto ad un altro, in modo tale che non si sovrappongano (Dean et al., 2006). Rispetto al metodo LB-DB, che dispone gli oggetti sulla piattaforma a partire dall'angolo in basso a sinistra, questa politica di posizionamento posiziona

gli oggetti seguendo uno schema dal centro della piattaforma verso la sua periferia. I problemi legati al metodo sono dati da limitazioni nelle rotazioni delle parti e da eccessivi tempi di calcolo, che aumentano drasticamente quando il numero di parti aumenta. Il costo legato al tempo di utilizzo di questo algoritmo è troppo elevato, non adatto ad applicazioni pratiche (come affermato da Zhang et al., 2015).

Gli autori Zhang et al. (2015) migliorano la compattezza del nesting proponendo un annidamento parallelo per risolvere il problema del posizionamento di parti a strato singolo, e garantiscono la qualità nella produzione attraverso un metodo di ottimizzazione dell'orientamento basato sulle funzionalità AM, già incontrato nei lavori di Zhang et al. (2016) e Zhang et al. (2017). Dopo aver individuato le caratteristiche della parte, si generano una serie di orientamenti alternativi usando come regole di selezione la rugosità superficiale, il volume della struttura di supporto e l'altezza della costruzione. Per identificare la combinazione ottimale di orientamenti, che minimizza i tempi e costi di costruzione globali, si considera la minimizzazione della massima altezza della costruzione, del volume medio di supporto e della rugosità superficiale media.

Per semplificare il problema i profili di proiezione delle parti orientate sulla piattaforma di costruzione vengono utilizzati come modelli tridimensionali di annidamento, in modo da convertire il problema del posizionamento delle parti in un classico problema di annidamento bidimensionale.

Nei profili di proiezione reali approssimati da poligoni (come Canellidis et al., 2013), sono inclusi circuiti interni ed esterni, in modo tale da poter annidare le parti più piccole nelle cavità di parti più grandi, senza collisioni e ciò porta ad un risparmio dello spazio sulla piattaforma di costruzione.

Una volta definiti gli orientamenti delle parti, questi vengono considerati fissi, permettendo solo la traslazione sul piano di costruzione e la rotazione attorno all'orientamento di costruzione, al fine di trovare l'annidamento adatto. Questa assunzione riduce lo spazio delle soluzioni del problema in quanto i modelli

hanno solo 3 gradi di libertà su 5 complessivi (non si considera la direzione negativa z), rendendo l'ottimo globale sfuggente.

Uno dei vantaggi nell'utilizzo dei profili di proiezione è quello di evitare il posizionamento delle parti sotto le sporgenze di altre parti. D'altro canto, ciò potrebbe causare uno spreco di spazio quando le sporgenze hanno un angolo rispetto alla direzione di costruzione inferiore a 30 gradi, dove di solito non è necessaria la presenza della struttura di supporto (Figura 24).

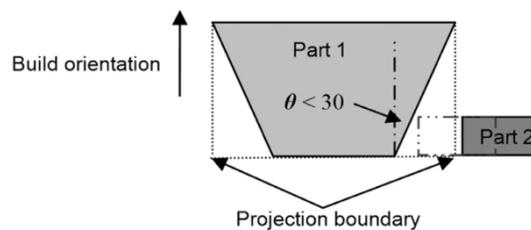


Figura 24: spreco di spazio causato dall'utilizzo della proiezione della parte (Zhang et al., 2015).

Inoltre, tale rappresentazione delle parti permette un significativo risparmio di costi di calcolo, in quanto risulta più veloce traslare e ruotare i poligoni bidimensionali piuttosto che utilizzare modelli tridimensionali nel processo di nesting. Quando si utilizzano i poligoni per rappresentare le proiezioni di una parte potrebbero verificarsi delle deviazioni. Per evitare il contatto o collisioni tra le parti dopo il loro annidamento il ciclo esterno del poligono viene espanso leggermente, mentre quello interno viene ridotto.

Essendo la massimizzazione della compattezza l'obiettivo della fase di *packing*, il modello da loro descritto è adatto a quei processi AM che non hanno vincoli di diffusione del calore, come FDM e SLA.

Gli autori Zhang et al. (2018(b)) introducono un nuovo schema di nesting parallelo per superare le carenze dei lavori precedentemente descritti, in cui i problemi di *single-layer-part* in AM vengono convertiti in tradizionali problemi di nesting 2D, perdendo la possibilità di poter descrivere le caratteristiche del problema reale. Infatti, tali metodi limitano le libertà di rotazione dei modelli tridimensionali. Il metodo proposto ha come obiettivi l'ottimizzazione della compattezza del nesting e la determinazione dell'orientamento di costruzione

ottimale per ciascuna parte, cercando di minimizzare i costi. L'originalità del modello proposto risiede nella rappresentazione delle parti mediante profili di proiezione modificabili e approssimabili a poligoni bidimensionali. In questo modo è possibile considerare 5 gradi di libertà di una parte 3D, calcolando i costi di layout per un nesting 2D grazie all'uso dei profili di proiezione bidimensionali, senza la necessità di procedure di rilevamento delle collisioni 3D.

Il problema di ottimizzazione è descritto per un processo FDM in cui si vuole minimizzare l'area di base del gruppo di parti sulla piattaforma di costruzione, garantendo la qualità della produzione. Poiché la macchina FDM presenta un ugello con due gradi di libertà di traslazione sul piano x-y, si ricerca un confine rettangolare vicino alla posizione di origine dell'ugello, per posizionare le parti senza interferenze.

In una prima fase si esegue l'ottimizzazione dell'orientamento basato sulle funzionalità AM (come gli autori Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2017; Zhang et al., 2015) considerando come criteri di valutazione la rugosità superficiale e il volume della struttura di supporto. Si identifica per ciascuna parte un set finito di orientamenti alternativi con simile qualità di produzione che costituisce l'orientamento pratico della parte. Per ogni orientamento pratico di costruzione della parte viene generato un profilo di proiezione rappresentato da un poligono bidimensionale, che viene leggermente ingrandito, rispetto alla sua dimensione originale, per evitare interferenze tra le parti, causate da errori nell'accuratezza di stampa. La ricerca del layout ottimale identifica quattro parametri che descrivono la posizione e l'orientamento della parte: i tre parametri di posizione includono due traslazioni (asse x e y) e una rotazione attorno alla direzione di costruzione (asse z), variabili continue ma limitate allo spazio delle soluzioni, mentre l'ultimo parametro, l'indice di orientamento della costruzione (che include le libere rotazioni attorno agli assi x e y), ha uno spazio delle soluzioni finito e discreto. Quindi, quando una parte modifica il proprio profilo di proiezione significa che sta eseguendo implicitamente una rotazione, che modifica l'attuale orientamento di costruzione in un altro tra quelli alternativi. Pertanto, l'uso di profili di proiezione modificabili permette rotazioni dei modelli 3D attorno a qualsiasi asse,

tranne all'asse della direzione di costruzione, poiché, come già sottolineato in precedenza, rotazioni attorno a tale asse non modificano il profilo di proiezione sulla piattaforma di costruzione.

A causa dell'effetto combinato delle variabili di orientamento delle costruzioni e di rotazione 2D, la maggior parte dei metodi di nesting presentano i problemi di basso utilizzo della piattaforma di lavoro e di tempi molto lunghi. Gli autori Yang et al. (2023) propongono un metodo generale per l'ottimizzazione del layout bidimensionale con l'obiettivo di ridurre tempi e costi. Il problema di nesting 2D studiato nel loro lavoro è un problema di ottimizzazione che prende in considerazione diversi fattori di impatto, i quali fanno riferimento a tre problemi principali: come stampare più parti in un singolo processo; come migliorare l'efficienza di stampa; come assicurare i requisiti di accuratezza e ridurre l'utilizzo del materiale di supporto.

Il principale elemento considerato è l'orientamento di costruzione delle parti (che, come già detto, determina direttamente l'altezza di costruzione e l'area di proiezione delle parti, e influenza il volume dei supporti e la rugosità superficiale). Al fine di valutare l'influenza esercitata dall'orientamento sul problema di ottimizzazione, si considerano i seguenti fattori:

- Percentuale di parti non stampate: determinata dalla dimensione e dall'area della proiezione di ogni parte nel proprio orientamento di costruzione e limitata dalla dimensione della piattaforma di costruzione.

$$N_p = \frac{N_{cannot}}{N_{all}} * 100\%$$

Equazione 12: formula per la percentuale di parti non stampate (Yang et al., 2023).

In cui N_{cannot} è il numero delle parti che non possono essere posizionate sul layout e N_{all} è il numero di parti che devono essere stampate.

- Rapporto di scarto dell'area della piattaforma per parte: fattore molto rilevante per i problemi di *bin – packing 2D*, poiché una proiezione con un'area troppo grande potrebbe diminuire il numero di parti stampate, si

usa questo fattore per bilanciare l'impatto dell'area di proiezione e la quantità di parti stampate.

$$W_A = \left(1 - \frac{A_{pa}}{A_p}\right) / N_{can}$$

Equazione 13: formula per il rapporto di scarto dell'area della piattaforma per parte (Yang et al., 2023).

In cui N_{can} è il numero di parti che possono essere posizionate nel layout, A_{pa} è la somma delle aree di proiezione di tutte le parti incluse nel layout e A_p è l'area di stampa della piattaforma.

- Differenza di altezze nel layout: si usa la deviazione standard dell'altezza delle parti per rappresentare la differenza di altezze all'interno del layout.

$$H_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{can}} (H_i - \bar{H})^2}{N_{can} - 1}}$$

Equazione 14: formula per la differenza di altezze nel layout (Yang et al., 2023).

In cui H_i è l'altezza dell' i -esima parte, nel proprio orientamento di costruzione, \bar{H} è la media delle altezze di costruzione di tutte le parti del layout.

- Supporti medi delle parti: il volume dei supporti viene calcolato come funzione dell'altezza media e delle superfici che necessitano di un supporto.

$$AS = \frac{\sum_{i=1}^{N_{can}} ASV_i}{N_{can}}$$

Equazione 15: formula per i supporti medi delle parti (Yang et al. (2023)).

In cui ASV_i è il volume totale delle superfici che richiedono un supporto per l' i -esima parte.

- Accuratezza media delle parti: si utilizza il calcolo dell'altezza della cuspidale per minimizzare l'errore volumetrico, causato dall'effetto a gradino delle parti.

$$AA = \frac{\sum_{i=1}^{N_{can}} \sum_{j=1}^{N_{tA_i}} \frac{d^2 A_{ij} |n_b * n_{ij}|}{2}}{N_{can}}$$

Equazione 16: formula per l'accuratezza media delle parti (Yang et al., 2023).

In cui N_{tA_i} è il numero di tutte le superfici dell' i -esima parte, d è lo spessore dello strato, n_b è il vettore normale alla direzione di costruzione, n_{ij} è il vettore normale alla j -esima superficie triangolare, dell' i -esima parte e A_{ij} è l'area della j -esima superficie triangolare, dell' i -esima parte.

La funzione obiettivo del metodo proposto è una funzione ponderata dei fattori di impatto appena considerati, i quali vengono ottimizzati simultaneamente al fine di trovare il layout ottimale.

$$F = w1 * N_p + w2 * W_A + w3 * H_D + w4 * AS + w5 * AA + w6 * O$$

Equazione 17: funzione obiettivo pesata del modello (Yang et al., 2023).

$$0 \leq w1 \leq 1, \sum_{i=1}^6 w_i = 1$$

In cui il termine O corrisponde ad altri fattori che non vengono considerati in questa trattazione.

Il modello proposto può essere applicato a qualunque processo AM, con qualunque tipo di supporto richiesto.

Per aumentare la compattezza delle parti sulla piattaforma di lavoro e diminuire lo spazio inutilizzato, viene inoltre, presentato un algoritmo CSM (*Contour similarity matching*), per valutare le similitudini tra i contorni delle parti, il quale cerca di aumentare il tasso di utilizzo dei fori all'interno delle parti. L'idea generale è che quando vengono posizionate le parti orientate sull'area di stampa si

cerca di far combaciare i contorni che sono simili tra di loro e quando ci sono più posizioni che possono essere selezionate si cercano le posizioni candidate più adatte alla parte in questione. Si cerca di far corrispondere il contorno di proiezione della parte al contorno dell'area interna non occupata, di un'altra parte. Inizialmente, il contorno di proiezione di una parte in una determinata direzione di costruzione è rappresentato da un poligono. Per il posizionamento, la proiezione del contorno esterno viene trasformata in una rappresentazione pixel, in modo da standardizzare i cambiamenti del contorno. A questo punto le informazioni sul contorno con somiglianza geometrica possono essere rilevate da codici di Freeman a catena.

Un ulteriore metodo, proposto dagli autori Griffiths et al. (2019) si basa sulla minimizzazione del costo di costruzione, studiando il problema combinato di ottimizzazione dell'orientamento e di *bin-packing 2D* per parti create con un processo SLM, al fine di rendere tale processo competitivo rispetto agli altri processi AM (processo che necessita di supporto non solo per dare sostegno alle parti, ma anche perché il materiale aggiuntivo aiuta a dissipare il calore e a ridurre le sollecitazioni termiche all'interno della parte).

Si considera il contesto di una produzione con bassi volumi ma elevata varietà (settore aerospaziale). I parametri secondari sono: l'altezza di costruzione, il volume della struttura di supporto e l'efficienza della disposizione delle parti sulla piattaforma di costruzione. La visione degli autori si focalizza sul fatto che ogni parametro influenzato dall'orientamento di costruzione di una parte, può essere tradotto in un elemento di costo. Per esempio, l'altezza di costruzione ha un'influenza diretta sul tempo e sul costo di costruzione, il volume della struttura di supporto può essere trattato come costo del materiale di scarto, invece, una scarsa qualità e precisione dimensionale possono essere considerate come un costo aggiuntivo di post-trattamento. Per ogni geometria considerata si seleziona un orientamento di costruzione favorevole, il quale si proietta sul piano orizzontale creando poligoni bidimensionali, che rappresentano le parti durante il processo di annidamento. La bontà di ogni orientamento viene calcolata in funzione dell'altezza della geometria, del volume della struttura di supporto e

dell'area di proiezione risultante. I vincoli considerati in questa fase sono dati dall'altezza delle geometrie che non può superare l'altezza della camera di costruzione e dall'area di proiezione che non può eccedere l'area della piattaforma di stampa. Considerando più macchine SLM parallele identiche, il problema del *bin-packing 2D* viene risolto assegnando le parti ad un numero minimo di contenitori identici. Si espandono leggermente i contorni delle proiezioni per evitare che ci possano essere danneggiamenti delle parti durante la fabbricazione. Durante la procedura di *packing* le parti possono ruotare attorno al loro asse verticale, ma non possono mai sovrapporsi. Ogni parte è caratterizzata da un punto di riferimento, che corrisponde all'angolo inferiore sinistro del rettangolo che racchiude la proiezione della parte, che rappresenta il suo orientamento 2D.

Il modello di costo adottato divide il costo di costruzione in due componenti: costi indiretti (e.g., amministrativi, software) e costi diretti che includono tutte le risorse direttamente consumate dal processo (materiale). L'Equazione 18 mostra il costo di costruzione c_i per un contenitore b_i :

$$c_i = C_1 t_i + C_2 \rho \sum_{k=1}^{n_i} (v_k + s_k)$$

Equazione 18: formula per il costo di costruzione (Griffiths et al., 2019).

in cui, C_1 e C_2 sono coefficienti per i costi indiretti e diretti rispettivamente; t_i è il tempo di costruzione del contenitore b_i ; ρ è la densità del materiale; n_i è il numero di parti all'interno di un contenitore. Ogni parte k è caratterizzata dal proprio volume v_k e dal volume della struttura di supporto s_k .

Si utilizza un modello lineare di regressione per il tempo di costruzione, considerato funzione del volume totale di costruzione, del volume totale della struttura di supporto e dell'altezza della costruzione che corrisponde all'altezza della geometria più alta presente all'interno del contenitore. Il tempo di costruzione t_i di un contenitore b_i è stimato come segue:

$$t_i = r_1 + r_2 h_i + r_3 \sum_{k=1}^{n_i} v_k + r_4 \sum_{k=1}^{n_i} s_k$$

Equazione 19: formula per il tempo di costruzione (Griffiths et al., 2019).

in cui r_1 è la costante del modello di regressione; h_i è l'altezza di costruzione del contenitore b_i ; r_2 è un coefficiente relativo ad h_i ; r_3 e r_4 sono rispettivamente i coefficienti relativi al volume totale delle parti e al volume totale del supporto.

Il metodo di ricerca sviluppata dagli autori consiste in sei diverse fasi, in ogni fase si utilizza un algoritmo di ricerca per risolvere il problema dell'orientamento di costruzione e una procedura in due fasi per il problema del *bin-packing 2D*. Quest'ultimo è risolto assegnando le parti ai contenitori e risolvendo il problema della disposizione delle parti per ciascun contenitore. Le fasi esplorate indagano aree diverse dello spazio delle soluzioni, differenziandosi nell'assegnazione dei pezzi ai contenitori e considerando aspetti diversi nella funzione di costo, come l'altezza di costruzione, il volume della struttura di supporto e il numero di contenitori.

3.2.2. Problemi tridimensionali

I problemi di nesting tridimensionali studiati in questo paragrafo sono riferiti al processo SLS, che permette l'annidamento delle parti su più livelli, non necessitando della presenza dei supporti. L'annidamento considerato in questi articoli è riconducibile ad un annidamento seriale, in quanto gli oggetti vengono posizionati nella camera di costruzione in modo sequenziale.

Gli autori Nyaluke et al. (1996) propongono una soluzione ai problemi di posizionamento delle parti su una macchina SLS, in cui le parti devono essere posizionate nel volume di costruzione al fine di ottimizzarne l'utilizzo. Nel loro modello, non essendo possibile orientare una parte in modo che tutte le superfici abbiano l'orientamento preferito, si identifica la superficie chiave che presenta

caratteristiche specifiche e che quindi risulta qualitativamente migliore. La superficie selezionata viene posizionata perpendicolarmente rispetto alla direzione di costruzione (orientamento in direzione z). Se non è presente alcuna caratteristica specifica in una parte, l'orientamento dipende direttamente dalla geometria della parte e si cerca quello ottimale trovando un trade-off tra qualità della parte e tempo di costruzione. Orientando la parte in modo che la superficie chiave sia verticale al raggio, è possibile che lo spazio coperto dalla parte, all'interno del volume, aumenti. Quindi un secondo trade-off che deve essere studiato è dato dallo spazio occupato dalla parte, nel proprio orientamento preferito, e la qualità richiesta dalla superficie, in modo che non vi sia una considerevole riduzione del numero di parti da posizionare.

Considerando fissi gli orientamenti di costruzione delle parti, si procede con il posizionamento nel volume di lavoro di forma cilindrica. Le parti inizialmente vengono ordinate in base alla dimensione e per determinare lo spazio coperto da ogni modello si utilizzano configurazioni rettangolari. Il metodo con cui vengono posizionate è assimilabile ad un annidamento seriale (come Wodziak et al., 1994), in quanto vengono annidate una alla volta, dipendentemente dalla dimensione, dall'orientamento, dalla qualità superficiale richiesta e dalle caratteristiche geometriche. Il posizionamento, della parte più grande o più piccola, inizia nel centro del cilindro, e un vettore di traslazione permette che queste possano muoversi sul piano. Dopo che è stato riempito uno strato, si passa al secondo livello. I limiti del metodo proposto sono dati dalla perdita di volume sia dovuta agli estremi della sezione circolare, sia causata dalla differenza di altezze presenti in uno strato. Inoltre, non essendo possibile ruotare le parti durante la fase di *packing*, non è possibile garantire una soluzione ottimale.

Come già sottolineato per i problemi bidimensionali, l'utilizzo di configurazioni rettangolari per determinare la dimensione delle parti non è una soluzione efficiente, anzi porta ad un notevole spreco di spazi (come sottolineato da Hur et al., 2001).

Gli autori Hur et al. (2001) propongono una soluzione che riduce il tempo di costruzione e migliora la qualità superficiale delle parti. L'obiettivo del modello è

l'ottimizzazione del layout, ottimizzando l'orientamento di costruzione e la compattezza del *packing*. Per superare i limiti dovuti all'uso di configurazioni rettangolari, il loro studio utilizza strutture voxel per la rappresentazione delle parti. Per quanto riguarda l'orientamento di costruzione, la funzione obiettivo considerata cerca di prevenire il *curling phenomenon* o “fenomeno di incurvamento”, che può manifestarsi frequentemente in tale tipologia di processi. Quest'ultima tiene in considerazione la minimizzazione dell'altezza di costruzione e del rapporto tra la lunghezza x e y delle parti nell'area della sezione trasversale, poiché potrebbero inficiare la qualità della produzione. I vincoli presi in considerazione sono la dimensione della camera di stampa, la direzione della superficie partizionata e l'area della sezione trasversale di fabbricazione iniziale della parte. Nel caso di una superficie partizionata, essa dovrebbe essere orientata verso l'alto in modo da prevenire errori durante la produzione causati dal fenomeno dell'arricciamento, come si evince dalla seguente Figura 25:

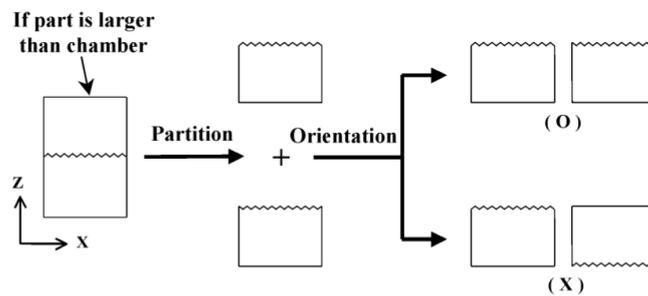


Figura 25: Orientamento della parte divisa (Hur et al., 2001).

L'area della sezione trasversale dovrebbe essere ridotta al minimo, in quanto non essendo richiesta la presenza di supporti, il primo strato è considerato libero consentendo deformazioni elevate rispetto agli strati successivi, che si traducono in una minor precisione dimensionale. Quindi, diminuendo l'area di tale sezione è possibile ridurre le deformazioni.

La regola di posizionamento BL viene estesa al caso del *packing 3D*, in cui esaedri vengono disposti all'interno dello spazio. A differenza del caso bidimensionale, in cui la priorità viene data alla direzione y, nel *packing 3D* la priorità è data alla direzione z, poi y e infine x. In generale non è facile adattare

l'approccio BL al *packing* su macchina SLS, in quanto le parti dovrebbero essere posizionate in uno spazio di lavoro rettangolare, nel caso in esame le parti vengono posizionate vicino al centro della camera. La rappresentazione delle parti avviene trasformando le informazioni di *slicing*, derivanti dal file STL, in un modello voxel. Questa trasformazione avviene esprimendo il poligono chiuso ottenuto dallo *slicing* in una struttura a griglia bidimensionale. È possibile creare la struttura voxel 3D accumulando gli *slicing data* dei vari strati, i quali sono rappresentati come strutture voxel 2D.

Sebbene il modello voxel permetta di ottenere un risultato migliore in termini di altezza della costruzione, richiede tempi di calcolo più lunghi rispetto ai riquadri di delimitazione (utilizzati dagli autori Nyaluke et al., 1996).

Recentemente, gli autori Yang et al. (2023) e Yau et al. (2021) propongono soluzioni al problema del nesting 3D finalizzate ad ottimizzare l'utilizzo dello spazio e a ridurre i costi associati al processo.

La prima soluzione si basa sulla somiglianza di codifica convesso-concava del modello voxel (VCCCS), per risolvere il problema dell'utilizzo insufficiente dello spazio al di sotto delle parti autoportanti e di ridurre i tempi relativi alla ricerca del posizionamento adatto e dell'angolo di rotazione dei modelli. La Figura 26 mostra lo spazio inutilizzato nei metodi di nesting 2D.

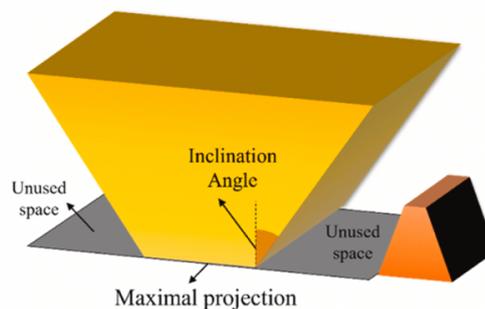


Figura 26: Spazio inutilizzato con metodi di nidificazione 2D (Yang et al., 2023).

La codifica del modello 3D standardizza la convessità e la concavità della superficie del modello e dello spazio di posizionamento. Per trovare

l'orientamento di costruzione delle parti, deciso in accordo ai requisiti di tolleranza, è necessario stabilire un sistema di coordinate e la dimensione della voxelizzazione. Con il sistema di coordinate voxel si cerca di mantenere le informazioni geometriche delle superfici del modello originale, avendo il vantaggio di espandere la dimensione del voxel e ridurre il tempo operativo. Il posizionamento è guidato da una tabella di confronto da cui si possono ottenere le somiglianze tra la forma del modello e lo spazio. Anche gli angoli di rotazione sono determinati dalla corrispondenza per somiglianza.

Si evita, così, che vi sia la perdita di precisione dovuta all'impilamento degli oggetti, sfruttando contemporaneamente lo spazio offerto dal materiale che si auto supporta.

La seconda metodologia considera come obiettivo primario la minimizzazione dell'altezza di costruzione, seguito dalla massimizzazione della compattezza dell'annidamento vicino all'origine della camera di costruzione. L'algoritmo proposto da Yau et al. (2021) mira a trovare le migliori soluzioni in termini di posizioni e orientamenti degli oggetti, evitando che ci possa essere interferenza tra di loro. Attraverso il rilevamento delle collisioni si definisce una distanza di sicurezza tra gli oggetti adiacenti. Le parti vengono rappresentate dai loro volumi delimitanti (*bounding volume*) che sono sfere o scatole che racchiudono il complesso modello geometrico. In questo caso si utilizzano riquadri di delimitazione orientati (OBB) indipendenti dagli assi, che permettono le libere rotazioni degli oggetti. Per la fase di posizionamento nel volume della camera, gli OBB vengono ordinati in modo decrescente, permettendo all'oggetto con l'area di stampa più grande di essere posizionato per primo.

Il modello proposto dagli autori utilizza per la prima volta un algoritmo di ottimizzazione meta-euristico FPA (algoritmo di impollinazione dei fiori) per affrontare il problema del nesting 3D, il quale si è dimostrato più efficiente rispetto a quelli presenti in letteratura. In più, è stato combinato con il metodo OBB al fine di calcolare efficientemente le interferenze di modelli CAD complessi.

3.3. Nesting e scheduling in AM

Nel presente paragrafo sono analizzati gli articoli che affrontano i problemi di nesting e scheduling congiuntamente.

Come sottolineato nel lavoro degli autori Antón et al. (2022), nella fabbricazione additiva, le fasi di nesting e scheduling non possono essere separate, in quanto correlate attraverso il processo di pianificazione. Si dimostra che le scelte relative allo scheduling sono influenzate dalle precedenti scelte di nesting. Le decisioni come l'allocazione alle macchine, la sequenza o le tempistiche delle *build*, in base ai criteri di ottimizzazione, considerati in questa fase, sono influenzati dal raggruppamento delle parti e dalla loro assegnazione alle *build*.

La maggior parte dei problemi studiati in letteratura considerano, ancora, queste due fasi in modo separato, fatta eccezione per i lavori di Oh et al. (2018), Zhang et al. (2020) e Aloui et al. (2021), che affrontano le due fasi in modo integrato, cercando di raggiungere un'ottimizzazione complessiva.

La classificazione proposta prevede la suddivisione dei lavori analizzati in quelli che trattano la determinazione dell'orientamento di costruzione delle parti e quelli che assumono che sia predeterminato e fisso.

La Tabella 3 riassume la classificazione degli articoli trattati nel presente paragrafo. Sulle righe sono presenti gli autori degli articoli e le colonne sono divise in base al tipo di processo AM, all'orientamento di costruzione, alle funzioni obiettivo del modello, alle tipologie di macchine, alla rappresentazione della parte, alle rotazioni permesse dal modello e alle regole di posizionamento utilizzate.

Articoli	Processo AM	Orientamento	Funzioni Obiettivo	Macchine	Rappresentazione parte	Rotazione	Regole posizionamento
Che et al. (2021)	SLM	Si	Min makespan	Parallele non identiche	Riquadro di delimitazione	90° assi x e y	First Fit; Best Fit

Yu et al. (2022)	SLM	Si	Min ritardo totale	Parallele non identiche	Riquadro di delimitazione	90° asse z	BL
Oh et al. (2018)	/	Si	Min tempo di ciclo	Parallele non identiche	Riquadro di delimitazione	Asse x e y (laying policy); Assi x, y, z (standing policy)	BL
Fera et al. (2018)	SLM	No	Min earliness + tardiness e costi	Singola macchina	/	/	/
Chergui et al. (2018)	SLS; SLM	No	Min ritardo totale; max compattezza	Parallele identiche	Riquadro di delimitazione	/	/
Dvorak et al. (2018)	SLM	No	Min makespan; max compattezza	Job shop	Riquadro di delimitazione; poligono	Asse z	Maximal Rectangles Best Short Side Fit; algoritmo greedy; BL
Zhang et al. (2020)	SLA	No	Min makespan; max compattezza	Job shop	Poligono	Asse z	NFP; IFP
Kucukkoc et al. (2021)	SLM	No	Min ritardo totale	Parallele non identiche	Poligono	/	/
Aloui et al. (2021)	SLS	No	Min ritardo totale; max utilizzo spazio	Parallele non identiche	Riquadro di delimitazione	/	/
Altekin et al. (2022)	SLM	No	Min makespan	Parallele non identiche	Poligono	/	/

Tabella 3: classificazione articoli incentrati sul nesting e sullo scheduling.

3.3.1. Progettazione layout

Gli articoli trattati di seguito affrontano problemi di nesting, determinando l'orientamento e il *packing* delle parti in *build*, e di scheduling delle *build* sulle macchine AM parallele e non identiche. Per poter raggiungere spazi di ricerca più ampi e un corretto bilanciamento negli obiettivi individuati è opportuno considerare differenti orientamenti delle costruzioni al fine di trovare migliori soluzioni al problema in esame (Che et al., 2021).

Gli autori Che et al. (2021) sono i primi ad affrontare un problema di *parallel batching unrelated*, in cui si tiene in considerazione la selezione dell'orientamento per le parti, al fine di ridurre il *makespan* (che corrisponde al tempo di completamento dell'ultimo *job*). Si considera un set di macchine AM eterogenee per il processo SLM, ognuna con specifici tempi di *set-up*, velocità di produzione, capacità e dimensione. Ogni parte che deve essere prodotta è caratterizzata dal proprio volume e da una serie di orientamenti candidati, ognuno dei quali è descritto attraverso la lunghezza, l'altezza, spessore e dal volume della struttura di supporto necessaria. Ogni parte è descritta dal proprio rettangolo di delimitazione e durante il *packing*, considerato come un problema di *packing 2D* rettangolare, l'area di produzione di ogni parte è rappresentata dai rettangoli proiettati sulla piattaforma di costruzione (come Canellidis et al., 2006). Durante questa fase, ad ogni oggetto è permesso scegliere un orientamento tra quelli candidati, inoltre, è possibile la loro rotazione di 90° sul piano orizzontale. Il tempo di produzione di un *job* è considerato come funzione del tempo di esposizione degli strati, proporzionale al volume totale delle parti e delle strutture di supporto, del tempo di distribuzione del materiale, dell'altezza massima della *build* e del tempo di *set-up* della specifica macchina assegnata. Il modello di *packing* utilizzato è chiamato *Skyline*, proposto per la prima volta da Burke et al. (2004), che considera un segmento verticale contornato da uno *skyline*, il quale è rappresentato da cinque attributi: dal punto (x, y) corrisponde all'estremità sinistra del segmento, dalla

larghezza w , l_1 e l_2 sono i lati. Il processo di rappresentazione e aggiornamento dello *skyline* è mostrato nella Figura 27:

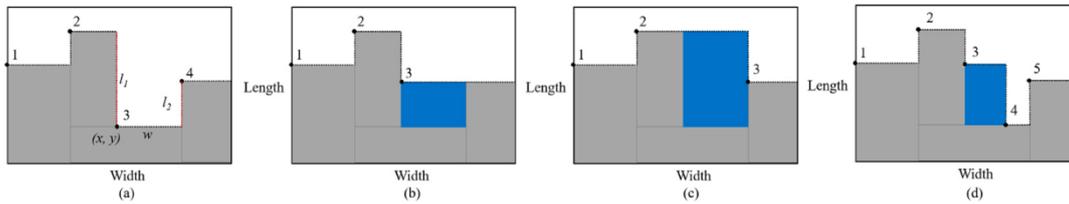


Figura 27: rappresentazione e aggiornamento dello skyline (Che et al., 2021).

Lo spazio iniziale è rappresentato da un segmento corrispondente al fondo della piattaforma della macchina e la parte selezionata, ad ogni iterazione, viene posizionata adiacentemente al segmento dal lato sinistro o destro, dopo il posizionamento lo *skyline* si aggiorna. Per il posizionamento vengono considerate due strategie di *packing*: la prima è chiamata *First Fit* che posiziona le parti nella sequenza data, individuando il primo spazio disponibile adatto alla parte, indipendentemente dall'orientamento; la seconda è *Best Fit* che posiziona le parti cercando di riempire, con la parte più adatta, lo spazio in basso a sinistra e tiene in considerazione i vari orientamenti, selezionando quello più idoneo. Gli autori concludono che quella più efficace è la *Best Fit*.

Gli autori Yu et al. (2022) investigano lo stesso problema ma concentrandosi sulla minimizzazione della *total tardiness*. L'obiettivo è quindi determinare l'orientamento di ogni parte, il posizionamento e lo scheduling sulle macchine disponibili per minimizzare la funzione obiettivo. Essendo un sistema formato da macchine parallele SLM *unrelated*, presentano tutte capacità diverse. Ogni parte da produrre è caratterizzata da una *due date* e da una serie di orientamenti alternativi considerati durante il posizionamento, per soddisfare i vincoli di qualità richiesti durante la produzione. Ogni orientamento (che corrisponde ad una geometria 3D) è costituito da quattro parametri, altezza, lunghezza, spessore della sua proiezione rettangolare e dal volume della struttura di supporto necessaria. Le parti formano una *build* se le loro proiezioni non si sovrappongono, se non eccedono i limiti della piattaforma e se durante il posizionamento hanno la possibilità di ruotare attorno al loro asse z di 90° . Come gli autori Che et al.

(2021), anche loro considerano il tempo di processo scomposto in tempo di *set-up*, tempo di esposizione degli strati e tempo per la distribuzione del materiale. Per semplificare l'integrazione di un problema di *bin-packing 2D* con un problema di *parallel scheduling*, viene proposto, come nel lavoro di Kucukkoc (2019), di trasformare il vincolo di capacità della macchina da bidimensionale a monodimensionale, ovvero l'area di proiezione totale delle parti stampate sulla macchina non può eccedere la superficie della piattaforma. Le parti rappresentate dai propri riquadri di delimitazione sono posizionate sulla macchina il più vicino possibile all'angolo in basso a sinistra (regola BL). Nel lavoro di Yu et al. (2022) vengono confrontati i risultati dell'ottimizzazione che ha come funzione obiettivo la minimizzazione della *total tardiness* con quelli derivanti dallo stesso problema ma considerando come funzione obiettivo la minimizzazione del *makespan*. Il fine è quello di trovare un compromesso tra il voler posizionare più parti, beneficiando della condivisione dei costi di *set-up* e per la distribuzione del materiale, o posizionare meno parti e mantenere la flessibilità nella gestione delle *due date* distribuite. La soluzione di posizionare più parti possibili, adatta per la minimizzazione del *makespan*, è conveniente dal punto di vista del risparmio dei costi, ma comporta possibili ritardi nelle consegne a causa dei maggiori tempi di processo. L'ottimizzazione della *total tardiness* risulta più difficile ma è la migliore nel caso in cui si desideri maggior flessibilità nella gestione delle date di consegna stabilite.

Gli autori Oh et al. (2018) affrontano il problema integrato del *packing 2D* e dello scheduling su macchine parallele con diverse capacità, confrontando invece due diverse politiche di orientamento *laying policy* e *standing policy*. Il problema è definito "integrato" in quanto il *packing 2D* e lo scheduling sono considerati simultaneamente in un'unica fase. La prima politica di orientamento è focalizzata sul ridurre l'altezza delle parti, mentre la seconda mira a minimizzare l'area di proiezione delle parti per disporre un numero maggiore e ridurre il numero dei *job*. Si considerano parti irregolari che vengono raggruppate in *job* prima di essere assegnate alle macchine AM, aventi piattaforme rettangolari. L'obiettivo è l'ottimizzazione del tempo di ciclo, assumendo che, nel caso di produzione parallela, la macchina con il tempo di ciclo più lungo misura il tempo totale di

ciclo del sistema. Ogni tempo di ciclo è composto dal tempo di *set-up* e dal tempo di costruzione. Il tempo totale di costruzione è dato dalla somma dei tempi di costruzione dei vari *job* e quello di *set-up* totale è dato dalla moltiplicazione per il numero dei *job*. Durante la determinazione dell'orientamento le parti, rappresentate dai propri riquadri di delimitazione, sono orientate secondo due differenti politiche: la *laying policy*, che per trovare l'altezza minima di una parte, ricerca gli angoli di rotazione attorno agli assi x e y e permette minori tempi di costruzione per un *job*. La *standing policy* che minimizza l'area dei riquadri di delimitazione delle parti sul piano x-y, permettendo rotazioni delle parti attorno agli assi x, y e z, e si traduce in un numero minore di *job* da produrre e in un minor tempo di ciclo. Si nota che nella *laying policy* non sono prese in esame rotazioni attorno all'asse z, poiché, non influiscono sull'altezza della parte. Il posizionamento delle parti sulla piattaforma di lavoro è riconducibile ad un annidamento seriale (come nel lavoro di Wodziak et al., 1994, Nyaluke et al., 1996, Hur et al., 2001, Yang et al., 2023, Yau et al., 2021), poiché avviene in modo sequenziale. Per ridurre la differenza tra le altezze all'interno di un *job*, viene posizionata prima la parte più alta. Al fine di disporre più parti all'interno di un *job*, per evitare di sprecare spazio all'interno della macchina, si utilizza l'approccio BL, in cui le parti sono annidate vicine all'angolo in basso a sinistra della piattaforma rettangolare (come Yu et al., 2022). Durante lo scheduling è necessario far combaciare le caratteristiche della parte con quelle della macchina, in quanto è possibile che una parte possa essere realizzata su più macchine a seconda degli orientamenti di costruzione e dei riquadri di delimitazione. La scelta verte verso la macchina con il tempo di ciclo più basso. Sebbene la *laying policy* abbia tempi di ciclo più contenuti, la *standing policy* è preferita dagli autori, soprattutto quando il numero di parti da annidare aumenta.

Nelle analisi effettuate dagli autori Che et al. (2021), Yu et al. (2022), Oh et al. (2018), si effettua la scelta dei riquadri di delimitazione per le parti per tre motivi: minimizzare l'effetto che la generazione della struttura di supporto ha sul tempo di costruzione, in quanto non viene mai preso in considerazione nei modelli; determinare più facilmente il miglior orientamento di costruzione; minimizzare i tempi di calcolo necessari all'analisi della geometria.

3.3.2. Layout preimpostato

I seguenti articoli relativi alla pianificazione della produzione in un contesto AM tengono conto dei problemi di nesting e scheduling in modo combinato, mettendo in secondo piano la determinazione degli orientamenti di costruzione, i quali vengono considerati predeterminati. Si evidenzia come si rilassano i vincoli della fase di nesting, nel momento in cui viene combinata con la fase di scheduling.

Gli autori Fera et al. (2018) analizzano come programmare la produzione di ordini su una singola macchina SLM ottimizzando tempi e costi. Il problema studiato è considerato un'ottimizzazione multi-obiettivo che mira a rispondere alla seguente domanda:

“Qual è la programmazione che permette di rispettare le consegne stabilite con il minor costo di produzione?”

Si prendono, quindi, in considerazione le misure di performance del ritardo (*earliness* e *tardiness*) e il costo totale di una parte (TPC) come obiettivi da minimizzare.

Ogni geometria, presente in una *build* è caratterizzata da una domanda, una data di consegna stabilita e dal proprio volume. Le ipotesi introdotte nel modello considerano orientamenti predeterminati per le geometrie; una camera di costruzione che consente la stampa di parti una sopra l'altra, tramite strutture di supporto (a differenza dei lavori di Griffiths et al., 2019; Che et al., 2021; Yu et al., 2022 in cui il processo SLM non permette il *nesting 3D* a causa della presenza di strutture di supporto); e costi di magazzino trascurabili. È necessario tenere in considerazione il volume della camera di costruzione in quanto, quando una geometria viene assemblata in una *build*, si deve aumentarne il volume per soddisfare diverse necessità di fabbricazione. Ad esempio, per l'orientamento della parte, si tiene in considerazione il volume extra per le strutture di supporto. Ugualmente, bisogna considerare un volume extra anche per la rimozione manuale delle parti a fine lavorazione, per evitare il danneggiamento delle superfici tra geometrie vicine.

Il rispetto delle *due date* è il primo obiettivo da raggiungere, e si traduce nel bilanciamento tra *earliness*(E) e *tardiness*(T).

È importante sottolineare che in AM il tempo di evasione di un ordine non è correlato al tempo di processo dello stesso ordine, in quanto un singolo ordine è diviso in un certo numero di *build*, ed ogni *build* è composta da varie geometrie. Ciò significa che il tempo di evasione di un ordine si vincola al tempo di processo di ogni *build* in cui l'ordine è diviso. In questo lavoro un ordine corrisponde alla geometria da realizzare.

Essendo i pezzi da produrre raggruppati in ordini, le misure di performance del ritardo (*earliness* e *tardiness*) sono calcolate sugli ordini e non sulle parti singole. In letteratura questo problema ha il nome di “*customer order scheduling*”.

Il raggruppamento degli ordini di produzione in varie *build* ha come obiettivo la minimizzazione di *earliness* + *tardiness*, massimizzando il numero di parti che può essere ospitato nel volume della camera di costruzione per assicurarne la saturazione (obiettivo chiave in AM) e non massimizzare il numero di parti fabbricate in una *build* al fine rispettare la date di consegna degli ordini. In questo modo lo scheduling degli ordini comprenderà date di completamento vicine alle date di consegna prestabilite.

Il modello di costo per l'ottimizzazione del secondo obiettivo è ripreso da Fera et al. (2017). Utilizzando il *TPC model* è possibile calcolare il costo unitario dell' i -esima geometria in qualunque *build* sia ubicata. Si evidenzia che la stessa geometria può presentare differenti costi specifici a seconda della propria ubicazione (del mix produttivo di costruzione). Il costo totale dell'ordine (OC) è il costo per produrre un ordine, il quale è ubicato in diverse *build* ed è formato da tanti elementi quanti ce ne sono nell'ordine. Con OC_i si identifica il costo di fabbricazione dell' i -esimo ordine diviso in un certo numero di *build* j ed è rappresentato dalla seguente formula:

$$OC_i = \sum_{j=1}^{n_b} TPC_{ij} S_{ij}$$

Equazione 20: formula per il costo di fabbricazione di un ordine (Fera et al., 2018).

In cui, il termine S_{ij} corrisponde al numero di parti realizzate in ciascuna *build* ed n_b è il numero delle *build*. Il costo totale dell'ordine (TOC_i) è dato da OC_i sommato alle sanzioni per il ritardo nella consegna ($C_{tard,i}$):

$$TOC_i = OC_i + C_{tard,i}$$

Equazione 21: formula per il costo totale di un ordine (Fera et al., 2018).

$$C_{tard,i} = p_i * OC_i * T_i$$

Equazione 22: formula per il costo delle penali legate a ritardi nella consegna (Fera et al., 2018).

In cui p_i è la sanzione relativa all' i -esimo ordine. Essendo il costo del ritardo proporzionale al numero di giorni di ritardo il termine OC_i aumenta di una quantità p_i per ogni giorno di ritardo. Il TOC è quindi un vettore in cui ogni elemento rappresenta la quantità di denaro necessaria per soddisfare la domanda complessiva con il raggruppamento degli ordini proposto. Gli autori aggiungono che per calcolare lo sforzo economico per la produzione delle geometrie, quando viene applicato uno specifico *scheduling*, è possibile utilizzare anche un valore scalare, dato dalla somma di tutti i TOC per tutte le geometrie/ordini da produrre in uno specifico arco temporale.

La formulazione matematica del problema di ottimizzazione si sintetizza nel modo seguente:

$$\min F_S = F_{ET} + F_{CP}, \text{ in cui:}$$

$$F_{ET} = \sum_{i=1}^{n_g} (\alpha_S E_i + \beta_S T_i)$$

Equazione 23: parte della funzione obiettivo legata ai tempi (Fera et al., 2018).

$$F_{CP} = \sum_{j=1}^{n_b} y_S TOC_j$$

Equazione 24: parte della funzione obiettivo legata ai costi (Fera et al., 2018).

Dove, α_S , β_S , y_S sono delle costanti e n_g è il numero degli ordini.

Anche gli autori Chergui et al. (2018) perseguono l'obiettivo di soddisfare entro le *due date* gli ordini ricevuti da diversi clienti, ma considerando più macchine AM parallele e identiche. Le macchine considerate nel modello si riferiscono ai processi SLS e SLM. Gli autori si focalizzano, quindi, sulla minimizzazione della violazione delle *due date* e sulla contemporanea massimizzazione dell'utilizzazione dello spazio sulle macchine. Le parti, da raggruppare in diversi *job*, sono caratterizzate da differenti *due date* e volumi, e i vari *job* sono caratterizzati da differenti tempi di processo e diverse date di consegna stabilite. Al fine di massimizzare l'utilizzo dello spazio sulle macchine si considerano due indicatori: la compattezza minima (C), definita come la copertura minima dell'area di costruzione, e la differenza di altezze di costruzione assegnate al *job* (come nel lavoro di Zhang et al., 2015). La data di consegna di un *job* è definita come quella minima delle parti assegnate al *job*. Per l'assegnazione delle parti ai *job* si minimizzano le differenze totali delle consegne tra le parti appartenenti allo stesso *job*. È necessario che ogni *job* sia contenuto all'interno della camera di costruzione e che non permetta la sovrapposizione tra i riquadri di delimitazione delle parti che lo compongono. Per quanto riguarda la programmazione sulle macchine AM l'obiettivo è ridurre la *total tardiness* e la regola utilizzata in questo modello è la EDD (*earliest due date*) che risulta veloce nel raggiungimento dell'obiettivo. Secondo questa regola viene scelto prima il *job* con la data di

consegna più vicina, questo significa che i *job* vengono ordinati, in base alle loro date di consegna, in modo non decrescente. Per ottimizzare la costruzione dei *job* nel rispetto delle date di consegna è importante stimare il loro tempo di processo. Per la stima del tempo di produzione del *job* j (p_j) si propone la seguente formula:

$$p_j = C_{z_{max}} \max\{z_i\} + C_a * \sum_{i \in I_j} a_i + C_v * \sum_{i \in I_j} v_i \quad \forall j = 1, \dots, l$$

Equazione 25: formula per il tempo di produzione del job (Chergui et al., 2018).

in cui I_j è l'insieme delle parti assegnate al *job* j , z_i è l'altezza della parte i , a_i è l'area di produzione della parte i , v_i è il volume di materiale della parte i , $C_{z_{max}}$ è una costante che indica la massima altezza, C_a è la costante relativa all'area di produzione e C_v è la costante relativa al volume di materiale. Le costanti appena citate fanno riferimento alle specifiche della macchina AM.

Nel problema di scheduling proposto, la stima del tempo di produzione considera solamente le operazioni di stesura della polvere e di esposizione delle sezioni trasversali. Inoltre, più le parti in lavorazione hanno altezze considerevoli, più significativo sarà il tempo associato alla generazione degli strati di polvere, soprattutto quando lo spessore degli strati è molto sottile. Ciò risulta chiaro in quanto il tempo di processo del *job* j dipende fortemente dalla massima altezza (z_{max}) delle parti assegnate.

Il problema in cui un insieme di parti con configurazioni e date di consegna uniche viene fabbricato da un insieme di macchine SLM, minimizzando i tempi, viene studiato anche dagli autori Dvorak et al. (2018). Il metodo proposto considera un problema di *bin-packing 2D*, associato ad un *job shop* scheduling. Durante la fase di nesting l'insieme di parti viene disposto in modo efficiente sulla piattaforma di costruzione massimizzando l'area totale coperta dalle parti. Per ogni parte sono dati possibili orientamenti considerati in diverse rotazioni attorno all'asse z ed è dato anche un valore economico. Il processo di nesting opera a tre livelli di fedeltà: *low fidelity*, *medium fidelity* e *high fidelity*. Al primo livello si utilizzano i riquadri di delimitazione delle parti per la loro rappresentazione, i

quali vengono sequenziati, inizialmente, in modo decrescente in base al valore della parte, successivamente in base al lato più corto e infine in base al lato più lungo. Per quanto riguarda il posizionamento si utilizza una tecnica *Maximal Rectangles Best Short Side Fit* che tiene conto del numero massimo di rettangoli liberi nel contenitore, ovvero quei rettangoli rimanenti dopo che sono stati posizionati i riquadri di delimitazione. Le parti vengono posizionate in questi rettangoli liberi, riducendo al minimo il lato rimanente più corto. Al secondo livello di fedeltà le parti sono rappresentate dalle proprie sagome e i poligoni risultanti vengono ordinati in modo decrescente in base al loro valore economico e alla propria area. Per ogni poligono si confrontano tutte le possibili rotazioni e posizioni, scegliendo la combinazione che risulta nel più piccolo riquadro di delimitazione. In questo livello è considerato un singolo orientamento per ogni parte. Si utilizza un algoritmo *greedy* per il posizionamento delle parti. La procedura di annidamento con il massimo livello di fedeltà esegue il posizionamento utilizzando la regola BL (come nel lavoro di Yu et al., 2022 e Oh et al. 2018), in cui le parti si dispongono il più vicino possibile all'angolo in basso a sinistra della piattaforma di costruzione, e massimizza sia l'area totale di costruzione utilizzata, sia il valore totale delle parti all'interno della *build*.

Nella trattazione vengono considerati vincoli di compatibilità, che consistono nel calcolare sia la relazione di compatibilità tra ogni coppia di possibili configurazioni di due parti diverse, sia la relazione tra ogni possibile configurazione della parte con ogni macchina, in modo da restituire un rapido filtraggio dei candidati. Inoltre, vengono considerati vincoli relativi alle *due date* in cui la data di consegna relativa ad una *build* è data da quella più prossima delle parti che la compongono e si afferma che su una macchina le *due date* di tutte le *build* devono essere successive alla somma delle durate (tempi di costruzione) delle *build* le cui consegne sono precedenti.

Nel lavoro degli autori viene proposta come funzione obiettivo, per quanto riguarda la fase di scheduling, la minimizzazione del *makespan*.

Il problema di *job shop scheduling* e *packing 2D*, viene affrontato in modo integrato, qualche anno dopo, anche da Zhang et al. (2020). Nel loro lavoro le

parti che devono essere fabbricate sono assegnate alle macchine SLA disponibili e, in seguito, raggruppate in *job* da lavorare su una particolare macchina. È fondamentale determinare le macchine opzionali per ciascuna parte, per incontrare i requisiti dei clienti, prima che si cominci la fase di scheduling.

Essendo l'orientamento delle parti predeterminato, esse possono solamente traslare sul piano x-y e ruotare attorno all'asse z. Le proiezioni delle parti, che vengono utilizzate come rappresentazioni durante lo scheduling, sono ottenute in corrispondenza degli orientamenti scelti per le parti aggiungendo delle tolleranze in modo da assicurarsi che ci sia un intervallo tra esse (come nei lavori di Zhang et al., 2018 (b); Griffiths et al., 2019; Yau et al., 2021; Fera et al., 2018). Poiché le parti non possono essere impilate, trattandosi di macchine SLA, l'uso delle proiezioni risulta ragionevole permettendo l'aggiunta di strutture di supporto. Tra le assunzioni proposte nel modello, si ricorda che tutte le stampanti presenti nello *shop* hanno stessi parametri (e.g., velocità di esposizione degli strati, potenza del laser), in modo tale che le parti possano essere scambiate tra di esse. Lo studio degli autori ha come funzione obiettivo la minimizzazione del *makespan*.

Inoltre, ottimizzando la funzione obiettivo, si migliora anche l'utilizzo delle macchine poiché è possibile condividere il tempo di pre e post-trattamento, oltre al tempo per la distribuzione del materiale. Il tempo di costruzione di un *job* è stimato considerando il tempo di esposizione degli strati, il tempo per la distribuzione del materiale, il tempo di pre e post trattamento. Il tempo di esposizione, essendo il tempo impiegato per il disegno laser sulla superficie della resina liquida, è composto da due parti: esposizione del contorno ed esposizione dell'area. Il tempo per la distribuzione del materiale è diviso in quattro componenti: tempo per l'abbassamento della piattaforma della stampante, tempo necessario al movimento del dispositivo di distribuzione, tempo di riposo dopo il movimento del dispositivo e della piattaforma e un ritardo dopo il completamento di ciascuno strato per la sua polimerizzazione. Poiché il tempo per la distribuzione del materiale è formato da componenti che dipendono esclusivamente dalle specifiche delle macchine, nel modello è considerato costante. Inoltre, questo tempo è condivisibile tra le parti raggruppate, in quanto la distribuzione del

materiale viene effettuata una sola volta per tutte le parti presenti nel *job*, ed è dipendente dal numero di strati che devono essere fabbricati, il quale viene deciso dalla parte che presenta un'altezza maggiore.

Al fine di migliorare l'efficienza di ottimizzazione e l'analisi dei risultati, viene introdotto il concetto di bilanciamento del carico di una macchina m e si definisce, come suo carico, il tempo di produzione totale sulla macchina:

$$load(m) = \sum_{b=1}^{n_b} T_{mb}$$

Equazione 26: formula per il definire il concetto di carico su una macchina (Zhang et al., 2020).

in cui, con b si indicano i *job* da processare sulla macchina m .

Il rapporto di carico su una macchina viene calcolato come:

$$R(m) = \frac{load(m)}{A(m)}$$

Equazione 27: formula per il rapporto di carico su una macchina (Zhang et al., 2020).

in cui, $A(m)$ indica il tempo a disposizione della macchina. Inoltre, per descrivere il bilancio di carico complessivo all'interno di un workshop, si utilizza la deviazione standard:

$$Load\ Balance = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n_m} |load(m) - avg(Load)|$$

Equazione 28: formula per descrivere il bilancio del carico complessivo all'interno di un workshop (Zhang et al., 2020).

Per la strategia di posizionamento si fa riferimento ai concetti di NFP (come Canellidis et al., 2013) e IFP (*Inner-Fit Polygon*), al fine di trovare posizioni disponibili, e la selezione della posizione si basa sulla regola BL (come nel lavoro di Yu et al., 2022; Oh et al., 2018; Dvorak et al., 2018). Considerando di voler

posizionare una parte B, dopo che una parte A è già stata posizionata, si trova NFP_{AB} che corrisponde al luogo di un punto di riferimento su B, permettendo lo scorrimento di B attorno ad A, in modo che le parti rimangano in contatto ma senza mai intersecarsi. I bordi di NFP_{AB} sono, quindi, un insieme di posizioni in cui B tocca A ma non la interseca. Le parti si intersecano nel momento in cui il punto di riferimento di B si trova all'interno di NFP_{AB} (Figura 28(a)).

Il concetto di IFP è simile, in quanto la parte B viene inserita nel rettangolo, che indica la piattaforma della stampante, e spostata attorno alla parete interna. IFP_B è il luogo del punto di riferimento. La posizione disponibile per B è data dal punto sopra o all'interno dell' IFP_B (Figura 28(b)). Se IFP_B non esiste, allora significa che la parte B non può essere inserita sul piatto. L'insieme delle soluzioni disponibili per il posizionamento è il risultato della sottrazione tra IFP_B e NFP_{AB} (Figura 28(c)).

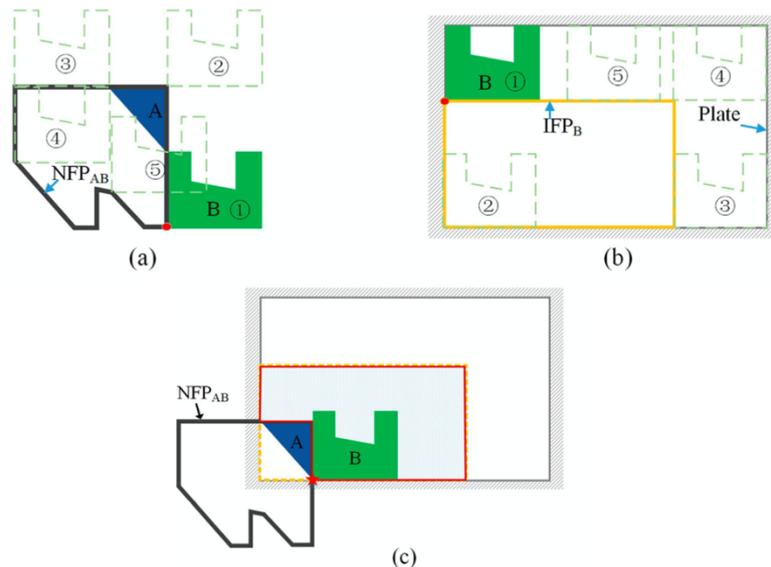


Figura 28: No Fit Polygon (NFP) (a) e Inner Fit Polygon (IFP) della parte B (b). Sottrazione tra IFB e NFP (c). I numeri cerchiati nelle figure rappresentano l'ordine di scorrimento (Zhang et al., 2020).

Il modello proposto dagli autori Zhang et al. (2020) può essere adattato anche ad altri processi di fabbricazione additiva come FDM.

A differenza dei precedenti autori citati in questo sotto paragrafo che affrontano il problema della pianificazione della produzione su macchina singola, su macchine

parallele identiche e in casi di *job shop*, i seguenti autori trattano il problema in un contesto di macchine AM parallele non identiche.

Gli autori Kucukkoc et al. (2021) considerano il problema combinato di *bin-packing*, scheduling e nesting di un gruppo di parti su macchine SLM parallele non identiche. Il loro lavoro consiste nella prima ricerca nel campo della produzione additiva dei metalli, in cui si voglia minimizzare la *total tardiness*, considerando vincoli di nesting bidimensionali. La definizione del problema consiste in un gruppo di parti ($i \in I$), ognuna con propria area, volume, *release date* (r_i) e *due date* (d_i), che devono essere raggruppate in *job* e nella loro allocazione alle macchine, ognuna delle quali presenta specifiche dimensioni e un'area supportata dalla piattaforma di costruzione. Inoltre, le macchine ($m \in M$) sono caratterizzate da specifici parametri, come VT_m , che consiste nel tempo necessario per formare un'unità di volume di materiale, HT_m , che è il tempo impiegato per la stesura della polvere (che si ripete per ogni strato, in base alla parte più alta prodotta), e SET_m è il tempo di *set-up* necessario per inizializzare e pulire la macchina prima e dopo ogni *job*. Il tempo di fabbricazione di un *job* ($j \in J$) su una data macchina è stimato come:

$$PT_{mj} = SET_m * Z_{mj} + VT_m * \sum_{i \in I} v_i * X_{mji} + HT_m * \max \{h_i * X_{mji}\}$$

Equazione 29: formula per il tempo di fabbricazione di un job su una macchina (Kucukkoc et al., 2021).

in cui, X_{mji} , variabile binaria, è uguale ad 1 se la parte i è assegnata al *job* j sulla macchina m , altrimenti è uguale a 0. Z_{mj} , anch'essa variabile binaria, è uguale ad 1 se viene utilizzato il *job* j sulla macchina m (cioè se almeno una parte è assegnata a quel *job*), altrimenti il suo valore è uguale a 0.

Il tempo così calcolato è formato da tre componenti: tempo di *set-up*, tempo in cui il materiale viene rilasciato, che si basa sul volume totale, e tempo di stesura della polvere. L'equazione indica che diverse combinazioni di parti e loro allocazioni su macchine diverse, porta a diversi tempi di completamento. Pertanto, si ricorda

che per offrire un vantaggio in termini di tempi di fabbricazione, risulta una scelta conveniente raggruppare insieme parti con altezze simili.

Il tempo di completamento di una parte è uguale al tempo di completamento del *job* al quale la parte è assegnata. La funzione obiettivo minimizza la somma dei ritardi di tutte le parti.

Il problema del nesting 2D è considerato al fine di garantire un'allocazione fattibile delle parti in lotti di lavoro, in quanto, sebbene si possa supporre che sia sufficiente controllare che la somma delle aree parziali non superi la capacità della piattaforma della macchina, può accadere che si raggiungano comunque soluzioni non realizzabili. L'algoritmo, quindi, assicura che i *job* assegnati alle macchine non superino né la capacità del vassoio della macchina, né la sua altezza.

Il problema di come raggruppare le parti in *job* e programmare i *job* sulle macchine AM, tenendo in considerazione il loro posizionamento bidimensionale, con l'obiettivo di minimizzare la *total tardiness* e massimizzare l'utilizzo della macchina (Chergui et al., 2018) viene studiato anche dagli autori Aloui et al. (2021), ma in un contesto di macchine parallele SLS con specifiche diverse. Le informazioni geometriche dimensionali delle parti formano i parametri di base per il problema del posizionamento. Il raggruppamento delle parti è considerato un problema di *bin-packing* bidimensionale in cui si evita la sovrapposizione delle parti sulla piattaforma di costruzione e il danneggiamento delle superfici considerando un extra spazio tra parti vicine (come Zhang et al., 2018 (b); Griffiths et al., 2019; Yau et al., 2021, Fera et al., 2018 e Zhang et al., 2020). Per la rappresentazione, si determina il rettangolo minimo che limita la geometria di ogni parte, partendo dalla sua proiezione sul piano x-y. Durante l'allocazione e il posizionamento delle parti non è possibile modificarne l'orientamento, poiché già determinato precedentemente alla pianificazione della produzione. Quando due parti vengono posizionate nello stesso lavoro devono necessariamente essere posizionate una dopo l'altra (lungo l'asse x o y). Questa condizione è riconducibile ad un annidamento seriale come già riscontrato nei lavori di Wodziak et al. (1994), Nyaluke et al. (1996), Hur et al. (2001), Yang et al. (2023), Yau et al. (2021) e Oh et al. (2018).

Volendo minimizzare la *total tardiness*, si procede con la determinazione del tempo di produzione di un *job* (k) su una macchina (m).

La stima del tempo di processo di un *job* si basa sul modello proposto da Zhang & Bernard (2013) e, per assicurarsi che tale stima sia precisa, è necessario tenere in considerazione anche le tempistiche legate alle operazioni di preparazione delle macchine e i tempi di post-trattamento. Le principali operazioni delle tecnologie a letto di polvere possono essere riassunte in *temperature descendent*, *layer construction*, *unpacking*. La prima operazione non dipende dal contenuto del *job* e quindi il tempo ad essa associato è considerato fisso, mentre le ultime due dipendendo dal contenuto del *job* e dalle caratteristiche di ogni parte, quindi hanno tempi variabili. Il tempo necessario alla produzione di un *job* k su una macchina m è definito come:

$$T_{k,m} = (R_p + Tp_m + Th_m + Dt_m) + \sum_{i \in I} (Tp + Tt + Te)a_{i,k}^m + \sum_{i \in I} a_{i,k}^m Ts_i + Tc_{k,m} + Td_m$$

Equazione 30: tempo di processo di un job su una macchina (Aloui et al., 2021).

in cui, R_p è il tempo di revisione del progetto, Tp_m, Th_m, Dt_m sono rispettivamente il tempo di preparazione della macchina m, il tempo di riscaldamento della macchina e il tempo necessario per la discesa della temperatura della macchina m. Tp, Tt, Te sono rispettivamente il tempo di preparazione del file di riferimento, il tempo di smistamento e il tempo richiesto per il *packing*. Il termine $a_{i,k}^m$ è una variabile binaria che assume valore 1 se la parte i è assegnata al *job* k sulla macchina m, altrimenti assume valore 0. Il tempo Ts_i corrisponde alla sabbiatura della parte i, $Tc_{k,m}$ è il tempo di costruzione di uno strato per il *job* k sulla macchina m e Td_m è il tempo di *unpacking* della macchina m. Si ricorda che per le tecnologie a letto di polvere il tempo di costruzione di uno strato per una parte è stimato in base all'altezza, alla superficie e al volume della parte.

Il modello proposto dagli autori utilizza come regola di smistamento la EDD come nel lavoro di Chergui et al. (2018) ma si differenzia dal loro studio, in cui il problema studiato è diviso in sotto-problemi, in quanto mira a risolvere simultaneamente il posizionamento delle parti sulle piattaforme di costruzione e lo scheduling dei *job* sulle macchine (problema integrato). Se le *due date*, relative a più parti, sono uguali, allora le parti vengono posizionate in base al tempo di costruzione più breve e se anche il tempo di costruzione è uguale, vengono posizionate in base alle altezze. Dopo la selezione della parte, in base alle regole di smistamento, si simula la *total tardiness* generata da tutti i *job*, quando si decide di allocare tale parte in ciascuno di questi *job*.

Gli autori Altekin et al. (2022) si focalizzano sulla minimizzazione del *makespan* affrontando un problema dell'assegnazione simultanea di parti a *job* e di *job* alle macchine, tenendo conto contemporaneamente anche dei costi associati alla fabbricazione.

Considerando un insieme di parti (I) da fabbricare su più macchine SLM parallele non identiche, al fine di garantire una buona qualità superficiale, per ciascuna parte viene fornito un orientamento predeterminato. Di conseguenza, vengono fornite area, volume e altezza di ogni parte. L'area di una parte viene definita attraverso la sua proiezione sul piano x-y e aggiungendo una certa tolleranza per evitare il contatto tra le parti e con le pareti della camera di costruzione (Zhang et al., 2020). Nel volume fornito per ciascuna parte è incluso anche il volume della struttura di supporto necessaria. Per ridurre i costi di produzione ed il *makespan*, le parti (i) vengono prodotte in *job* (j) e assegnate alle macchine (m). L'avvio di un nuovo *job* richiede un'operazione di *set-up* caratterizzata da una durata e da un costo di manodopera per unità di tempo. Le attività previste da questa operazione iniziale comprendono la preparazione dei dati, il rifornimento di materiale nella piattaforma di consegna del materiale in polvere, la preparazione dei parametri della macchina e il riempimento dell'atmosfera protettiva. I costi e il tempo associati a questa operazione di configurazione vengono sostenuti una sola volta e condivisi da tutte le parti assegnate ad un *job*. Assumendo che il *set-up* sia indipendente dalla sequenza, allora le soluzioni di minimizzazione dei costi e del

makespan sono indifferenti dall'ordine dei *job* su ciascuna macchina. La formulazione del modello calcola il costo totale come somma di tre componenti: il costo operativo della macchina associato al volume di materiale, il costo operativo associato all'altezza della costruzione e il costo di *set-up*.

$$TC = \sum_{(i,j,m) \in F} OC_m VT_m v_i x_{ijm} + \sum_{(j,m) \in G} OC_m HT_m h_{jm} + HC \sum_{m \in M} ST_m y_m$$

Equazione 31: costo totale del modello (Altekin et al., 2022).

In cui, OC_m è il costo operativo per unità di tempo sulla macchina m ; VT_m è il tempo necessario a formare un'unità di volume; v_i è il volume del materiale della parte i ; x_{ijm} è una variabile binaria, ed è uguale ad 1 se la parte i è assegnata al *job* j sulla macchina m , altrimenti uguale a 0. Il termine HT_m è il tempo per la stesura della polvere; h_{jm} corrisponde all'altezza del *job* j sulla macchina m ; HC è il costo del capitale umano per unità di tempo, per il calcolo dei costi di *setup*; ST_m è il tempo di *setup* sulla macchina m ; y_m indica il numero di *job* assegnati alla macchina m . Inoltre, con F si indica l'insieme di tutte le tuple di parti, *job* e macchine realizzabili, considerando la loro fattibilità in termini di altezze ed aree dei pezzi e delle macchine, e con G , tutte le tuple di *job* e macchine.

Per quanto riguarda il *makespan*, si calcola il tempo di processo di ciascun *job* (j) sulla macchina (m) come:

$$p_{jm} = VT_m \sum_{i \in I} v_i x_{ijm} + HT_m h_{jm}$$

Equazione 32: tempo di processo di un job su una macchina (Altekin et al., 2022).

Si sottolinea che la funzione obiettivo relativa al *makespan* è fortemente influenzata dal numero di macchine disponibili per la fabbricazione e dal loro bilanciamento che può portare alla formazione di colli di bottiglia (Che et al., 2021; Dvorak et al., 2018; Zhang et al., 2020; Altekin et al., 2022).

Inoltre, secondo Altekin et al. (2022) l'utilizzo di un insieme di macchine AM eterogenee può produrre soluzioni di costo minori rispetto al caso di macchine con stesse specifiche.

Il lavoro proposto si è posto l'obiettivo di rappresentare come i vincoli relativi alla fase di nesting, nel contesto di fabbricazione additiva, subiscano un rilassamento nel momento in cui vengono correlate problematiche relative alla fase di scheduling.

Come già accennato ad inizio paragrafo, gli approcci ritrovati nella letteratura si sono concentrati principalmente sulla risoluzione sequenziale dei problemi di nesting e scheduling: in una prima fase viene risolto il problema dell'annidamento delle parti nelle costruzioni e in una seconda fase le costruzioni vengono programmate sulle macchine AM.

Ciononostante, i modelli studiati dagli autori Oh et al. (2018), Zhang et al. (2020) e Aloui et al. (2021), considerano entrambe le fasi integralmente, per un'ottimizzazione complessiva, in quanto risolvono simultaneamente il posizionamento delle parti sulle piattaforme di costruzione e lo scheduling dei *job* sulle macchine.

CONCLUSIONI

Il lavoro di revisione della letteratura effettuato ha cercato di dare evidenza di come il tema del nesting sia di cruciale importanza nella pianificazione della produzione in un contesto AM e come i suoi vincoli tecnologici si rilassano se considerati congiuntamente alla fase di scheduling.

Si è posta particolare attenzione al tema dell'orientamento di costruzione delle parti e al posizionamento delle stesse nella camera di costruzione, spiegando come queste attività siano propedeutiche all'attività di allocazione alle macchine AM, in modo tale da rendere l'intero processo di pianificazione più efficiente.

Partendo da un inquadramento generale del tema della fabbricazione additiva e di come si sia sviluppato nel corso degli ultimi anni, si è voluto fornire una classificazione dei principali metodi di fabbricazione additiva dando rilevanza alle differenze, similitudini, svantaggi, vantaggi e ambiti di applicazione in base alle tecnologie utilizzate.

Successivamente, si è voluto entrare più nello specifico nei problemi di nesting e di scheduling. Si sono, inizialmente, evidenziate le correlazioni e le differenze tra il nesting in un contesto di fabbricazione additiva e la stessa attività in un contesto di fabbricazione tradizionale, andando poi ad analizzare come l'orientamento di costruzione delle parti e il posizionamento delle parti nelle *build* svolgano un ruolo fondamentale se si vuole rendere più efficiente il processo di fabbricazione additiva. In seguito, come per l'attività di nesting, anche per lo scheduling sono state analizzate le similitudini e le differenze dell'attività in un contesto AM rispetto ad un contesto tradizionale, soffermandosi sia su come i problemi di *batching* sono stati adattati al contesto della fabbricazione additiva, sia sulla forte connessione delle attività di nesting con quelle di scheduling, per poter rendere il processo di pianificazione più efficiente.

In seguito, si è proseguito, analizzando i problemi di ottimizzazione facendo riferimento alla sola attività di nesting, per poi correlarla anche all'attività di scheduling in base agli articoli di riferimento.

In prima battuta gli articoli sono stati classificati in base al tipo di processo AM, all'ottimizzazione considerata (se singolo o multi-obiettivo), alle funzioni obiettivo dei modelli studiati e al tipo di rappresentazione utilizzata per una parte da produrre, per affrontare i problemi di ottimizzazione relativi all'orientamento di costruzione delle parti. Dopodiché, gli articoli sono stati classificati in base ai processi AM utilizzati, al tipo di nesting adottato (se seriale o parallelo), alla tipologia di *packing* (se bidimensionale o tridimensionale), alle funzioni obiettivo del *packing* e dell'orientamento, alla rappresentazione della parte, alle possibili rotazioni e alle regole di posizionamento delle parti, aggiungendo, pertanto, al problema di ottimizzazione dell'orientamento di costruzione anche la disposizione delle parti in macchina per poter ottimizzare il layout.

A questo punto, nel lavoro proposto sono stati analizzati problemi di scheduling affiancati al nesting, ponendo attenzione a come i vincoli relativi a quest'ultima attività si rilassino in tal caso.

La classificazione degli articoli che è stata proposta in questa parte prevede la loro suddivisione in base al processo AM utilizzato, alla determinazione dell'orientamento di costruzione (se fisso o da determinare), alle funzioni obiettivo, alla tipologia di macchine utilizzate, alla rappresentazione della parte e alle possibili rotazione e regole di posizionamento.

In ultima analisi, si è voluto porre nuovamente l'accento su come, nonostante parte della letteratura spesso tratti i problemi di nesting e scheduling in maniera sequenziale, alcuni autori le considerano integralmente, in modo tale da raggiungere un'ottimizzazione complessiva e risolvendo simultaneamente la disposizione delle parti in macchina e lo scheduling delle *build* sulle macchine.

BIBLIOGRAFIA

Alexander P., Allen S., Dutta D.; 1998; "Part orientation and build cost determination in layered manufacturing"; *Computer-Aided, Design* Volume 30, Issue 5, Pages 343-356.

Aloui A., Hadj-Hamou K.; 2021; "A heuristic approach for a scheduling problem in additive manufacturing under technological constraints"; *Computers and Industrial Engineering*, Volume 154, 107115.

Altekin F.T., Bukchin Y.; 2022; "A multi-objective optimization approach for exploring the cost and makespan trade-off in additive manufacturing"; *European Journal of Operational Research*, Volume 301, Issue 1, Pages 235-253.

Araujo L.J.P., Ozcan E., Atkina J.A.D., Baumers M.; 2018; "Analysis of irregular three-dimensional packing problems in Additive Manufacturing: A new taxonomy and dataset"; *International Journal of Production Research*, Volume 57, Issue 18, Pages 5920-5934.

Bennell J.A., Oliveira J.F.; 2008; "The geometry of nesting problems: A tutorial"; *European Journal of Operational Research*, Volume 184, Issue 2, Pages 397-415.

Canellidis V., Dedoussis V., Mantzouratos N., Sofianopoulou S.; 2006; "Pre-processing methodology for optimizing stereolithography apparatus build performance"; *Computers in Industry*, Volume 57, Issue 5, Pages 424-436.

Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V.; 2009; "Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography"; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 45, pages 714–730.

Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V.; 2013; "Efficient parts nesting schemes for improving stereolithography utilization"; *Computer-Aided Design*, Volume 45, Issue 5, Pages 875-886.

Che Y., Hu K., Zhang Z., Lim A.; 2021; "Machine scheduling with orientation selection and two-dimensional packing for additive manufacturing"; *Computers & Operations Research*, Volume 130, 105245.

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*, Volume 1, Issue 4, Pages 12.23.

Chergui A., Hadj-Hamou K., Vignat F.; 2018; "Production scheduling and nesting in additive manufacturing"; *Computers & Industrial Engineering*, Volume 126, Pages 292-301.

Darvishi I., Khodaygan S., Mohammadi K., Golmohammadi A.; 2023; "Concurrent optimization of surface roughness, build time, and mechanical properties of additively manufactured product in terms of part build orientation"; *Progress in Additive Manufacturing*, Volume 8, pages 1455–1471.

De Antón J., Villafañez F., Poza D., López-Paredes A.; 2022; "A framework for production planning in additive manufacturing"; *International Journal of Production Research*, Volume 61, Pages 8674-8691.

Dean H.T., Tu Y., Raffensperger J.F.; 2006; "An improved method for calculating the no-fit polygon"; *Computers & Operations Research*, Volume 33, Issue 6, Pages 1521-1539.

Dvorak F., Maxwell M., Mathieu M.; 2018; "Planning and scheduling in additive manufacturing"; *Inteligencia Artificial*, Volume 21, No. 62.

Dyckhoff H.; 1990; "A typology of cutting and packing problems"; *European Journal of Operational Research*, Volume 44, Issue 2, 25, Pages 145-159.

Fera M., Fruggiero F., Lambiase A., Macchiaroli R., Todisco V.; 2018; "A modified genetic algorithm for time and cost optimization of an additive

manufacturing single-machine scheduling"; *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Volume 9 Issue 4 pp. 423-438.

Fera M., Macchiaroli R., Fruggiero F., Lambiase, A.; 2017; "A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume."; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 95, pages 673–685.

Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C.B., Wang C.C.L., Shin Y.C., Zhang S., Zavattieri P.D.; 2015; "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering"; *Computer-Aided Design*, Volume 69, Pages 65-89.

Gebhardt A., Kessler J., Thurn L.; 2018; "3D printing understanding additive manufacturing" - II ed.; *Tecniche Nuove*.

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*, Volume 273, Issue 1, Pages 334-352.

Hur S., Choi K., Lee S.; Chang P.; 2001; "Determination of fabricating orientation and packing in SLS process"; *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 112, Issues 2–3, Pages 236-243.

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"; *ICGA Journal*.

Kucukkoc I.; 2019; "MILP models to minimise makespan in additive manufacturing machine scheduling problems"; *Computers & Operations Research*, Volume 105, Pages 58-67.

Kucukkoc I., Li Z., Li Q.; 2021; "2D Nesting and Scheduling in Metal Additive Manufacturing"; *Communications in Computer and Information Science*, Volume 1407.

Kumar SD., Manohar GA., Teja RS.; 2022; "The state of art 3D printing: A case study of Ganesh Idol"; *Materials Today: Proceedings*, Volume 56, Part 1, Pages 455-461.

Lan P.T., Chou S.Y., Chen L.L., Gemmill D.; 1997; "Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus"; *Computer-Aided Design*, Volume 29, Issue 1, Pages 53-62.

Lee SJ., Kim BS.; 2023; "Two-stage meta-heuristic for part-packing and build-scheduling problem in parallel additive manufacturing"; *Applied Soft Computing*, Volume 136, 110132.

Masood S. H., Rattanawong W., Iovenitti P.; 2000; "Part Build Orientations Based on Volumetric Error in Fused Deposition Modelling"; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 16, Issues 3, Pages 162-168.

Masood S.H., Rattanawong W., Iovenitti P.; 2003; "A generic algorithm for a best part orientation system for complex parts in rapid prototyping"; *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 139, Issues 1–3, Pages 110-116.

Nyaluke A., Nasser B., Leep H.R., Parsaei H.R.; 1996; "Rapid prototyping work space optimization"; *Computers & Industrial Engineering*, Volume 31, Issues 1–2, Pages 103-106.

Oh Y., Witherell P., Lu Y., Sprock T.; 2020; "Nesting and scheduling problems for additive manufacturing: A taxonomy and review"; *Additive Manufacturing*, Volume 36, 101492.

Oh Y., Zhou C., Behdad S.; 2018; "Draft: production planning for mass customization in Additive Manufacturing: build orientation determination, 2D packing and scheduling"; *Proceedings of the ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2018*.

Padhye N., Kalyanmoy D.; 2011; "Multi-objective optimisation and multi-criteria decision making in SLS using evolutionary approaches"; *Rapid Prototyping Journal*, Volume 17, Issue 6.

Pandey P.M., Reddy N.V., Dhande S.G.; 2007; "Part deposition orientation studies in layered manufacturing"; *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 185, Issues 1–3, Pages 125-131.

Pandey P.M., Reddy N.V.; 2003; "Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modelling."; *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 132, Issues 1–3, Pages 323-331.

Pandey P.M., Thrimurthulu K., Reddy N.V.; 2004; "Optimal part deposition orientation in FDM by using a multicriteria genetic algorithm"; *International Journal of Production Research*, Volume 4, issue 19, Pages 4069-4089.

Rattanawong W., Masood S.H., Iovenitti P.; 2001; "A volumetric approach to part-build orientations in rapid prototyping"; *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 119, Issues 1–3, Pages 348-353.

Shanthar R., Chen K., Abeykoon C.; 2023; "Powder-Based Additive Manufacturing: A Critical Review of Materials, Methods, Opportunities, and Challenges"; *Advanced Engineering Materials*, Volume 25, Issue 19.

Singh D.D., Mahender T., Reddy A.R.; 2021; "Powder bed fusion process: A brief review"; *Materials Today: Proceedings*, Volume 46, Part 1, Pages 350-355.

Singh R., Gupta A., Tripathi O., Srivastava S., Singh B., Awasthi A., Rajput S.K., Sonia P., Singhal P., Saxena K.; 2020; "Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview"; *Materials Today: Proceedings*, Volume 26, Part 2, Pages 3058-3070.

Singh T., Kumar S., Seghal S.; 2020; "3D printing of engineering materials: A state of the art review"; *Materials today: proceedings*, Volume 28, Part 3 Pages 1927-1931.

Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A.L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J.M., Lavernia E.J., Eliaz N.; 2021; "Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications"; *Materials Today*, Volume 49, Pages 271-295.

Thrimurthulu K., Pandey P.M., Reddy N.V.; 2004; "Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling"; *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issue 6, Pages 585-594.

Ulu E., Korkmaz E., Yay K., Ozdoganlar O.B., Kara L.B.; 2015; "Enhancing the Structural Performance of Additively Manufactured Objects Through Build Orientation Optimization"; *Journal of Mechanical Design*, Paper No: MD-15-1175, 137(11): 111410 (9 pages).

Wang Y., Zheng P., Xu X., Yang H., Zou J.; 2019; "Production planning for cloud-based additive manufacturing—A computer vision-based approach"; *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 58, Pages 145-157.

Wang Y., Zheng P., Xu X., Yang H., Zou J.; 2019; "Production planning for cloud-based additive manufacturing—A computer vision-based approach"; *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Volume 58, Pages 145-157.

West A.P., Sambu S.P., Rosen D.W.; 2001; "A process planning method for improving build performance in stereolithography"; *Computer-Aided Design*, Volume 33, Issue 1, Pages 65-79.

Wodziak J. R., Fadel G. M., Kirschman C.; 1994; "A genetic algorithm for optimizing multiple part placement to reduce build time"; *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping*.

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*, Volume 64, 103429.

Yau H.; Hsu C.W.; 2021; "Nesting of 3D irregular shaped objects applied to powder-based additive manufacturing"; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 118, Pages 1843-1858.

Ying KC., Lin SW.; 2023; "Minimizing makespan in two-stage assembly additive manufacturing: A reinforcement learning iterated greedy algorithm"; *Applied Soft Computing*, Volume 138, 110190.

Yu C., Matta A., Semeraro Q., Lin J.; 2022; "Mathematical Models for Minimizing Total Tardiness on Parallel Additive Manufacturing Machines"; *IFAC-PapersOnLine*, Volume 55, Issue 10, Pages 1521-1526.

Zhang J., Yao X.; Li Y.; 2020; "Improved evolutionary algorithm for parallel batch processing machine scheduling in additive manufacturing"; *International Journal of Production Research*, Volume 58, Issue 8, Pages 2263-2282.

Zhang Y., Bernard A., Gupta R.K., Harik R.; 2016; "Feature based building orientation optimization for additive manufacturing"; *Rapid Prototyping Journal*, Volume 2, Issue 2.

Zhang Y., Jarosinski W., ung Y., Zhang J.; 2018 (a); "Additive manufacturing processes and equipment"; *Additive Manufacturing, Materials, Processes, Quantifications and Applications*, Pages 39-51.

Zhang Y., Bernard A., Harik R., Fadel G.; 2018 (b); "A new method for single-layer-part nesting in additive manufacturing"; *Rapid Prototyping Journal*, Volume 24, Issue 5.

Zhang Y., Gupta R. K., Bernard A.; 2015; "Two-dimensional placement optimization for multi-parts production in additive manufacturing"; *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 38, Pages 102-117.

Zhang Y., Jarosinski W., ung Y., Zhang J.; 2018; "Additive manufacturing processes and equipment"; *Additive Manufacturing, Materials, Processes, Quantifications and Applications*, Pages 39-51.

Zhang Y.; Bernard A., Harik R.; Karunakaran K. P.; 2017; "Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing"; *Journal of Intelligent Manufacturing*, Volume 28, pages 1393–1407.

Ziaee M., Crane N.B.; 2019; "Binder jetting: A review of process, materials, and methods"; *Additive Manufacturing*, Volume 28, Pages 781-801.