



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2023/2024

**Caso di studio di scheduling e nesting 3D
per una macchina singola nel contesto di
fabbricazione additiva**

Relatori:

Erica Pastore
Manuela Galati

Candidato:

Emilia Giovannini

ABSTRACT

Questa tesi esplora l'applicazione di tecniche di scheduling e nesting tridimensionale per la produzione additiva, ponendo particolare attenzione alla configurazione a macchina singola. La produzione additiva (anche nota come fabbricazione additiva o additive manufacturing) rappresenta una tecnologia innovativa con un ruolo cruciale nella quarta rivoluzione industriale, permettendo la realizzazione di oggetti finiti tramite l'aggiunta selettiva di materiale strato per strato. Il lavoro si concentra su un particolare processo di AM, la Powder Bed Fusion (PBF), analizzando i relativi parametri di processo e le metodologie di ottimizzazione per migliorare l'efficienza e la qualità del prodotto finale. Attraverso la modellazione di un modello matematico (MILP), si è tentato di ottimizzare in modo congiunto sia il posizionamento delle parti all'interno del volume di costruzione della macchina 3D, tema del nesting 3D, sia la minimizzazione del makespan, tema dello scheduling. I risultati sperimentali presentati dimostrano l'efficacia della tecnica proposta nel migliorare le prestazioni complessive del processo di produzione additiva, offrendo nuove prospettive per applicazioni industriali future.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di modellare un modello matematico (MILP) di modo da ottenere una soluzione di ottimo congiunto sia per l'aspetto del nesting tridimensionale sia per l'aspetto dello scheduling in una configurazione a macchina singola. Avendo come contesto di riferimento il contesto di fabbricazione additiva, si è scelto di approfondire in particolare modo la tecnica della fusione a letto di polvere, anche nota come Powder Bed Fusion. Su tale tecnologia di lavorazione è stato applicato il caso di studio oggetto di questo lavoro, tenendo in considerazione le relative caratteristiche e vincoli tecnologici.

In prima istanza, si esplora la tecnologia della produzione additiva nel suo complesso, presentando il processo, i molteplici materiali impiegabili e le principali tecniche di lavorazione, oltre ai relativi aspetti positivi e negativi che ne hanno permesso la diffusione in numerosi settori lavorativi. Avendo un ruolo fondamentale all'interno della quarta rivoluzione industriale, all'interno del primo capitolo è successivamente descritta la relazione fra la fabbricazione additiva e la pianificazione della produzione, ponendo particolare attenzione in seguito sul tema dell'annidamento e della schedulazione.

Successivamente, nel secondo capitolo, si approfondisce la tecnica della Powder Bed Fusion (PBF), in cui una sorgente di energia, come un laser o un fascio di elettroni, fonde e solidifica selettivamente un letto di polvere strato per strato, permettendo la produzione di componenti tridimensionali complessi con alta precisione ed eccellenti proprietà meccaniche. Sono qui analizzati i rispettivi parametri di processo, indicatori di qualità dello strato di polvere e di qualità del pezzo finito.

Il terzo capitolo è dedicato alla modellazione matematica del problema di scheduling e nesting tridimensionale, utilizzando un modello di programmazione lineare mista intera (MILP). Nel dettaglio, dopo aver descritto accuratamente il sistema di riferimento, sono presentate le assunzioni del modello, la formulazione del problema e il metodo di risoluzione adottato. Il modello matematico proposto mira alla minimizzazione del makespan, il tempo di completamento dell'ultima build (o job), ottimizzando al contempo la disposizione e l'orientamento delle parti da processare all'interno della camera di costruzione della macchina AM.

Infine, nel quarto ed ultimo capitolo, sono riportati sia il design of experiment sia il caso di studio condotto per verificare l'efficacia del modello proposto. I risultati ottenuti, oltre a consentire di valutare i successi e le limitazioni di quanto presentato, dimostrano come l'approccio sviluppato possa migliorare le prestazioni complessive del processo di produzione additiva, offrendo nuove prospettive per ulteriori approfondimenti e applicazioni future.

Questa tesi mira, dunque, a contribuire alla letteratura esistente sull'ottimizzazione dei processi di produzione additiva, offrendo soluzioni per l'ottimizzazione congiunta del nesting tridimensionale e scheduling, temi spesso invece trattati come distinti e separati, in un contesto AM con configurazione a macchina singola.

INDICE

Abstract.....	1
Introduzione.....	2
Capitolo 1: Fabbricazione Additiva e Pianificazione della Produzione	6
1.1 Introduzione alla Fabbricazione Additiva.....	6
1.1.1 Processo, materiali e tecniche di lavorazione dell'AM	6
1.1.2 Vantaggi, applicazioni e svantaggi dell'AM	8
1.2 Fabbricazione Additiva & Pianificazione della Produzione.....	10
1.2.1 La pianificazione della produzione	10
1.2.2 La pianificazione della produzione e l'Industria 4.0	11
1.2.3 La pianificazione della produzione e la Fabbricazione Additiva.....	12
1.3 Scheduling & Nesting per la Fabbricazione Additiva	23
1.4 Analisi della letteratura per la classe [M, M, S]	46
Capitolo 2: Powder Bed Fusion.....	49
2.1 Introduzione	49
2.2 Parametri di processo.....	51
2.2.1 Materiale della polvere	52
2.2.2 Distribuzione granulometrica (PSD).....	56
2.2.3 Forma della particella (analisi 2D-3D, circolarità, convessità, allungamento, ecc.)	58
2.2.4. Materiale del recoater	60
2.2.5 Forma del recoater	61
2.2.6 Parametri del processo di ricopertura, configurazione - schema di spalmatura	63
2.2.7 Spessore nominale, effettivo e reale dello strato	64
2.2.8 Parametri ambientali (temperatura, umidità, ecc.).....	65
2.3 L'importanza della fluidità della polvere	68
2.4 Gli indicatori di qualità dello strato di polvere	70
2.4.1 Rugosità superficiale dello strato.....	70
2.4.2 Livello di compattazione della polvere (densità di impaccamento della polvere – PD: packing density).....	71
2.4.3 Comparsa di difetti superficiali (crepe, separazioni, cavità, ecc.)	72
2.4.4 Accuratezza nel raggiungere lo spessore desiderato.....	73

2.5 Metodi di misurazione degli indicatori di qualità dello strato di polvere.....	74
2.6 Indicatori di qualità del prodotto finito.....	75
2.6.1 Densità – porosità	76
2.6.2 Resistenza meccanica.....	77
2.6.3 Durezza	78
2.6.4 Rugosità della superficie.....	79
2.6.5 Precisione dimensionale.....	80
2.6.6 Comparsa di difetti superficiali o interni	81
Capitolo 3: Modellazione del problema	83
3.1 Introduzione e descrizione del sistema	83
3.2 Assunzioni	84
3.3 Presentazione del problema	84
3.4 Metodo di risoluzione	86
Capitolo 4: Esperimenti e Caso di studio	92
4.1 Esperimenti – Design of Experiment.....	92
4.2 Risultati.....	94
Conclusioni.....	99
Bibliografia.....	100

CAPITOLO 1: Fabbricazione Additiva e Pianificazione della Produzione

1.1 Introduzione alla Fabbricazione Additiva

1.1.1 Processo, materiali e tecniche di lavorazione dell'AM

L'Additive Manufacturing (nota anche come Fabbricazione Additiva) è una tecnologia produttiva innovativa con un ruolo fondamentale all'interno della quarta rivoluzione industriale, visto il dialogo continuo ed efficace tra dispositivi, macchine e robot [1]. A differenza della tecnologia tradizionale, l'AM permette la realizzazione di un oggetto finito senza la sottrazione di materiale da una forma grezza iniziale. Nelle tecniche di Fabbricazione Additiva il materiale è aggiunto in maniera selettiva, strato dopo strato, coerentemente con un modello matematico del pezzo disegnato su un sistema CAD 3D.

In particolare, dopo la creazione del modello matematico tridimensionale del prodotto su un sistema CAD (Computer Aided Drafting), segue la generazione del file nel linguaggio standard dei modelli matematici dell'AM, lo Standard Triangulation Language (STL), in cui le superfici interne ed esterne del pezzo sono approssimate da triangoli di differenti dimensioni in funzione della complessità geometrica. Tramite appositi software si definisce poi l'orientamento con cui l'oggetto sarà realizzato e si generano in automatico gli eventuali supporti. Successivamente è eseguito lo slicing, la realizzazione delle diverse sezioni che andranno a costituire il modello fisico: qui il modello in formato STL subisce un'intersezione con piani paralleli distanziati l'uno dall'altro di una quantità predefinita (costante o variabile) con normale parallela all'asse z. A valle di queste fasi, segue la costruzione vera e propria dell'oggetto: la macchina di Fabbricazione Additiva, a seconda della specifica tecnica utilizzata, procede con la realizzazione del prodotto generando uno strato sopra l'altro. Infine, potranno eventualmente seguire attività di post-produzione e finitura, di modo da ottenere adeguati livelli di precisione e proprietà meccaniche del manufatto realizzato [2].

Una sintesi del processo dell'Additive Manufacturing è rappresentata in Figura 1.1:

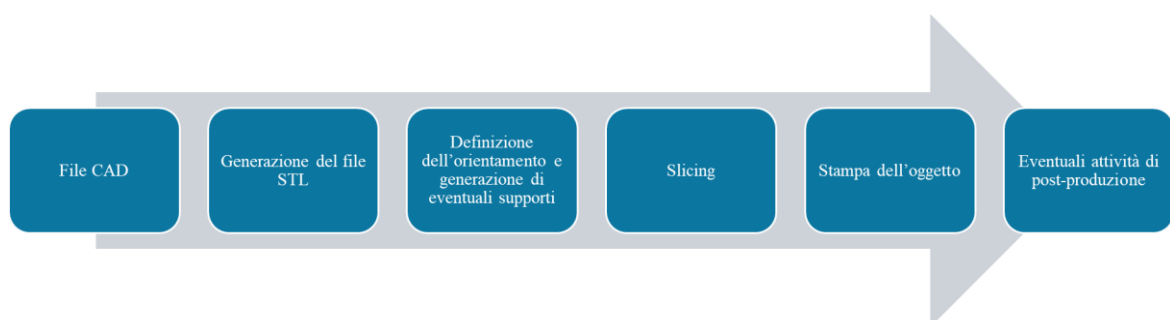


Figura 1.1: Processo della Fabbricazione Additiva in sintesi

Le tecniche di lavorazione dell'Fabbricazione Additiva sono molteplici, come ad esempio: la Stereolitografia, l'Estrusione (anche denominata Fused Deposition Modeling), la Selective Laser Sintering o l'Electron Beam Melting.

I principali materiali attualmente utilizzati dalle tecnologie di AM per la realizzazione di componenti sono i materiali polimerici, metallici, ceramici e compositi. Alcune di queste tecniche, come la 3 Dimensional Printing, sono applicabili a tutte le tipologie di materiali; altre, come la Laser Deposition, ad una categoria soltanto.

A seconda che il materiale utilizzato sia liquido, solido o sotto forma di polvere, è possibile classificare le numerose tecniche di lavorazione della Fabbricazione Additiva in tre distinti gruppi, come illustrato nella Figura 1.2:

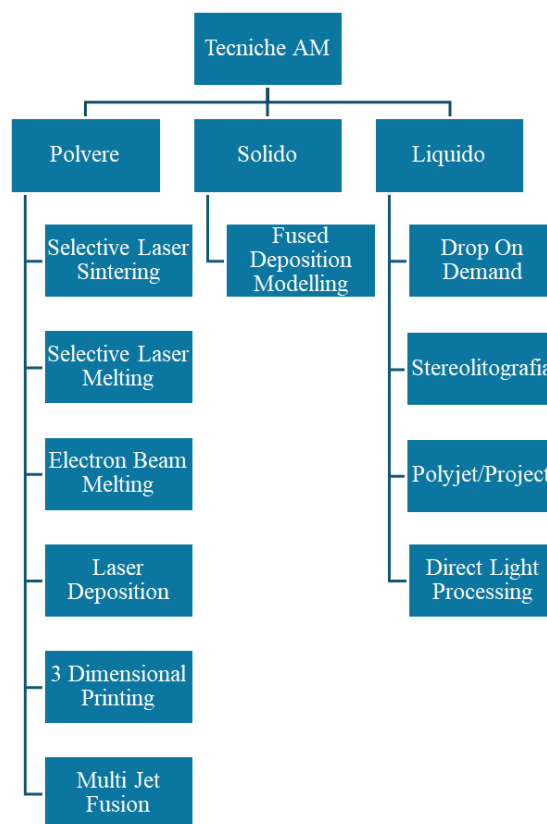


Figura 1.2: Classificazione delle tecniche di lavorazione della Fabbricazione Additiva

In particolare, tecniche di lavorazione come la Selective Laser Sintering, la Multi Jet Fusion, il Selective Laser Melting e l'Electron Beam Melting costituiscono una nota macrocategoria di processi: la Powder Bed Fusion o Fusione a Letto di Polvere. In tutti questi processi, difatti, tramite una sorgente laser o un potente fascio di elettroni porta a fusione il letto di polvere del materiale. Una volta giunto a solidificazione, una testina apposita applica un altro strato di materiale e si prosegue così fino a completamento del pezzo (nel caso in cui non si tratti di materiali metallici, non è necessariamente richiesto un supporto, dato che il

letto di polvere stesso funge da base di appoggio). La fusione del letto di polvere è utilizzata principalmente per parti funzionali a basso volume in tutti i settori e per la stampa di pezzi unici come parti di macchine, maschere e dispositivi [3].

Nonostante la vastità di tipologie di macchine di stampa 3D, ognuna di queste richiama comunque il principio della Fabbricazione Additiva: alla base del funzionamento permane la sovrapposizione di strati di materiale al fine di realizzare una precisa geometria CAD.

1.1.2 Vantaggi, applicazioni e svantaggi dell'AM

In passato, per alti volumi di produzione sono stati preferiti metodi tradizionali alla Fabbricazione Additiva, considerata difatti più adatta a volumi ridotti e altamente personalizzabili, oltre ad essere anche meno economicamente accessibile. Tuttavia, l'economia della stampa 3D è in continuo miglioramento: il costo per unità legato a questa tecnologia si sta via via riducendo ed è sempre più pratico utilizzare la stampa 3D in applicazioni con un valore incrementale più basso e volumi più elevati. Tale andamento è mostrato nella Figura 1.3 [4]:

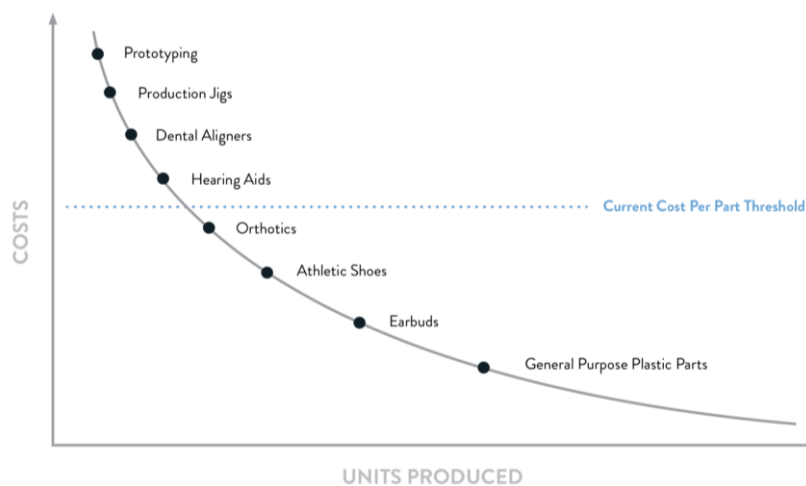


Figura 1.3: Andamento dei costi per unità prodotta con la tecnologia dell'AM

La Fabbricazione Additiva, con i suoi molteplici vantaggi come l'efficienza di produzione e con la graduale riduzione dei costi, presenta prospettive di sviluppo particolarmente positive. Dal punto di vista dei costi in particolare, un grande vantaggio nell'AM consiste proprio nel basso costo di produzione. Grazie ai sistemi di stampa 3D è possibile realizzare produzioni personalizzate o piccole produzioni in serie in maniera diretta, senza passare attraverso la realizzazione di stampi. "Additive Manufacturing" è inoltre sinonimo di scarto di lavorazione molto ridotto o addirittura nullo, comportando quindi una riduzione di costi sia per l'acquisto di materie prime sia per lo smaltimento o la trasformazione degli scarti di processo. In aggiunta, stampando un prodotto già assemblato, si riducono immediatamente

i costi della manodopera, a differenza delle filiere produttive tradizionali in cui una fase fondamentale è costituita dall'assemblaggio dei semilavorati. Un ulteriore elemento da non trascurare è l'eliminazione dei costi di trasporto del prodotto, essendo possibile inviare solamente il file CAD al cliente o a terze parti, che procederanno alla stampa 3D del pezzo finito in totale autonomia.

La Fabbricazione Additiva è dunque una tecnologia chiave sia per il tema della sostenibilità, vista la possibilità di una notevole riduzione degli scarti e di consumo di energia, sia per la ridefinizione del ruolo del dipendente all'interno dell'industria, data la possibilità di svolgere lavori di gestione/progettazione/analisi e non solamente attività manuali altamente specializzate e ripetitive.

Un altro importante vantaggio dell'AM riguarda il time to market: vale a dire, il periodo di tempo che intercorre tra la fase di ideazione - progetto e quella di commercializzazione. I nuovi software ed i nuovi sistemi di stampa 3D consentono di progettare e realizzare modelli fisici nel giro di poche ore, ottenendo dunque una notevole riduzione delle tempistiche sotto questo punto di vista. Avendo oltretutto un unico step produttivo, per passare dalla lavorazione di un elemento ad un altro non è necessario il tempo di set up, a differenza della manifattura tradizionale [5].

È inoltre assente il vincolo in merito alle forme realizzabili: il successivo deposito di sezione, strato dopo strato, assicura la creazione di forme anche non convenzionali e altamente personalizzabili, oltre che in un'ampia gamma di materiali e di dimensioni (dalla scala nanometrica a parti di grandi dimensioni). In aggiunta, i tempi e i costi di realizzazione dipendono solo dalle dimensioni del pezzo, a differenza delle tecniche tradizionali in cui il costo per ciascuna unità aumenta in maniera esponenziale al crescere della sua complessità geometrica [6].

Grazie alla sua efficienza di produzione, alla costante riduzione dei costi ed alla possibilità di progettare più liberamente rispetto alle tecnologie tradizionali, la produzione additiva è ormai usata comunemente in molti settori. L'architettura, la sanità, la paleontologia per la ricostruzione dei fossili, l'archeologia per la replica di manufatti antichi e la medicina legale per la ricostruzione di ossa o parti del corpo sono un esempio delle innumerevoli applicazioni di questa tecnologia. Le tecnologie di Fabbricazione Additiva permettono in particolare di produrre aree a sezione trasversale complessa, come le celle a nido d'ape o qualsiasi altro tipo di struttura caratterizzata da cavità e tagli che riducono il rapporto peso-resistenza. Data la possibilità di ottenere questi risultati, l'AM trova anche grande applicazione nell'industria aerospaziale e automobilistica per la produzione di strutture più leggere, che permettono sia

un consumo inferiore di carburante sia un risparmio a livello di costo, visto il minore utilizzo di materiale. Un altro ambito nel quale le potenzialità della stampa 3D possono fare la differenza è il medicale, trattandosi di un settore nel quale la personalizzazione è fondamentale: ora è possibile avere un modello osseo preciso prima di un intervento chirurgico ed effettuare così un trapianto accurato, come è anche possibile stampare tessuti umani o vasi sanguigni artificiali. La Fabbricazione Additiva permette di facilitare ad esempio anche il lavoro degli architetti, potendo per l'appunto stampare un modello 3D indipendentemente dalla complessità geometrica del progetto.

Lo sviluppo di questa tecnologia ha dunque oramai raggiunto una maturità tale da essere utilizzata in numerosi settori e da essere anche preferita alla manifattura sottrattiva tradizionale in alcuni di questi [7].

I principali svantaggi della Fabbricazione Additiva sono tuttavia ancora molteplici, come: la ridotta ripetibilità, la necessità di finitura superficiale del pezzo, la bassa velocità di produzione o l'alto costo delle materie prime, notevolmente maggiore rispetto alla tecnologia convenzionale. Sono presenti anche alcune limitazioni riguardanti il processo di lavorazione: le dimensioni dei pezzi sono vincolate alla grandezza della macchina e ogni macchina è in grado di utilizzare una ristretta gamma di materiali, limitandone così la flessibilità di produzione. Per ciò che concerne i limiti correlati al prodotto vero e proprio, risulta necessario l'inserimento di strutture di supporto: questo aspetto genera nelle zone di contatto con il componente una maggiore rugosità superficiale e dunque la necessità di un processo di post-trattamento per separare i due elementi [8].

Proprio a causa di questi fattori, l'AM non può essere considerata una tecnologia sostitutiva alla tecnologia sottrattiva tradizionale, soprattutto per la produzione di massa di parti regolari. La Fabbricazione Additiva è, invece e come già detto precedentemente, sicuramente più adatta per pezzi geometricamente più complessi e con un più alto grado di personalizzazione. Visti i differenti contesti di applicazione, è dunque bene considerare la tecnologia convenzionale e l'additiva come fra loro complementari. Nella produzione ibrida, la stampa 3D è spesso difatti un passaggio intermedio da affiancare ai metodi di manifattura convenzionali.

1.2 Fabbricazione Additiva & Pianificazione della Produzione

1.2.1 La pianificazione della produzione

La pianificazione della produzione è una funzione fondamentale nell'industria manifatturiera, poiché permette al reparto produttivo di conoscere per tempo quali commesse

dover realizzare e le annesse tempistiche di produzione, oltre che a pianificare correttamente le risorse e gli investimenti necessari. In particolare, una corretta pianificazione permette di organizzare le attività in modo efficiente, riducendo i tempi di produzione, garantendo consegne puntuali e mantenendo dunque un alto livello di servizio offerto al cliente.

La pianificazione della produzione è anche uno strumento di controllo sull'andamento della produzione, ad esempio per verificare eventuali scostamenti rispetto alle previsioni.

Questa guida fondamentale alla produzione di un determinato prodotto o servizio si articola dunque in una serie di attività, come: stima della domanda attraverso un'adeguata valutazione del mercato, scelta delle risorse più efficienti in termini di tempi e di costi, monitoraggio di ciò che sta accadendo rispetto a ciò che dovrebbe accadere secondo il piano previsto e consequenziale valutazione della convergenza a quest'ultimo.

La pianificazione della produzione ha dunque l'obiettivo di ottimizzare ogni aspetto del processo aziendale: dagli approvvigionamenti ai flussi di magazzino, dalla produzione ed il suo controllo alla distribuzione.

1.2.2 La pianificazione della produzione e l'Industria 4.0

Con l'avvento dell'Internet of Things, l'Industria 4.0 ha potuto portare l'implementazione di vari sensori sulle macchine in fabbrica per registrare lo stato delle apparecchiature, la qualità dei prodotti e degli elementi di assemblaggio durante ogni fase del ciclo produttivo. La disponibilità di tali informazioni crea, ad esempio, nuove opportunità per identificare i colli di bottiglia della produzione e per applicare una pianificazione della produzione adeguata attraverso approcci basati sui dati. Durante la pianificazione della produzione e il processo di produzione stesso arrivano difatti diversi tipi di dati da diversi tipi di **fonti**: la progettazione assistita da computer (CAD), la produzione assistita da computer (CAM), la gestione dei dati di prodotto (PDM) e la pianificazione delle risorse. La quantità di formati di dati utilizzati e strumenti IT aumenta nel corso dello sviluppo del prodotto e del processo di gestione della produzione, la cui complessità è peraltro tenuta sotto controllo nel momento in cui tutte le soluzioni specifiche lavorano in modo armonizzato e integrato.

Rispetto alla tradizionale pianificazione della produzione basata su una conoscenza statica, le fabbriche intelligenti consentono sia una vasta raccolta di informazioni in tempo reale sia la condivisione di tali informazioni da e tra prodotti, macchine, processi e operazioni. L'applicazione e lo scambio di dati da parte degli elementi di una fabbrica intelligente porta a una produzione automatizzata e decentralizzata, caratteristica essenziale dell'Industria 4.0.

Le tecnologie che consentono l'acquisizione dei dati in tempo reale stanno dunque alimentando un'importante rivoluzione nel controllo e monitoraggio della produzione. Ad esempio, i controllori logici programmabili (PLC) permettono di avere dati in tempo reale su qualità, affidabilità e prestazioni della macchina. La tecnologia Machine to Machine (M2M) fornisce invece dati ad applicazioni di controllo statistico dei processi (SPC) consentendo di produrre avvisi, grafici e report in tempo reale.

Si può quindi affermare che i dati in tempo reale sono uno dei catalizzatori più potenti per favorire la crescita dell'efficienza di produzione: grazie ad essi la qualità delle decisioni va migliorando ed è possibile soddisfare una serie diversificata di esigenze in ogni fase della produzione.

1.2.3 La pianificazione della produzione e la Fabbricazione Additiva

La pianificazione della produzione, come già sottolineato, è un aspetto cruciale di qualsiasi processo di produzione e la Fabbricazione Additiva non fa eccezione. Anche in AM, dunque, una pianificazione della produzione efficace implica una produzione efficiente e tempestiva di parti, riducendo al minimo i costi e massimizzando la qualità del pezzo finito.

Un'efficiente ed efficace pianificazione della produzione per i contesti di Fabbricazione Additiva è particolarmente importante anche per via degli elevati costi di acquisto delle rispettive macchine industriali, i quali portano le aziende a esternalizzare la propria produzione a servizi AM specializzati. Questo aspetto fa sì che i fornitori di tali servizi debbano pianificare la produzione di un insieme molto eterogeneo di parti, richieste peraltro da differenti clienti distribuiti. Al contempo, l'AM si sta attualmente espandendo grazie all'evoluzione delle piattaforme di produzione cloud che integrano diverse macchine AM di diversi produttori distribuiti. Il risultato è un ambiente molto complesso, in cui un insieme di clienti distribuiti richiede la produzione di parti differenti tramite una serie di macchine AM distribuite in più località. Ad esempio, nell'articolo di Emmelmann et al. del 2018 è presentata una piattaforma basata su cloud per l'elaborazione degli ordini [9]. In particolare, tramite un'interfaccia web i clienti possono caricare i file che descrivono in dettaglio il prodotto che desiderano sia realizzato dal fornitore, selezionando anche le fasi di post-elaborazione richieste. Dopo l'effettuazione dell'ordine sulla piattaforma, gli ordini sono poi automaticamente spediti all'unità produttiva del fornitore.

Le fasi chiave della pianificazione della produzione, in particolare per l'AM, sono molteplici:

- Ottimizzazione delle risorse: la pianificazione della produzione consente di ottimizzare l'uso delle risorse disponibili, come macchine per la stampa 3D, materiali e manodopera, permettendo dunque di massimizzare l'efficienza e ridurre i costi di produzione.
- Pianificazione e previsione della domanda: prevedere accuratamente la domanda futura delle parti prodotte è essenziale per garantire un'adeguata allocazione delle capacità e delle risorse. Questo aspetto comporta l'analisi dei dati storici, delle tendenze del mercato, delle proiezioni dei clienti e dei loro bisogni.
- Priorità e pianificazione degli ordini: una volta compresa la domanda, gli ordini devono essere prioritizzati e pianificati in base a caratteristiche come la data di consegna, l'urgenza del cliente e/o la complessità della produzione. Una pianificazione della produzione adeguata assicura che i prodotti stampati in 3D siano consegnati in modo tempestivo ai clienti.
- Progettazione e preparazione delle parti: le parti AM sono progettate utilizzando software di modellazione 3D, assicurando che soddisfino le specifiche di progettazione, che siano producibili e che utilizzino efficacemente il volume di costruzione disponibile. Quanto detto comporta l'ottimizzazione della selezione dei materiali, dell'orientamento delle parti e delle strutture di supporto.
- Selezione e assegnazione delle macchine: le macchine AM appropriate sono selezionate in base al materiale, alla finitura superficiale richiesta e alle dimensioni della parte, tenendo anche ovviamente conto della loro disponibilità e capacità. Un aspetto importante da tenere in considerazione per l'ottimizzazione dell'utilizzo delle macchine è la loro eventuale eterogeneità, poiché possono avere differenti volumi di costruzione, diverse capacità di materiale e variabili velocità di elaborazione.
- Nidificazione e preparazione della build: le parti sono nidificate all'interno del volume di costruzione della macchina AM selezionata per massimizzare l'utilizzo dello spazio e ridurre gli sprechi di materiale. Ciò comporta l'ottimizzazione della posizione e dell'orientamento delle parti, oltre che a quello dei loro supporti, tenendo comunque sempre in considerazione potenziali guasti di costruzione.
- Monitoraggio e controllo della produzione: il processo AM è monitorato per garantire il rispetto degli standard di qualità, tenere traccia dei progressi e identificare eventuali potenziali problemi. Questo aspetto può comportare il monitoraggio in tempo reale della temperatura, della potenza del laser e del deposito di materiale. Oltre a ciò, è anche necessario tener continuamente in considerazione la variabilità

del processo, presente a causa di fattori quali le proprietà dei materiali, le condizioni ambientali e la calibrazione delle macchine: la pianificazione della produzione deve difatti incorporare buffer e piani di contingenza per affrontare potenziali interruzioni o guasti di produzione.

- Post-produzione e finitura: una volta costruite, le parti possono richiedere fasi di post-produzione come la rimozione dei supporti, la finitura superficiale e il trattamento termico. Queste fasi assicurano che il prodotto finale soddisfi le specifiche richieste e a monte la pianificazione della produzione deve dunque considerare sia l'eventuale necessità di supporti strutturali ad hoc sia tecniche di post-produzione specifiche, soprattutto in casi di elevata complessità geometrica. Dato che l'AM, rispetto alla tecnologia tradizionale, offre una maggiore flessibilità nella progettazione e produzione di componenti complessi, la pianificazione della produzione aiuta per l'appunto a gestire questa ulteriore complessità.
- Controllo qualità e ispezione: a valle della produzione, le parti sono sottoposte a controlli di qualità per garantire che soddisfino gli standard di accuratezza dimensionale, proprietà del materiale e qualità superficiale.
- Gestione dell'inventario: la produzione su richiesta è una delle caratteristiche chiave dell'AM. La pianificazione della produzione contribuisce a ridurre al minimo l'inventario e a garantire che i materiali siano disponibili solo quando necessario, riducendo così i costi associati all'immagazzinamento e al mantenimento.
- Sostenibilità e gestione dei rifiuti: la Fabbricazione Additiva è nota per la sua capacità di ridurre i rifiuti rispetto ai processi tradizionali di produzione e una pianificazione adeguata può contribuire a minimizzare gli sprechi, consentendo una produzione su misura ed evitando la sovrapproduzione.
- Miglioramento continuo: i processi di pianificazione della produzione sono continuamente rivisti e migliorati sulla base dei feedback che arrivano dai dati di produzione, dai clienti e dai progressi del settore, garantendo così strategie di pianificazione della produzione sempre più efficienti e adattabili.

La pianificazione della produzione è dunque cruciale anche nella Fabbricazione Additiva poiché aiuta a ottimizzare i processi di produzione, a garantire la qualità e la puntualità dei prodotti, a ridurre i costi e a gestire la complessità associata alla stampa 3D.

L'analisi della letteratura sull'AM e la pianificazione della produzione mostra come la ricerca in questo campo sia in costante evoluzione per affrontare continue sfide e sfruttare le opportunità che questa tecnologia offre.

La natura digitale dell'AM consente la produzione su domanda direttamente dai file CAD e, oltre a eliminare le scorte di prodotto e i costi associati, può anche incoraggiare la collaborazione e l'innovazione aperta, avvicinando clienti e produttori e talvolta confondendo il confine tra i due, portando al concetto di prosumer (cioè, colui che simultaneamente è sia consumatore sia produttore di un bene o un servizio).

Consentendo l'AM, dunque, la produzione su richiesta e la personalizzazione dei prodotti, gli studi hanno esplorato come le strategie di pianificazione debbano essere adattate per gestire la flessibilità e la variabilità della produzione risultanti da queste caratteristiche. A tal proposito, nell'articolo di Kapadia et al. del 2019, poi approfondito in seguito, si studia l'impatto delle politiche di schedulazione sul tempo di ciclo e sulla produttività di un impianto di produzione additiva [10]. A differenza della pianificazione, la quale si trova a livello tattico ed è eseguita con una minor frequenza, la schedulazione si trova a livello operativo ed è eseguita quotidianamente. In particolare, qui si combina un'euristica di posizionamento delle parti con differenti politiche di pianificazione (FIFO ed Early Due Date) per ottimizzare simultaneamente sia la disposizione delle parti all'interno della camera di costruzione delle macchine AM sia le prestazioni di consegna. Tramite simulazioni con un modello IOS (Iterative Optimization-based Simulation) che integra un motore di simulazione (implementato in SIMIO) con un motore computazionale (implementato in MATLAB) si dimostra come le politiche di pianificazione abbiano un impatto più che significativo sul tempo di ciclo e sul ritardo degli ordini.

Al fine di garantire un'alta redditività ed efficienza dei processi, la pianificazione della produzione nell'AM ha fra i suoi principali obiettivi, dunque, l'ottimizzazione dell'uso delle risorse: macchinari, materiali e manodopera. In particolare, nell'articolo di Baumung et al. del 2018 si sottolinea come sia necessario programmare i lavori di stampa tali da essere avviati e terminati all'interno degli orari di lavoro del personale, di modo che sia effettuato il prelievo e la fornitura dell'apposito materiale alle apparecchiature AM [11]. Affinché ciò avvenga, è necessario allocare e scalare dinamicamente gli oggetti da stampare tra le stampanti disponibili in base alle esigenze e alle ore di lavoro degli operatori. Ciò significa che i lavori di stampa non sono assegnati in modo permanente alle stampanti con un numero predefinito di parti, ma le parti corrispondenti sono raggruppate e allocate in base alla domanda e alla disponibilità attuale. Il raggruppamento è effettuato anche in base al processo

di produzione e/o alle configurazioni speciali; in particolare all'interno di ogni raggruppamento i modelli possono ad esempio essere ordinati in base alla data di completamento o in base al tempo di processamento. Per il calcolo dei possibili tempi di produzione sono dunque necessari dati aggiuntivi come i tempi di lavoro dei dipendenti disponibili, i quali comprendono il tempo necessario per la rimozione, la fornitura del materiale o la manutenzione, e dipendono dal numero di macchine di produzione da controllare e dalle tecnologie di produzione utilizzate. Queste attività devono perciò essere definite e pianificate come variabili in base alle loro caratteristiche, ai macchinari utilizzati e ai turni di lavoro.

Nella Figura 1.4 si può osservare il modello ottimizzazione per la pianificazione temporale dei lavori di stampa nell'articolo appena nominato [11]:

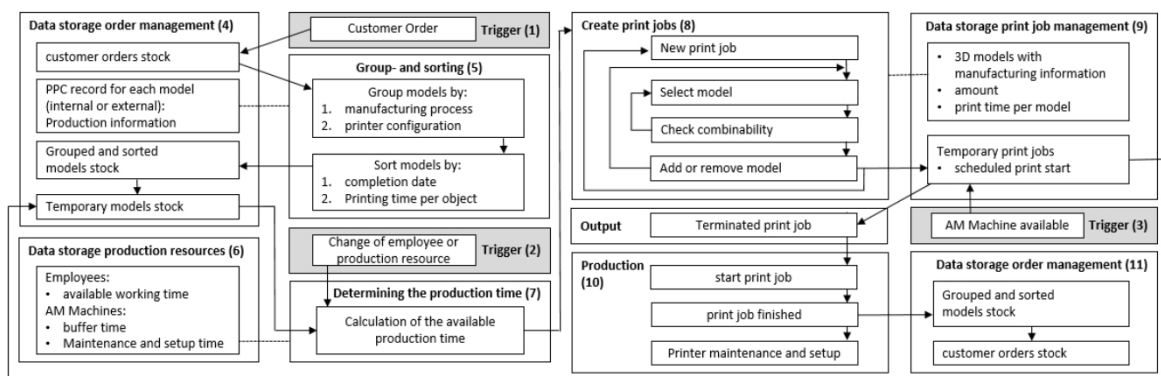


Figura 1.4: Esempio di modello di ottimizzazione per la pianificazione temporale dei lavori di stampa

Molte ricerche si sono concentrate sul miglioramento dell'integrazione dell'AM nei processi di produzione esistenti sotto l'aspetto del controllo della produzione, come ad esempio trattato nell'articolo di Ziegler et. al del 2021 [12]. In particolare, qui è proposto un approccio al sistema di controllo della produzione per una produzione ibrida additiva-sottrattiva nel settore aerospaziale. A causa degli elevati requisiti di sicurezza nel settore aerospaziale, si pone particolare enfasi sulle fasi di post-elaborazione come il disimballaggio, la pulizia, il trattamento termico e il controllo di qualità.

Per produrre componenti per uso industriale, tutti i processi AM richiedono generalmente le fasi pre, in e post-elaborazione. La fase di pre-elaborazione comprende passaggi che influenzano la preparazione del processo SLM, come l'annidamento (o nidificazione) che determina la quantità e l'orientamento delle parti prodotte simultaneamente in un ciclo, avendo come obiettivo quello di aumentare l'utilizzo della macchina (oltre a garantire le proprietà desiderate dei componenti e al tempo stesso un funzionamento senza collisioni). L'annidamento e la determinazione della densità dell'imballaggio sono fattori molto

importanti per la qualità del componente e le sue proprietà meccaniche, soprattutto nel contesto dell'aerospaziale. Segue la fase in-processing che comprende tutte le fasi del processo che possono essere assegnate al processo AM vero e proprio ed infine la fase di post-elaborazione, che comprende invece tutte le operazioni necessarie per ottenere componenti di alta qualità. I pezzi generati tramite tecniche di Fabbricazione Additiva spesso hanno una qualità superficiale e una precisione dimensionale non ottimale, per soddisfare le specifiche funzionali sono dunque necessarie complesse procedure di rielaborazione delle superfici funzionali e controlli di qualità. La post-elaborazione normalmente coinvolge processi di produzione convenzionali, come il trattamento termico, la segatura, la rettifica, ecc. Quanto appena descritto è dunque un semplice esempio di ciò che si traduce in una catena di processi ibrida additiva-sottrattiva.

Per la pianificazione della produzione, molti degli approcci si concentrano sulla schedulazione del lavoro di costruzione presentando un modello di scheduling a macchina singola per l'AM e di cui l'obiettivo principale è ridurre i costi massimizzando l'utilizzo dello spazio. Tuttavia, questi approcci trascurano le fasi di post-elaborazione, per l'appunto fondamentali per un elevato livello di rispetto delle date di consegna.

A causa degli elevati tempi di lavorazione della SLM è importante ottenere la massima densità di imballaggio possibile per ogni ciclo di costruzione (build). Baumung & Fomin nel loro lavoro del 2018, come già descritto precedentemente, presentano un approccio di modellazione che considera esclusivamente il nesting confrontandolo con gli orari dei turni dei lavoratori, al fine di generare il massimo utilizzo possibile dello spazio di lavoro [11]. In caso di controllo qualità fallito, il loro algoritmo è in grado di innescare una nuova proposta di annidamento. La formazione della sequenza avviene in base alla prima data di pianificazione.

Gli autori Denkena et al. nel 2019 hanno sviluppato invece una metodologia per la pianificazione della produzione basata sui costi e utilizzabile principalmente nelle catene di processi esclusivamente additivi, tenendo comunque conto dei costi per la post-elaborazione interna o esterna [13]. Questo approccio è particolarmente utile per una fase iniziale di pianificazione della produzione; pertanto, nessun aggiustamento a breve termine dovuto a eventi imprevisti come le rilavorazioni o guasti dei macchinari nella produzione corrente sono qui presi in considerazione.

Come mostrato negli approcci descritti, esistono diverse soluzioni relative alla schedulazione e nidificazione delle varie parti da produrre; tuttavia, nessuna delle soluzioni descritte è adatta per il contesto di produzione a cui si fa riferimento nell'articolo [12], vale

a dire alla produzione industriale in serie di componenti aerospaziali in una catena di processo ibrida additiva-sottrattiva, oltre al fatto che si trascura il controllo della produzione. Il controllo della produzione è, difatti, uno strumento essenziale che consente alle imprese di monitorare costantemente i parametri di funzionamento delle macchine, individuare in anticipo i guasti e reagire agli imprevisti con tempestività senza rallentare o danneggiare i processi produttivi. La capacità di reagire rapidamente agli eventi imprevisti all'interno della catena di produzione è decisiva per raggiungere un elevato livello di rispetto delle date di consegna, mantenendo al tempo stesso brevi i tempi di produzione. A questo punto, si rivela nuovamente di particolare importanza la pianificazione della produzione, vista la grande influenza che ha sul raggiungimento di importanti indicatori chiave di prestazione, come il rispetto delle date di consegna.

Per il controllo della produzione nell'ambito dell'AM è necessario essere in grado di reagire tempestivamente agli eventi durante il processo di produzione e a questo scopo è utilizzata l'archiviazione decentralizzata dei dati per il monitoraggio degli ordini. Inoltre, per evitare il sopraggiungere di nuovi costi è necessaria l'identificazione in tempo reale dei difetti basati sui componenti e sulle risorse, così da avviare immediatamente la rilavorazione o eliminare i componenti difettosi.

Le attività che contribuiscono a raggiungere un elevato livello di rispetto delle date di consegna includono il rilascio degli ordini, il sequenziamento e il controllo della capacità. Nella catena di processi ibridi additivo-sottrattivo, la risorsa collo di bottiglia generalmente è la macchina AM. Una volta completato un ordine in corrispondenza del collo di bottiglia, è rilasciato per la produzione il successivo ordine più urgente. La data di inizio pianificata dell'ordine, originariamente determinata durante la pianificazione del lead time, determina dunque l'ordine successivo più urgente. Il rilascio degli ordini secondo tale processo dipendente dal carico può però potenzialmente bloccare ordini la cui data di inizio pianificata è ormai nel passato, comportando così un impatto negativo sul rispetto delle date di consegna. Di conseguenza, il controllo dei colli di bottiglia in concomitanza con l'emissione dell'ordine entro la scadenza è la soluzione ideale. Pertanto, nell'ambito del concetto di controllo introdotto nel documento di Ziegler et al. del 2021, il sequenziamento ad esempio secondo il principio FIFO (first-in-first-out) non è appropriato, poiché si ometterebbe il potenziale del sequenziamento stesso.

Un'altra possibilità che potrebbe garantire l'affidabilità delle consegne è l'adattamento a breve termine delle capacità produttive, aumentando il numero delle risorse di produzione o l'orario di lavoro dei dipendenti con ore di straordinario. Gli straordinari e/o addirittura i

turni aggiuntivi sono però avviati solamente previa consultazione con i dipendenti direttamente interessati, non rendendo tale azione implementabile automaticamente nell'approccio di controllo della produzione. Inoltre, nella maggior parte dei casi un adeguamento a breve termine della capacità è possibile solo parzialmente ed il numero di risorse operative diventa a quel punto un fattore eccessivamente vincolante.

Nell'articolo degli autori Ziegler et al. del 2021 è utilizzata dunque la generazione di sequenze in base alla prima data di fine pianificata: con questo approccio gli ordini da elaborare hanno la priorità in caso di rielaborazione o di rifiuto ed in questo modo la scadenza del piano è l'unico indicatore oggettivamente significativo con cui è possibile valutare l'urgenza del rispetto delle date di consegna [12].

La connessione di macchine in un ambiente di rete, elemento caratterizzante del contesto di Industria 4.0, può fornire la base per l'implementazione di un sistema di produzione distribuito integrato. Con l'AM distribuito in diverse località, la pianificazione della produzione deve affrontare sfide legate alla coordinazione tra siti di produzione e in letteratura, inerentemente a questo tema, è stata trattata la gestione di una rete di produzione distribuita. In particolare, nell'articolo degli autori di Durão et al. del 2021 si afferma che la produzione di prodotti distribuiti in luoghi più vicini al punto di utilizzo finale può avere diversi vantaggi, come la riduzione dei costi logistici e dei livelli di inventario nella catena di fornitura, ma anche molte sfide da sostenere in merito agli standard, al controllo della qualità e alla gestione delle informazioni tra i diversi siti produttivi [14]. Questo articolo introduce un approccio alla produzione additiva distribuita di parti di ricambio basato sulle tecnologie dell'Industria 4.0. Lo scenario è stato oggetto di studio presso l'Università Tecnica di Darmstadt (TUD), in Germania, e l'Università di San Paolo (USP), in Brasile, dove quest'ultima rappresenta il sito di produzione distribuita e la TUD la fabbrica centrale. Tale scenario è stato implementato in quattro casi d'uso, dove ognuno si distingue per il differente livello di integrazione fra fabbrica centrale e sito di distribuzione distribuita. I casi d'uso sono stati progettati per specificare e testare diverse configurazioni del rapporto tra fabbrica centrale e sito distribuito, con l'obiettivo di identificare le principali differenze e i requisiti tra i vari livelli di integrazione.

La produzione può essere centralizzata, servendo tutto il mondo da un unico luogo, o distribuita, cioè, localizzata in varie località più vicine al mercato finale. La produzione centralizzata facilita l'implementazione di processi, procedure standard e la garanzia di qualità; tuttavia, comporta tempi di consegna più lunghi, maggiori scorte e costi logistici più elevati. D'altra parte, la produzione distribuita apporta benefici al sistema produttivo,

fornendo una maggiore reattività e flessibilità, una migliore efficienza e una maggiore affidabilità della catena di fornitura. Avvicinare la produzione ai mercati di consumo aumenta sostanzialmente la reattività e la flessibilità, caratteristiche fondamentali per aiutare a superare l'imprevedibilità della domanda. Si deve però comunque sottolineare che con la produzione distribuita aumenterebbero i costi transazionali e gli sforzi di coordinamento rispetto alla produzione centralizzata; dunque, la sfida consiste nell'implementare tecnologie di comunicazione e integrazione che vadano a ridurre lo sforzo di coordinamento. Si devono inoltre considerare altri effetti: ci sono vantaggi per quanto riguarda i costi logistici, ma vi è anche il rischio di perdere la proprietà intellettuale (PI) e sostenere dunque i costi relativi alla sua protezione.

A partire dagli anni '70 fino ad oggi, la terza rivoluzione industriale è stata caratterizzata da rapidi progressi nell'Information Technology, nell'elettronica e nella digitalizzazione, culminando poi nella quarta rivoluzione industriale recentemente avviata. L'Industria 4.0 è caratterizzata da quattro approcci tecnologici: l'impiego di sistemi cyber-fisici nella creazione e nell'utilizzo dei prodotti, lo scambio di informazioni e la comunicazione basati sulla tecnologia Internet, i componenti come portatori di informazioni e il concetto olistico di sicurezza e protezione. Per applicare queste nuove capacità e collegare in rete persone, risorse e macchine in sistemi di produzione cyberfisici (CPPS), è necessaria un'adeguata infrastruttura di tecnologia dell'informazione e della comunicazione (TIC). I siti produttivi stanno diventando rapidamente adattivi, pur rimanendo economicamente produttivi: questa situazione consente di decentralizzare la produzione attraverso compiti autonomi basati sui CPPS. Le fabbriche intelligenti saranno collegate in rete in una collaborazione tra aziende, condividendo le informazioni rilevanti in un database e creando così un ambiente dinamico. L'implementazione delle fabbriche intelligenti è possibile considerando l'evoluzione delle tecnologie manifatturiere e informatiche, essendo in grado di ricevere diverse informazioni da varie fonti e di produrre articoli più complessi in tempi ridotti.

L'industria 4.0, i sistemi di produzione cyber-fisici (CPPS) e l'IOT industriale hanno dunque un'influenza significativa sulla pianificazione e sulla supervisione della produzione. L'implementazione di CPPS fa nascere diverse sfide per le industrie, in particolare per quanto riguarda l'estrazione di informazioni da fonti di dati eterogenee, le interazioni con i sistemi di informazione sulla produzione, nonché la mutabilità, l'adattabilità e la riconfigurabilità nella gestione della produzione.

Come già detto, sono stati implementati e simulati quattro diversi casi d'uso in cui si considerano diversi livelli di decentralizzazione. Nel primo caso si simula una produzione distribuita convenzionale: la fabbrica centrale ha poca influenza sul processo di produzione del sito distribuito ed invia solamente le richieste di produzione e il corrispondente modello di dati del prodotto (proprietà intellettuale) da produrre; il sito distribuito riceve invece le informazioni, imposta la macchina e avvia la produzione. D'altra parte, nel quarto caso si simula la maggiore connessione tra la fabbrica centrale e il sito distribuito: il sito distribuito non ha alcun controllo sulle macchine o su ciò che è prodotto; la fabbrica centrale ha invece pieno accesso ai dati monitorati e può condurre e controllare autonomamente la produzione. In questo modo, si implementa un sistema di produzione cyber-fisico e le informazioni sulla produzione sono inviate via Internet dalla fabbrica centrale direttamente alla macchina del sito distribuito. Il secondo ed il terzo caso rappresentano situazioni intermedie. In tutti e quattro i casi d'uso, il processo di produzione segue una procedura generale: si richiede l'ordine, si avvia la produzione, si monitora il processo e si esegue il controllo di qualità.

Per un'implementazione adeguata dello scenario, è stata effettuata una selezione adeguata di software e hardware per soddisfare le esigenze di comunicazione e integrazione tra i due siti. Per gestire i dati di prodotto e controllare i flussi di informazioni attraverso i confini organizzativi e di sistema, è stato utilizzato il sistema di gestione del ciclo di vita del prodotto (PLM) PTC Windchill. Il sistema PLM funge da repository centrale per la gestione e la distribuzione delle informazioni e funge da hub di integrazione per tutti i sistemi coinvolti, fornendo funzionalità di gestione degli elementi, dei privilegi, dei file e dei flussi di lavoro. Oltre che per l'integrazione in Internet, per simulare il collegamento in rete tra la fabbrica centrale e il sito distribuito è stata invece utilizzata l'interfaccia web OctoPrint. Tale interfaccia consente di inviare in remoto il file G-Code e gli ordini di produzione, controllare il processo AM stesso ed accedere al controllo della macchina tramite VPN. Essendo perciò possibile inviare, ricevere e visualizzare file G-Code, l'ordine di produzione può essere inviato istantaneamente dalla fabbrica centrale al sito distribuito e si rende possibile il monitoraggio delle condizioni del processo di produzione additiva, fornendo grafici di feedback relativi a parametri quali temperatura, accelerazione, ecc. Ulteriori attività di ricerca dovranno concentrarsi sulla standardizzazione e sull'automazione dello scenario AM introdotto, rendendosi perciò necessaria una definizione più precisa delle interfacce tra i sistemi e l'applicazione di formati e protocolli standardizzati per lo scambio di informazioni.

In questo contesto la produzione additiva distribuita di pezzi di ricambio porta dunque a un cambiamento di paradigma nelle reti aziendali nel modo in cui i prodotti sono fabbricati e nel modo in cui gli utenti interagiscono con questi prodotti. In questo modo, l'articolo [14] mostra le premesse per l'implementazione di un vero e proprio ambiente di produzione distribuito che include macchine AM per la produzione e macchine CNC per la finitura delle parti. Potenzialmente, Industria 4.0 e AM, come descritto in questo documento, possono supportare lo sviluppo di una produzione distribuita con il necessario controllo centrale del processo.

L'AM può essere più sostenibile rispetto ai processi di produzione tradizionali, ma ciò dipende dalla gestione della produzione. Alcune ricerche hanno esaminato come la pianificazione della produzione possa integrare obiettivi di sostenibilità. Le tecnologie di fabbricazione sono spesso descritte come processi "puliti", proprio perché è utilizzata solo l'esatta quantità di materiale necessaria per la costruzione del pezzo, limitando la produzione di scarti. Inoltre, anche l'energia consumata per produrre i pezzi è limitata, come è stato dimostrato dagli autori Serres et al. nel 2011, confrontando il processo di fabbricazione additiva con quello di lavorazione convenzionale [15]. Questo documento va dunque a dimostrare come l'impatto ambientale totale sia molto maggiore nel caso della lavorazione meccanica rispetto al processo AM, il quale risulta essere difatti molto più rispettoso dell'ambiente (con una riduzione dell'impatto ambientale di circa il 70%). A livello energetico, il motivo per cui la fabbricazione additiva presenta un così ridotto impatto ambientale è principalmente dovuto al processo di atomizzazione: processo necessario alla creazione della polvere che richiede un consumo energetico limitato, considerando anche che tale consumo energetico è utilizzato per produrre grandi quantità di polvere. D'altra parte, il processo tradizionale richiede più operazioni, come l'elaborazione degli elettrodi, la tornitura, la foratura, la fresatura, ecc. e tutte queste fasi aumentano inevitabilmente l'impatto ambientale della lavorazione. Quasi il 90% del dispendio energetico per il processo AM è generato dalla lavorazione delle polveri; nel caso invece delle lavorazioni meccaniche, una parte importante è sì dovuta al consumo di materiale, ma una parte ancora più significativa è da attribuire al consumo energetico di tutti i motori utilizzati per costruire la parte meccanica.

1.3 Scheduling & Nesting per la Fabbricazione Additiva

Lo scheduling e il nesting sono due concetti fondamentali nell'ambito della Fabbricazione Additiva, poiché entrambi cruciali per ottimizzare l'efficienza e la produttività nella stampa 3D.

Lo scheduling, o schedulazione, si riferisce alla gestione del tempo e delle risorse durante il processo di produzione ed è in particolare il processo di pianificazione dell'ordine di produzione che garantisce che le parti siano prodotte in modo efficiente e puntuale. Nell'ambito dell'AM, lo scheduling si occupa di organizzare e ottimizzare la sequenza di stampa degli oggetti (parti), tenendo conto di vari fattori come la dimensione degli oggetti, la complessità della geometria, i materiali utilizzati e le caratteristiche della stampante 3D. Un buon programma di schedulazione mira a ridurre i tempi di attesa, massimizzare l'utilizzo delle risorse e minimizzare gli sprechi.

Il nesting, o annidamento o nidificazione, è un processo di disposizione ottimizzata degli oggetti sulla piattaforma di stampa 3D in modo da massimizzare l'efficienza del processo. Questo processo implica posizionare gli oggetti in modo che occupino meno spazio possibile nel volume di costruzione disponibile e che si adattino perfettamente tra loro, riducendo al minimo gli sprechi di materiale e gli spazi vuoti nella piattaforma di stampa, oltre ad ottimizzare i tempi di stampa. Questo processo è particolarmente importante quando si stampa con materiali costosi o limitati, poiché riduce i costi associati agli sprechi di materiale.

L'implementazione efficace di queste pratiche può portare a una produzione più intelligente e sostenibile nel campo della stampa 3D.

Nella strutturazione dello scheduling e del nesting della Fabbricazione Additiva sono da considerare numerosi fattori, come: le dimensioni e la forma delle parti, il materiale utilizzato, la risoluzione della stampante 3D, i tempi di stampa ed i requisiti di consegna.

Esistono diversi approcci al nesting e allo scheduling nell'AM, distinguendo un primo approccio a due fasi, in cui lo scheduling ed il nesting sono eseguiti in due fasi distinte, ed un approccio a fase unica, in cui lo scheduling ed il nesting sono eseguiti nella stessa fase simultaneamente. La scelta dell'approccio più appropriato dipende da una serie di fattori, tra cui la complessità del lavoro, le esigenze del cliente e le risorse disponibili. I moderni sistemi di produzione additiva integrano spesso il nesting e lo scheduling, consentendo di ottimizzare l'utilizzo delle risorse e di migliorare l'efficienza della produzione.

Poiché l'AM consente l'elaborazione in batch di più parti all'interno dello stesso volume di

costruzione, si sono rivelati necessari vari metodi di annidamento per posizionare nel modo più adeguato gli oggetti nello spazio limitato, di modo da ottimizzare la produzione degli stessi. Dalla metà del 2010 il tema del nesting è stato affrontato con il tema della schedulazione per l'assegnazione delle parti da produrre alle macchine AM proprio al fine di ridurre al minimo tempi e costi di produzione.

Dato che la produzione tradizionale di solito affronta i problemi di nidificazione e schedulazione separatamente, ogni problema è specificato con le relative tassonomie specializzate e ciò fa sì che le tassonomie esistenti siano limitate nel coprire in modo completo sia gli argomenti di nidificazione che quelli di schedulazione. Per fornire una visione olistica che copra entrambi gli argomenti, l'articolo di Oh et al. del 2020 propone una tassonomia alternativa basata su tre dimensioni: parte, build e macchina AM (peraltro utilizzata anche in altri articoli, come nell'articolo degli autori di De Antón et. al del 2022 [17]) [16]. Considerando le combinazioni delle tre dimensioni, sono definite sei classi per identificare e raggruppare le caratteristiche e le tipologie dei problemi. Inoltre, sono aggiunti otto criteri supplementari per perfezionare ulteriormente l'organizzazione degli articoli di ricerca all'interno di tali classi. In questo articolo sono stati classificati 53 documenti tecnici e ne sono state discusse le questioni critiche, riportando qui quelli/e principali.

Visto l'aumento della quantità e della diversità delle parti prodotte tramite tecniche additive, si rivelano sempre più necessari approcci di gestione operativa efficienti per la produzione di grandi quantità di parti eterogenee. Ciò comporta la ricerca di un continuo miglioramento della gestione della produzione e dunque una grande attenzione per le metodologie di annidamento e schedulazione.

Quando si elabora un lotto di parti, i metodi di annidamento sono utilizzati per il corretto posizionamento geometrico degli oggetti (identici o non identici) nello spazio di costruzione di una macchina AM. In generale, gli obiettivi dei problemi di annidamento per la Fabbricazione Additiva sono massimizzare il numero di parti lavorate simultaneamente o ridurre al minimo i tempi e i costi di costruzione di una singola operazione di una macchina AM. La schedulazione per l'AM si concentra invece sul miglioramento della produttività sequenziando e assegnando i carichi di lavoro alle macchine AM.

I problemi di schedulazione basati su AM hanno tre caratteristiche principali rispetto ai tradizionali problemi di schedulazione basati sui batch. In primo luogo, mentre il tempo di elaborazione per ciascun batch è solitamente fisso nei problemi di schedulazione tradizionali, il tempo di costruzione per ciascuna build è un fattore incerto nei problemi di

schedulazione basati su AM, poiché una macchina AM consente di produrre geometrie diverse per ciascun ciclo di costruzione.

In secondo luogo, a differenza dei tradizionali problemi di schedulazione, i problemi di nidificazione AM sono spesso considerati nei problemi di schedulazione; pertanto, le decisioni sugli orientamenti di costruzione, sulle posizioni, sui gruppi di parti nella fase di nidificazione influenzano concretamente gli obiettivi (solitamente minimizzando tempi e costi) della fase di schedulazione.

Infine, rispetto alle tecnologie tradizionali, i problemi di schedulazione basati su AM considerano una relativamente alta varietà di ordini dei clienti, avendo l'AM il vantaggio nel produrre parti eterogenee per la personalizzazione di massa. Inoltre, solitamente il numero di parti per ordine è minore in AM (può capitare di avere anche una parte per ordine).

Nella produzione tradizionale, gli approcci di nesting e scheduling sono considerati separatamente nelle diverse fasi di pianificazione: i problemi di nidificazione sono generalmente gestiti durante la pianificazione del processo da progettisti di processo; d'altra parte, i problemi di schedulazione sono per lo più affrontati nella e nel controllo della produzione da parte dei responsabili della produzione. Pertanto, ci sono pochi studi che trattano contemporaneamente sia gli approcci di nidificazione che quelli di schedulazione nel contesto delle tecnologie tradizionali.

Nella produzione additiva invece i metodi di nesting utilizzati nella pianificazione dei processi spesso incorporano aspetti legati alla pianificazione della produzione e dunque allo scheduling. Ad esempio, i pezzi più urgenti in base alle date di scadenza possono essere raggruppati nella stessa build durante il processo di nidificazione, andando ad influenzare dunque le decisioni di schedulazione. Inoltre, i problemi di nidificazione possono prendere in considerazione le diverse dimensioni del volume di costruzione a seconda delle macchine AM a disposizione e non uguali fra loro, influenzando sulla mappatura dei lavori e delle risorse nei problemi di schedulazione. Vale a dire, i risultati del nesting (numero di build, numero e volume di parti per costruzione, altezza massima delle parti all'interno del volume di costruzione, ecc.) spesso influenzano i lavori (build) e gli indicatori di prestazione (tempi e costi di costruzione) dei problemi di scheduling. Una principale caratteristica dei problemi di schedulazione nei contesti AM è quindi che il tempo e il costo di costruzione per ciascun ciclo di costruzione dipendano proprio dai problemi di nidificazione (orientamenti di costruzione, posizioni di posizionamento e geometrie degli oggetti di input).

I problemi di nidificazione e schedulazione nella letteratura della Fabbricazione Additiva possono essere classificati in tre tipi:

- 1) Nesting for AM (*NfAM*) (come l'articolo degli autori De Araújo et al. del 2019 [18] e l'articolo degli autori di Zhang et al. del 2018 [19]);
- 2) Scheduling for AM (*SfAM*) (come l'articolo dell'autore Küçükkoç del 2019 [20] e l'articolo dell'autore Kim del 2017 [21]);
- 3) Nesting and Scheduling for AM (*NSfAM*) (come l'articolo degli autori Chergui et al. del 2018 [22], l'articolo degli autori Dvořák et al. del 2018 [23] e l'articolo degli autori Zhang et al. del 2019 [24]).

Rispetto ai problemi *NfAM*, recentemente sono stati evidenziati i problemi *SfAM* e *NSfAM*. Nell'articolo di Oh et al. del 2020, precedentemente citato, è proposta una tassonomia completa che copre sia i problemi di nidificazione sia di schedulazione per i sistemi di Fabbricazione Additiva. La tassonomia esaminata, mostrata in Figura 1.5, si basa sulla gerarchia del sistema fisico composta da tre livelli: parte, build e macchina AM [16].

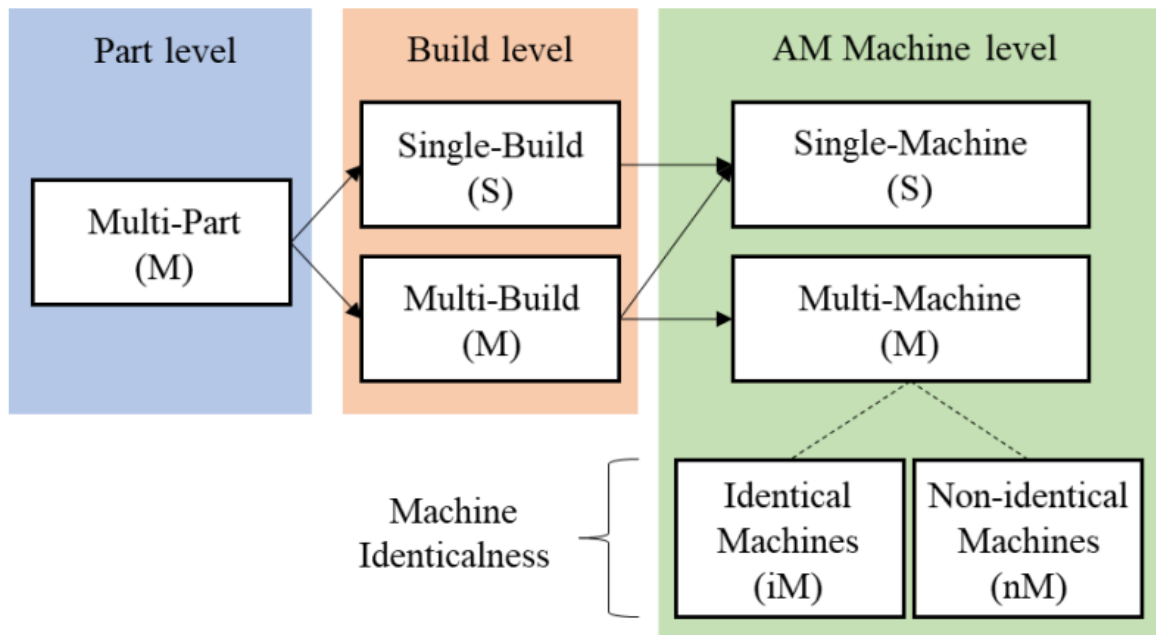


Figura 1.5: Tassonomia gerarchica per i problemi di nesting e scheduling per l'AM

Dall'intersezione o dalla combinazione di questi livelli si derivano sei classi di problemi principali ed in questo modo, oltre che a classificare i vari problemi analizzati, è anche possibile identificarli in termini di livelli decisionali. In altre parole, si mostra quando e come è possibile prendere decisioni in base alle transizioni tra i tre livelli: le transizioni dal livello *part* al livello *build* e quelle dal livello *build* al livello *macchina AM* implicano rispettivamente processi di nesting e di scheduling. Questa visione olistica quindi non solo esamina il modo in cui le decisioni possono essere scomposte, ma considera anche il modo in cui tali decisioni influenzano altre decisioni. La tassonomia proposta integra la consueta

classificazione *NfAM*, *SfAM* e *NSfAM* e fornisce un'ulteriore prospettiva per aiutare a identificare e organizzare i problemi, individuando ad esempio gli obiettivi, i vincoli, le criticità, i fattori significativi o le ipotesi sottostanti ad essi.

Poiché i ricercatori hanno prospettive e background differenti, sia per il tema del nesting sia dello scheduling nell'AM in letteratura molti termini sono spesso utilizzati in modo interscambiabile, generando così il rischio di confusione. Ad esempio, il termine “parte” spesso è sostituito dal termine “geometria” per il tema del nesting e “task” per invece il tema dello scheduling. Proprio per questo motivo, nella Tabella 1.1 sono definiti i termini tecnici utilizzati in modo coerente in tutto questo manoscritto e anche altri termini compatibili ad essi presenti nella letteratura AM.

<i>Terminologia</i>	<i>Significato</i>	<i>Altri termini compatibili</i>
<i>Nesting</i>	<i>Determinare la posizione e l'orientamento delle parti all'interno del volume di costruzione. Si tenga presente che, se si considerano più build, si include anche la determinazione del raggruppamento delle parti nelle varie build.</i>	<i>Posizionamento dei lotti, pianificazione dei batch, ottimizzazione dello spazio, pianificazione del layout, posizionamento di più parti, imballaggio / packing, pianificazione dello spazio lavoro.</i>
<i>Scheduling</i>	<i>Assegnazione delle varie build alle macchine AM disponibili per i cicli di costruzione.</i>	<i>Assegnazione delle parti alla macchina AM, pianificazione della produzione.</i>
<i>Parte</i>	<i>Singola istanza fisica di un modello 3D.</i>	<i>Geometria, job, oggetto, part order, pezzo, task.</i>
<i>Build</i>	<i>Gruppo di parti prodotto simultaneamente da una macchina AM in un ciclo di costruzione.</i>	<i>Batch, job.</i>
<i>Macchina AM</i>	<i>Macchina che completa una build o più, contenenti una o più parti, durante un ciclo di costruzione.</i>	<i>Macchina, stampante, impianto di stampa 3D.</i>

Tabella 1.1: Terminologia per le cinque parole chiave: Nesting, Scheduling, Parte, Build e Macchina AM

Prendendo come riferimento l'articolo di Oh et Al. del 2020, la maggior parte dei termini tecnici in questo manoscritto deriva dalla terminologia standard per AM in ISO/ASTM 52900:2021 e dal documento di revisione per i problemi di annidamento nella Fabbricazione Additiva degli autori De Araújo et al. del 2018 ([16], [25] e [26]).

I termini “nesting” e “packing” sono stati spesso usati in modo interscambiabile, sebbene il termine “nesting” sia solitamente correlato a uno schema in cui alcuni oggetti più grandi

avvolgono uno o più oggetti piccoli. In questo documento si adotta il termine “nesting” come definito dalla terminologia standard per AM: “*Situation when parts are made in one build cycle and are located such that their bounding boxes, arbitrarily oriented or otherwise, overlap*”. D’altra parte, il termine “scheduling” ha una varietà di significati: dal livello micro, come la pianificazione del processo per ridurre al minimo il numero di cambio multimateriale all’interno di una macchina AM specializzata, al livello macro, come la gestione degli ordini per servizi su richiesta. In questo documento ne è ristretto il significato alla pianificazione della produzione a livello shop floor.

Come già detto e mostrato nelle Figure 1.6 e 1.7 sottostanti, l’oggetto di questo paragrafo è rappresentato dalle aree di *NfAM*, *SfAM* e *NSfAM* [16].

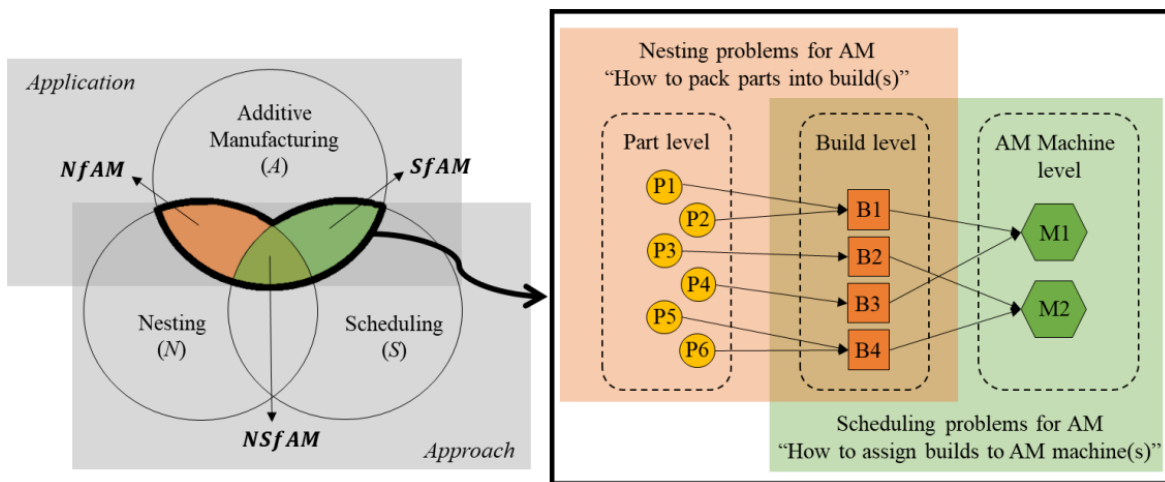


Figure 1.6 e 1.7: *NfAM*, *SfAM* e *NSfAM*

I documenti *NfAM* rientrano nell'ambito di $(N \cap A) - S$, ambito che riguarda dunque la transizione dal livello *parte* al livello *build* e in cui si risolvono solamente i problemi di annidamento per AM. Il modo in cui disporre più parti in una o più build implica decisioni in merito innanzitutto al raggruppamento delle parti nelle varie build, l’orientamento e la posizione della parte all'interno del volume di costruzione in seguito.

I documenti *SfAM* rientrano nell'ambito di applicazione di $(S \cap A) - N$, ambito che riguarda dunque la transazione dal livello di *build* al livello della *macchina AM* e in cui ci si occupa soltanto dei problemi di schedulazione per AM. Il modo in cui le build sono assegnate alle macchine AM implica decisioni come la determinazione dell'ordine di elaborazione delle build, oltre alla mappatura delle build e delle macchine AM.

Infine, i documenti *NSfAM* coprono sia i problemi di nidificazione che di scheulazione: l'area comune di $N \cap S \cap A$.

I ricercatori hanno proposto tassonomie e criteri di classificazione per i problemi di nidificazione, ad esempio il campo della ricerca operativa considera problemi simili sotto la categoria “cutting and packing” (C&P). Per i problemi C&P, l’autore Dyckhoff in un articolo pubblicato nel 1990 ha inizialmente proposto una tipologia costituita da quattro tuple ($\alpha / \beta / \gamma / \delta$): dimensionalità, tipo di incarico, assortimento di oggetti di grandi dimensioni (indicati come “objects”) e assortimento di oggetti di piccole dimensioni (indicati come “items”) [27]. Gli autori Wäscher et al. nel 2007 hanno migliorato tale tassonomia suggerendo nuovi criteri di classificazione sistematica basati sulle precedenti quattro tuple e una aggiuntiva: forma di piccoli oggetti [28]. Gli autori Araujo et al. invece nel 2015 hanno proposto criteri di classificazione in particolare per i problemi di nesting del contesto AM, estendendo il lavoro precedente e proponendo una nuova tassonomia basata su quattro nuove tuple: dimensionalità, criteri di ottimizzazione, tipo di volume di costruzione, attributi/caratteristiche dell'assortimento di parti [29].

Nel campo manifatturiero, i problemi di schedulazione sono stati affrontati come rappresentazione del concetto di gestione delle operazioni. Per i problemi di schedulazione della produzione, l’autore Graves nel 1981 ha proposto tre dimensioni di classificazione: generazione dei requisiti (open and closed shops); complessità di elaborazione (processore a uno stadio, processore parallelo a uno stadio, flow shop multistadio o job shop multistadio), e criteri di scheduling (costi e prestazioni del programma) [30].

Poiché le tassonomie esistenti si concentrano sulla nidificazione o sulla schedulazione, qui di seguito si riporta una tassonomia alternativa che copre in modo completo entrambi gli argomenti per l'AM. Tale tassonomia si basa su una gerarchia fisica composta dai livelli *parte*, *build* e *macchina AM*. Mentre i livelli *build* e *macchina AM* sono considerati sia singoli che multipli, il livello *parte* è solamente considerato multiplo, poiché trattare una singola parte non sarebbe di particolare rilevanza nei problemi di nidificazione e schedulazione. Si tenga presente che questa tassonomia potrebbe essere applicata anche ad altre applicazioni basate sull'elaborazione batch oltre che nel contesto AM: in altre applicazioni, le costruzioni e le macchine AM potrebbero essere sostituite con lavori e altri tipi di macchine e strutture. Secondo la gerarchia di questa tassonomia, sono definite quattro classi come segue:

- 1) [M/S/S]: Multi-parte → Build singola → Macchina AM singola;
- 2) [M/M/S]: Multi-parte → Multi-build → Macchina AM singola;
- 3) [M/M/M]: Multi-parte → Multi-build → Multi-macchina AM;
- 4) [-/M/M]: Non disponibile (N/A) → Multi-build → Multi-macchina AM.

Inoltre, a seconda dell'identità delle macchine AM, la Multi-macchina AM è suddivisa in due sottocategorie: macchine identiche e non identiche. Pertanto, la gerarchia raggiunge il totale di sei classi:

- 1) [M/S/S]: Multi-parte → Build singola → Macchina singola;
- 2) [M/M/S]: Multi-parte → Multi-build → Macchina singola;
- 3) [M/M/iM]: Multi-parte → Multi-build → Multi-macchina identica
- 4) [M/M/nM]: Multi-parte → Multi-build → Multi-macchina non identica
- 5) [-/M/iM]: Non disponibile (N/A) → Multi-build → Multi-macchina identica
- 6) [-/M/nM]: Non disponibile (N/A) → Multi-build → Multi-macchina non identica

Le sei classi rappresentano l'ambito dell'indagine, nonché i criteri di classificazione. Questa classificazione basata sulle sei classi appena elencate è associata alla categorizzazione basata su *NfAM*, *SfAM* e *NSfAM*. Ad esempio, i documenti della classe [M/S/S] sono tutti inclusi nel tipo *NfAM*, poiché una singola build e una singola macchina causano problemi di nidificazione piuttosto che problemi di schedulazione, dovendo considerare la disposizione di più parti all'interno della camera di costruzione di una sola macchina AM in un'unica build.

Affinché una macchina AM si occupi di una build comprendente una o più parti durante un ciclo di costruzione, è necessario che innanzitutto le parti siano raggruppate in build per poi essere elaborate, anche con la possibilità che una o più build includano una parte soltanto. In altre parole, le build sono elementi necessari per la produzione di parti tramite macchine AM e, proprio per questo motivo, le classi [M/-/S] e [M/-/M] non sono trattate in questo documento. Sebbene alcuni studi non menzionino il concetto di build descrivendo come le parti siano assegnate direttamente alle macchine AM, si presuppone comunque che queste parti siano state prima raggruppate in build. In particolare, se gli articoli presuppongono che una macchina AM si occupi di una parte soltanto per ciclo di costruzione, si classificano gli articoli nella classe [-/M/M], considerando le singole parti come build.

Per perfezionare ulteriormente la classificazione dei problemi all'interno delle sei classi, per ogni classe sono utilizzati tre criteri comuni: processi, obiettivi e metodologie di AM, oltre a otto criteri specifici a seconda della classe.

Secondo le linee guida standard ISO/ASTM 52900:2021, si classificano i processi AM come segue: Binder Jetting – BJ, Directed Energy Deposition - DED, Material Extrusion - ME, Powder Bed Fusion – PBF, Vat Photopolymerization – VP (fotopolimerizzazione in vasca).

Gli obiettivi più comuni sono ad esempio la minimizzazione dell'altezza della build all'interno dello spazio di costruzione o la massimizzazione del tasso di nidificazione per la classe [M/S/S], la minimizzazione del makespan per la classe [M/M/S], la minimizzazione del ritardo totale per la classe [M/M/iM] o la massimizzazione del profitto per la classe [M/M/nM].

Per le metodologie di soluzione sono spesso utilizzate meta-euristiche come l'algoritmo genetico (Genetic Algorithm - GA), la ricerca tabù (Tabu Search - TS) e la ricottura simulata (Simulated Annealing - SA).

Un algoritmo genetico è un algoritmo euristico utilizzato per tentare di risolvere problemi di ottimizzazione per i quali non si conoscono altri algoritmi efficienti di complessità lineare o polinomiale. L'aggettivo "genetico", ispirato al principio della selezione naturale ed evoluzione biologica teorizzato da Charles Darwin, deriva dal fatto che, al pari del modello evolutivo darwiniano che trova spiegazioni nella branca della genetica, gli algoritmi genetici attuano dei meccanismi concettualmente simili a quelli dei processi biochimici scoperti da questa scienza. In sintesi, gli algoritmi genetici consistono in algoritmi che permettono di valutare diverse soluzioni di partenza e che, ricombinandole (analogamente alla riproduzione biologica sessuata) ed introducendo elementi di disordine (analogamente alle mutazioni genetiche casuali), producono nuove soluzioni che sono valutate scegliendo le migliori (selezione ambientale) nel tentativo di convergere verso soluzioni "di ottimo". Nonostante questo utilizzo nell'ambito dell'ottimizzazione, data la natura intrinsecamente casuale dell'algoritmo genetico, non vi è modo di sapere a priori se sarà effettivamente in grado di trovare una soluzione accettabile al problema considerato. Nel caso in cui si ottenesse un risultato soddisfacente, non sarà detto che si capisca perché abbia funzionato, dato che non è stato progettato da nessuno ma da una procedura casuale.

La Tabu Search (o ricerca tabù) è una tecnica meta-euristica utilizzata per la soluzione di numerosi problemi di ottimizzazione, tra cui problemi di scheduling e programmazione intera. La Tabu Search rappresenta un'evoluzione del classico "metodo di discesa", che consiste nel partire da una soluzione iniziale ed eseguire una serie di "mosse" che portano ad una nuova soluzione all'interno dell'intorno della soluzione corrente. Il difetto del metodo di discesa sta nel fatto che, se nell'insieme di adiacenza non esistono soluzioni "migliori" di quella corrente, la ricerca si arresta. La soluzione ottima individuata dal metodo di discesa risulta quindi associata ad un minimo locale dello spazio delle soluzioni, il quale è spesso ben lontano, soprattutto in termini di qualità, dalla soluzione ottima globale. La tecnica della

Tabu Search fu proposta proprio come modo per continuare la ricerca oltre i minimi locali. Innanzitutto, per poter sfuggire alla "trappola" dei minimi locali, la Tabu Search consente "mosse peggioranti"; tuttavia, così facendo, si rischia di ricadere subito dopo nel minimo locale, a meno che non si impediscano in qualche modo le mosse recentemente eseguite. Il concetto fondamentale della Tabu Search consiste allora nel rendere "proibite" o, appunto, "tabu", le ultime mosse eseguite nel cammino di ricerca, in modo che l'algoritmo non possa tornare sui suoi passi e ricadere nel minimo locale. Caratteristica basilare della Tabu Search è quindi l'uso sistematico della memoria: per aumentare l'efficacia del processo di ricerca, si tiene traccia non solo delle informazioni locali (come il valore corrente della funzione obiettivo), ma anche di informazioni relative all'itinerario percorso. Tali informazioni sono impiegate per guidare la mossa dalla soluzione corrente alla soluzione successiva, da scegliersi all'interno dell'insieme di adiacenza.

La ricottura simulata (dall'inglese simulated annealing) è una strategia utilizzata per risolvere problemi di ottimizzazione che mira a trovare un minimo globale quando si è in presenza di più minimi locali.

Continuando a fare riferimento all'articolo degli autori Oh et al. (2020), la Tabella 1.2 rappresenta gli otto criteri specifici costituiti dai quattro relativi alla nidificazione (N_α , N_β , N_γ e N_δ) e dai rimanenti quattro legati alla schedulazione (S_α , S_β , S_γ e S_δ) [16]. Nella Figura 1.8 è illustrato cosa si intende per nesting "unbounded", "subset" e "multi build" [16].

	Element	Description	Values
Nesting-related tuples	N_α	Dimensionality	2D; 3D
	N_β	Rotation freedom of parts	ABC; C
	N_γ	Build volume boundness	Bounded; Unbounded
	N_δ	Set of nested parts	Full; Subset
Scheduling-related tuples	S_α	Generation methods of builds	Nested; Grouped; Created; Given
	S_β	Scheduling models	Single-machine (SM); Parallel-machine (PM); Flow-shop (FS)
	S_γ	Order property	Due-date (Du); Material (Ma); Quality (Qu)
	S_δ	Non-identical machine property	Location (Lo); Size (Si); Process parameter (Pr)

Tabella 1.2: Criteri specifici di nidificazione e schedulazione per ogni classe

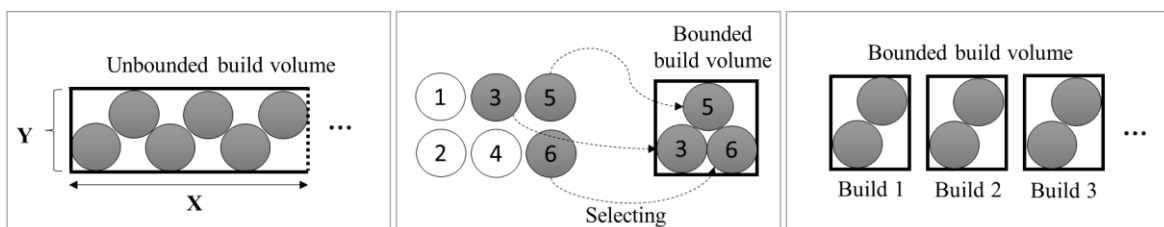


Figura 1.8: Tipologie di nesting ("unbounded", "subset" e "multi build")

Il primo elemento della nidificazione, N_α , è la dimensionalità, che indica se le parti sono posizionate sfruttando solamente la superficie di costruzione (nesting 2D) o se sono posizionate sfruttando l'intero volume dello spazio di costruzione (nesting 3D). Si noti che il concetto di annidamento 2D in questo articolo è differente dalla definizione tradizionale di annidamento 2D nei documenti teorici di annidamento, poiché in quest'ultimi solitamente si trattano geometrie 2D (ad esempio, poligoni). D'altra parte, se si considera l'annidamento 3D, le parti possono essere impilate con altre parti e sfruttare dunque anche l'altezza della camera di costruzione.

Il secondo elemento, N_β , è la libertà di rotazione delle parti: durante l'algoritmo di nesting le parti generalmente sono ruotate per determinare gli orientamenti di costruzione delle stesse. Per tale parametro si adottano i sensi di rotazione A, B e C per rappresentare come una parte sia ruotata rispettivamente attorno agli assi x, y e z. Per determinare l'orientamento di costruzione di una singola parte, la rotazione attorno all'asse z potrebbe essere trascurabile, non essendo solitamente fondamentale per determinare il tempo e la qualità della superficie; differentemente invece dai problemi di annidamento di più parti, in cui la rotazione C è indispensabile poiché influisce sulla posizione delle altre parti. In realtà, in questo ultimo caso, tutti e tre i sensi di rotazione (A, B e C) dovrebbero essere considerati nella determinazione dell'orientamento della costruzione; tuttavia, alcuni studi incentrati sulla schedulazione semplificano i problemi di nidificazione considerando solo la rotazione C.

Il parametro N_γ indica i limiti del volume di costruzione, ovvero se il volume di costruzione è chiuso (delimitato) o aperto (illimitato). Se si considera il nesting illimitato, alcune dimensioni del volume di costruzione sono flessibili: ad esempio, la Figura 1.8 a) presenta un annidamento illimitato in cui la dimensione X è illimitata. Il nesting illimitato è una delle caratteristiche chiave dei tradizionali problemi di strip-packing, il cui obiettivo è solitamente quello di minimizzare la dimensione illimitata, proprio come nell'articolo degli autori Kenmochi et al. del 2009 [31].

L'insieme delle parti annidate, N_δ , è un elemento per indicare se sono annidate tutte le parti (Pieno) o solo alcune parti (Sottoinsieme). La Figura 1.8 b) presenta l'annidamento di sottoinsiemi in cui solamente alcune parti dell'intero insieme sono scelte e posizionate: questa è una delle caratteristiche essenziali dei tradizionali problemi a zaino il cui obiettivo è massimizzare i profitti degli articoli scelti, come ad esempio trattato nell'articolo degli autori Egeblad et al. del 2009 [32].

La Figura 1.8 c) rappresenta l'annidamento multi-build in cui le parti sono raggruppate in più build, caratteristica principale dei tradizionali problemi di bin-packing. Se sono prese in considerazione più macchine AM, il volume di costruzione delle macchine per ciascuna build può essere diverso.

Le altre quattro tuple (S_α , S_β , S_γ e S_δ) sono legate ai problemi di schedulazione.

Prima di mappare le build (task) e le macchine AM (risorse) nei problemi di schedulazione, si affronta il tema di come le build possano essere generate in molteplici modi (S_α). Innanzitutto, le parti possono essere raggruppate in build mediante un algoritmo di nidificazione (nested) e, in questo caso, poiché un algoritmo di schedulazione è alimentato con build risultanti dall'algoritmo di nidificazione, è probabile che gli approcci di nesting e scheduling siano strettamente correlati. Tuttavia, il processo di annidamento è spesso semplificato raggruppando le parti in build in base alla capacità massima dell'area e del volume della parte (grouped). Questo caso è diverso dal precedente, poiché la posizione e l'orientamento delle parti non sono determinati tramite un determinato algoritmo di annidamento. Senza considerare le parti, le build possono anche essere generate casualmente (created) sulla base di una serie di parametri, tra cui dimensioni e volume. In quest'ultima casistica rientrano ad esempio i problemi della classe $[-/M/M]$. Infine, informazioni delle build, come il volume complessivo e l'altezza massima, possono essere già forniti in un problema (given).

Il secondo elemento (S_β) indica tre tipi di modelli di schedulazione:

- 1) Modello a macchina singola (SM): configurazione in cui ad una macchina è assegnato un insieme di n lotti, tutti da processare sulla stessa. Ogni lavorazione richiede un certo tempo, non può essere interrotta (not preemption) e non richiede alcun tempo di attrezzaggio (setup). Qualora esista un tempo di attrezzaggio, questo si suppone che non dipenda dall'ordine dei lotti da lavorare: se il tempo di setup dipende solo da un particolare lotto, allora può essere incluso nel tempo di lavorazione del lotto stesso. Inoltre, si ipotizza che i lotti siano disponibili alla lavorazione nello stesso istante, ovvero che la macchina possa iniziare la lavorazione con uno qualsiasi di essi. Il problema di sequenziamento per una macchina singola consiste nel determinare l'ordine con cui i lotti devono essere lavorati in modo tale da minimizzare criteri di valutazione come: il tempo medio di completamento dei lotti (completion time), il flowtime medio, il tempo totale di attesa dei lotti in coda alla macchina (waiting time), il ritardo totale medio rispetto alle date di consegna fissate per ogni lotto

(mean tardiness) o il massimo ritardo tra i lotti (maximum job tardiness). Ad esempio, il mean flowtime è minimizzato ordinando i lotti in sequenza non-decrescente dei tempi di processo (seguendo dunque la regola di SPT-Shortest Processing Time). Nel caso in cui i lotti siano soggetti a date di consegna (due date), allora per essi si applica la regola EDD-Earliest Due Date: il massimo ritardo tra i lotti è minimizzato ordinando i lotti in sequenza non-decrescente dei tempi di consegna.

In aggiunta alla situazione appena descritta in cui un reparto manifatturiero presenta una sola macchina, esistono anche numerosi casi in cui gli impianti più estesi possono essere considerati come fossero costituiti da una macchina singola. In un sistema produttivo con più macchine, può esserci una macchina che presenta una capacità produttiva più bassa rispetto alle altre e che ad essa ci si riferisca così come collo di bottiglia, essendo il reparto “dominato” da tale macchina. Ne consegue che l'ottimizzazione del processo produttivo per un ambiente con più macchine può essere semplificato in un problema di schedulazione per la macchina collo di bottiglia: la sequenza di lotti assegnata al collo di bottiglia determinerà la prestazione dell'intero sistema.

Se si suppone che i tempi di setup dipendano dalla sequenza dei lotti, allora si è in presenza di un problema di schedulazione, in quanto il tempo di completamento degli n lotti dipende da come effettivamente i lotti sono ordinati. In questo caso, la soluzione è una sequenza che minimizza gli n tempi di setup.

- 2) Modello a macchina parallela (PM): configurazione in cui si hanno m macchine disponibili a lavorare contemporaneamente n lotti, nuovamente tutti pronti ad essere processati al tempo zero. Le macchine sono definite “parallele” poiché sono in grado di eseguire tutte le medesime operazioni; nel caso in cui fossero invece specializzate nell'esecuzione di specifiche operazioni sono definite “dedicate”. In aggiunta, si ipotizza che ogni lotto possa essere lavorato al massimo da una macchina sola. Il problema di questa casistica consiste nell'allocare sia le risorse sia nello schedulare i lotti.

Le risorse possono essere costituite da: macchine identiche, uniformi o non correlate:

- Le macchine identiche sono caratterizzate dall'avere la medesima velocità di esecuzione dell'operazione;

- Le macchine sono definite uniformi se la velocità tra esse è diversa, ma la velocità di ogni singola macchina rimane costante indipendentemente dall'operazione che esegue;
- Le macchine non correlate sono caratterizzate dall'avere la velocità di esecuzione dipendente dall'operazione da realizzare.

Indicato con il termine “makespan” il tempo intercorrente tra l'inizio della lavorazione del primo lotto e il completamento dell'ultimo lotto, nel problema a una macchina singola con sequenze indipendenti dal set-up tale grandezza è una costante, ovvero non dipende dalla particolare sequenza adottata. Nel caso di macchine parallele invece il makespan è variabile e pertanto può essere utilizzato come indicatore di prestazione.

- 3) Flow-Shop (FS): assegnate m macchine (dedicate, non parallele) ed un insieme di n lotti, su questi ultimi si devono eseguire m lavorazioni ed ogni macchina è dedicata a fare una sola lavorazione. Ciascuna lavorazione richiede un dato tempo, non può essere interrotta (not preemption) e può essere eseguita da ciascuna macchina una alla volta. Un flow-shop è una configurazione di macchine per cui il flusso dei lotti è unidirezionale, lineare e segue il medesimo ordine da una macchina all'altra. I problemi del flow-shop presuppongono che tutte le attività debbano essere elaborate sullo stesso insieme di macchine con fasi di elaborazione identiche. Più precisamente, se un lotto deve essere lavorato prima su una macchina e poi su un'altra, questo ordine di lavorazione vale per tutti i lotti; inoltre, se una macchina lavora un lotto prima di un altro allora questo ordinamento dei lotti si conserva per tutte le rimanenti macchine. Un flow-shop contiene dunque un ordinamento naturale delle macchine.

Se a priori non esistono vincoli di precedenza tra i diversi lotti, un problema di schedulazione per un flow-shop consiste nel trovare la sequenza dei lotti che minimizza ad esempio il tempo di completamento di tutte le lavorazioni.

Questa configurazione è differente dal job-shop, poiché in quest'ultima il flusso delle lavorazioni non è unidirezionale e quindi la sequenza delle operazioni non è definita dall'ordinamento delle macchine. Il flow shop differisce anche dall'open shop per la presenza dei vincoli di precedenza tra le operazioni e dunque di un ordinamento naturale delle macchine, quando nell'open shop ogni

operazione è eseguita per l'appunto senza alcun vincolo di precedenza rispetto alle altre.

Per i problemi di flow shop basati su AM, le macchine AM sono solitamente collocate nella prima fase.

La Figura 1.9 rappresenta esempi di modelli di schedulazione basati su AM [16].

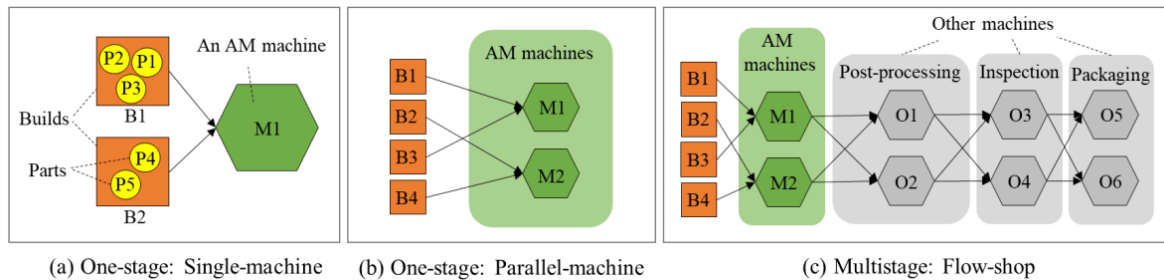


Figura 1.9: Esempi di modelli di schedulazione basati su AM (“single-machine”, “parallel-machine” e “flow-shop”)

Nei problemi di schedulazione per AM, un ordine cliente include una serie di richieste. Oltre ad una richiesta predefinita per la geometria della parte, si prendono in considerazione precisamente quattro proprietà dell'ordine: data di scadenza per la consegna (Due Date – Du), il tipo di materiale (Ma), la qualità della parte (Qu) ed infine le proprietà della macchina non identica (S_δ) quando le posizioni (Lo), dimensioni (Si) e parametri di processo (Pr) delle macchine AM sono diverse. Si noti che, quando i parametri di processo (ad esempio, tempo di lavorazione per rivestimento/finitura, costi operativi e velocità degli ugelli) sono diversi tra le macchine AM, queste sono considerate macchine non identiche, come anche se collocate in luoghi fisicamente remoti.

Nella Tabella 1.3, i criteri sono più o meno rilevanti a seconda della classe esaminata. I criteri specifici meno significativi sono indicati con X, a differenza di quelli più significativi espressi da O. Per i problemi della classe [M/S/S], ad esempio, i quattro criteri relativi alla schedulazione non sono significativi poiché i problemi di scheduling sono meno critici producendo simultaneamente tutte le parti della stessa build. Se si considerano invece sia l'annidamento completo “bounded” sia la schedulazione, i problemi sono spesso inclusi nella classe [M/M/S] o [M/M/M], in cui si eseguono più build per produrre ogni parte nelle dimensioni limitate dell'area di lavoro. Inoltre, i criteri relativi all'annidamento non sono significativi per la classe [-/M/M], poiché un processo di annidamento che raggruppa le parti nelle build non è affrontato nei problemi. Infine, S_δ è significativo soltanto per le classi [M/M/M] e [-/M/M] in cui sono consentite più macchine.

	N_α	N_β	N_γ	N_δ	S_α	S_β	S_γ	S_δ
$[M/S/S]$	O	O	O	O	X	X	X	X
$[M/M/S]$	O	O	O	O (bounded)	O (full)	O	O	X
$[M/M/M]$ ($M/M/iM$) e ($M/M/nM$)	O	O	O	O (bounded)	O (full)	O	O	O
$[-/M/M]$ ($M/M/iM$) e ($M/M/nM$)	X	X	X	X	O	O	O	O

Tabella 1.3: Criteri specifici a seconda delle classi: significativo (O) e insignificante (X)

Una panoramica dei vari documenti di schedulazione e annidamento considerati in questa analisi è presentata nella Tabella 1.4, avendo come riferimento la tassonomia e i criteri introdotti precedentemente. I documenti sono classificati in termini sia delle quattro classi ($[M/S/S]$, $[M/M/S]$, $[M/M/M]$ e $[-/M/M]$) sia delle tre tipologie (NfAM, SfAM e NSfAM). Si precisa che un articolo può essere classificato in più classi: ad esempio, l'articolo dell'autore Kucukkoc del 2019 è classificato nelle classi $[M/M/S]$, $[M/M/iM]$ e $[M/M/nM]$ poiché tutte affrontate in questo documento [20].

	$[M/S/S]$	$[M/M/S]$	$[M/M/M]$	$[-/M/M]$
<i>NfAM</i>	[18], [19], [33], [34], [35], [36], [37]	[40]	[41]	/
<i>NSfAM</i>	/	[39]	[10], [22], [23], [24], [42], [43], [44]	/
<i>SfAM</i>	/	[20], [38]	[20], [21], [48]	[21], [45], [46], [47]

Tabella 1.4: Classificazione dei vari documenti di scheduling e nesting considerati nell'analisi

- Classe [M/S/S]

La classe [M/S/S] spesso comporta problemi di annidamento 3D, a differenza di altre classi che solitamente includono problemi di annidamento 2D ma che invece trattano anche il problema della schedulazione. Si sottolinea che in alcuni casi l'annidamento 2D potrebbe essere preferibile rispetto all'annidamento 3D, poiché permette di ridurre al minimo il danno superficiale causato dalle strutture di supporto.

Gli obiettivi più tradizionali per i problemi della classe [M/S/S] sono i seguenti:

- 1) La massimizzazione del tasso di nidificazione, come trattato all'interno dell'articolo degli autori Yang et al. nel 2008 [33];
- 2) La minimizzazione dell'altezza massima, affrontato invece nell'articolo degli autori De Araújo et al. nel 2019 o nell'articolo degli autori Zhang et al. del 2022 ([18] e [34]).

Oltre a tali obiettivi orientati all'annidamento, sono considerati anche obiettivi basati sull'AM, come la riduzione al minimo dei tempi e dei costi di costruzione e il miglioramento della qualità della superficie.

Gli autori Hur et al. nel 2001 hanno proposto due funzioni obiettivo a seconda del numero di parti: se le parti sono troppe e il volume di costruzione non può includerle tutte, la funzione obiettivo consiste nel massimizzare il tasso di annidamento per il nesting di sottoinsiemi; altrimenti la funzione obiettivo è ridurre al minimo l'altezza di costruzione per la nidificazione completa [35].

Numerosi problemi di annidamento della classe [M/S/S] riguardano dunque la determinazione dell'orientamento della build per massimizzare il tasso di annidamento. A tal fine, sono proposti principalmente due tipologie di approcci: uno a due step e uno che prevede l'integrazione. Nell'approccio a due fasi si determina inizialmente l'orientamento delle parti costituenti la build e poi, sulla base di ciò, si determina in un secondo momento la loro posizione. In alcuni casi le rotazioni A e B per l'orientamento della build sono considerate nel primo passaggio, per poi trattare nel secondo la rotazione C e la posizione delle parti.

Sebbene l'approccio in due fasi fornisca solitamente una minore complessità di calcolo rispetto all'approccio di integrazione, spesso consente di trovare solamente un ottimo locale piuttosto che un ottimo globale.

Nell'approccio di integrazione, il primo e il secondo passo sono ripetuti e integrati per raggiungere l'ottimale globale. Poiché considerare più parti contemporaneamente potrebbe

causare un'elevata complessità di calcolo, si applica spesso il posizionamento delle parti una per una.

I problemi di decomposizione e imballaggio (D&P) per la produzione additiva sono risolti scomponendo un modello 3D originale in più pezzi ed inserendoli poi nel volume di costruzione limitato della macchina. Per la precisione, l'oggetto di grandi dimensioni è ridisegnato in piccoli pezzi tramite un BSP (Binary Space Partitioning) con un iperpiano, in cui le parti sono decomposte ricorsivamente fino a quando nessuna parte non supera più le dimensioni limitate dello spazio di lavoro. Proprio per questo motivo la maggior parte dei problemi D&P per l'AM sono difatti inclusi nella classe [M/S/S]. In termini di visione teorica, i problemi D&P sono simili ai problemi C&P della ricerca operativa.

Facendo riferimento alla Tabella 1.4, il documento degli autori di Jiang et al. del 2019 è classificato sotto la voce di nesting 2D poiché ogni parte è in contatto con la superficie di costruzione, anche se queste possono essere sovrapposte [36]. Il lavoro di Zhang et al. del 2015, che tratta della determinazione dell'orientamento delle parti della build, nonostante non affronti il posizionamento delle parti è classificato invece come nesting completo illimitato [37].

- Classe [M/M/S]

Come detto precedentemente, i problemi di questa classe sono caratterizzati da build multiple, tutte elaborate sulla stessa macchina AM, e annidamenti multipli. Avendo dunque la medesima dimensione del volume di costruzione per tutte le build, la classe [M/M/S] è simile alla classe [M/M/iM] che si rivolge a macchine multiple identiche.

Determinare l'orientamento di costruzione delle parti è essenziale non solo nella classe [M/S/S] ma anche nella classe [M/M/S], poiché l'orientamento delle parti della build, oltre ad influire sulla posizione della parte stessa, influisce anche sul numero di build stesse.

A differenza della classe [M/S/S] che affronta solo l'argomento di nidificazione, le classi [M/M/S] e [M/M/M] coprono sia problemi di nidificazione che problemi di schedulazione e ciò si traduce in tre diverse caratteristiche dei problemi rispetto alla classe precedente. Innanzitutto, per ciascuna build si considera il tempo di set-up, pertanto la riduzione del numero di build è spesso evidenziato come obiettivo poiché influisce sul tempo totale del processo, incluso il processo di set-up.

In secondo luogo, si prende in considerazione la priorità per ciascuna parte: la priorità è spesso rappresentata dalla scadenza e/o dal ritardo degli ordini, proprio come nell'articolo di Fera et al. del 2018 in cui è utilizzato un algoritmo genetico come modello metaeuristico

per la ricerca di soluzioni, avendo come obiettivo la minimizzazione congiunta di tempi e costi [38]. La caratteristica della priorità influisce sulla sequenza di elaborazione delle build, portando a produrre dunque per prima la build più urgente con parti ad alta priorità.

Infine, più build sono considerate come input di un algoritmo di schedulazione: le build possono ad esempio essere generate raggruppando le parti in base ai vincoli massimi delle build, tra cui il volume e la superficie di produzione disponibile oppure da un algoritmo di bin-packing che si occupa di come posizionare le parti in più build.

L'articolo di Oh et al. del 2019 è un esempio di come le build siano generate sulla base di determinate politiche di orientamento della singola parte [39]. In particolare, nella sezione 3.1 di tale articolo si spiega che, quando arriva una nuova parte (p), ne è subito definito l'orientamento di costruzione in base ad una precisa politica di orientamento della parte stessa. In questo articolo si propongono due politiche per il posizionamento della parte:

- la politica di posa (LP), che si concentra sulla riduzione dell'altezza delle parti, ha il vantaggio di ridurre il minimo tempo di costruzione per ogni build (dato che le parti hanno un'altezza ridotta), ma di contro potrebbe aumentare il tempo totale di completamento all'aumentare del numero di parti;
- la politica di posizionamento (SP), che mira invece a minimizzare il piano di base di proiezione delle parti per ridurre il numero di build. Al contrario della politica precedente, SP richiede un tempo di costruzione più lungo per ogni build a causa dell'elevata altezza delle parti, ma può per l'appunto portare a un numero inferiore di build.

In base all'orientamento di costruzione, si genera poi la struttura di supporto per la singola parte p. Successivamente si verifica se la parte p possa essere inserita o no nella build di riferimento (J_{Avl}), contenente potenzialmente già altre parti. Se ciò è possibile, la parte p è inserita all'interno di tale build e si verificherà se la prossima parte (p+1) possa essere anch'essa inserita all'interno di J_{Avl} ; nel caso in cui ciò non fosse possibile la build di riferimento si considera come completa ($J_{Full} = J_{Avl}$), J_{Full} è inviata alla coda della macchina AM e si crea una nuova build disponibile, in cui la parte p è posizionata per prima.

Nella Figura 1.10 è riportato uno schema di quanto appena detto [39]:

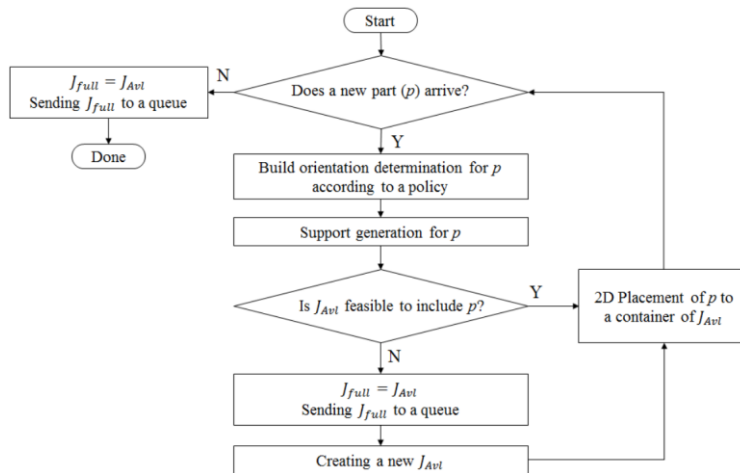


Figura 1.10: Procedura per la determinazione dell'orientamento delle build

Si noti che, sebbene la maggior parte dei problemi D&P siano basati sulla classe [M/S/S], gli autori Oh et al. nel 2018 nell'articolo hanno inizialmente affrontato un problema di D&P basato sulla classe [M/M/S] [40]. Inoltre, nella Tabella 1.4, nonostante Oh et al. considerino il tempo di installazione per ogni build, questo documento è classificato in *NfAM* piuttosto che in *NSfAM* poiché il loro studio si concentra specificatamente su un problema di nidificazione.

- Classe [M/M/M]

Come la classe [M/M/S], anche la classe [M/M/M] copre argomenti sia di nidificazione che di schedulazione. Tuttavia, poiché nella classe [M/M/M] sono considerate più macchine AM, è più difficile affrontare i due argomenti contemporaneamente e pertanto, a seconda dello scopo dei problemi, gli elementi meno significativi sono spesso semplificati. Per citarne alcuni, se i problemi di schedulazione sono i più mirati, i problemi di nidificazione sono semplificati considerando solo la rotazione C per la determinazione dell'orientamento della costruzione, come nell'articolo di Dvořák et al. del 2018, e le parti sono convertite in geometrie più semplici come rettangoli o parallelepipedi [23]. Quando sono invece i problemi di nidificazione ad essere più mirati, si può presumere che un numero infinito di macchine AM con le stesse condizioni riduca i problemi di schedulazione, come fatto nell'articolo degli autori Griffiths et al. del 2019 [41].

Come discusso precedentemente, per quanto riguarda la schedulazione, i problemi della classe [M/M/S] devono tenere conto di come:

- Raggruppare più parti in più build: spesso le parti sono ordinate in base all'altezza e alla data di scadenza, per poi essere raggruppate in build per ridurre al minimo il tempo di

costruzione ed il ritardo. In particolare, l'ordinamento basato sull'altezza è solitamente adottato nell'annidamento 2D, che consente di ridurre la differenza di altezza delle parti all'interno dello stesso volume di costruzione;

- Determinare la sequenza di elaborazione delle build;

- Assegnare le build a più macchine AM, ovvero il bilanciamento del carico per le macchine AM parallele. Questo punto, critico a causa del rischio che una macchina AM si occupi di più attività rispetto ad altre macchine e che dunque sia un potenziale collo di bottiglia, implica un lungo tempo di processo da una visione globale ed è spesso affrontato utilizzando come funzione obiettivo la minimizzazione del makespan (tempo di completamento). Tuttavia, questa problematica può non essere tenuta in considerazione presupponendo un numero infinito di macchine AM a disposizione: ad esempio, nell'articolo di Griffiths et al. del 2019 nella formulazione del problema si assume si abbia un numero di macchine sufficiente a svolgere tutti i task previsti e la funzione obiettivo qui consiste nella minimizzazione dei costi [41].

Si noti che tali tre questioni di schedulazione non sono indipendenti ma collegate tra loro. Gli approcci a due fasi e di integrazione discussi precedentemente possono essere applicati in modo simile a problemi di nesting & scheduling. In particolare, nell'approccio a due fasi si esegue prima un algoritmo di nidificazione per generare più build (che saranno l'input alla schedulazione) e successivamente un algoritmo di schedulazione nella seconda fase. In questo approccio, i problemi di nesting e di scheduling possono avere diverse funzioni obiettivo, come la minimizzazione della tardiness totale, del makespan o del numero di build. Nell'approccio di integrazione, gli algoritmi di nidificazione e di scheduling possono essere combinati fra loro (come nell'articolo di Zhang et al. del 2019) o essere condotti in modo iterativo (come nell'articolo degli autori Gopsill et al. del 2017) ([24] e [42]).

Per spiegare i diversi problemi tra macchine identiche e macchine non identiche si analizzano ora le due sottosezioni della classe $[M, M, M]$: $[M/M/iM]$ e $[M/M/nM]$.

- Classe $[M/M/iM]$

In questo caso, le build possono essere assegnate indifferentemente a qualsiasi macchina, essendo queste fra loro identiche: questa caratteristica è spesso descritta come elevata flessibilità produttiva dell'AM. Come detto precedentemente, la classe $[M/M/iM]$ è simile alla classe $[M/M/S]$ se si considera la dimensione del volume di costruzione, comune a tutte le build, e pertanto un tradizionale algoritmo di bin-packing può essere applicato ai problemi della classe $[M/M/iM]$ così come a quelli della classe $[M/M/S]$. Tuttavia, poiché la classe

[M/M/iM] considera macchine AM parallele, è necessario comunque prendere in considerazione il bilanciamento del carico per ridurre al minimo il makespan. Inoltre, è necessario sia considerato anche il tempo di installazione per ciascuna build, così come sottolineato nell'articolo dell'autore Kim H. del 2017, in cui una delle condizioni da tenere in considerazione per i tempi di allestimento (o tempo di setup) sono i diversi materiali impiegati [21].

Nella Tabella 1.4, il lavoro di Griffiths et al. del 2019 è classificato in *NfAM* piuttosto che in *NSfAM* poiché, presupponendo che siano disponibili sufficienti macchine, i problemi di schedulazione non sono considerati rilevanti [41]. Con questo presupposto, i due problemi di schedulazione relativi alla determinazione della sequenza di elaborazione delle build e all'assegnazione delle build alle macchine possono essere considerati non di particolare rilievo.

- Classe [M/M/nM]

La classe [M/M/nM] tende a concentrarsi sui problemi di schedulazione semplificando i problemi di nidificazione. Ad esempio, per la fase di nesting, anziché sviluppare algoritmi particolari, si adottano librerie esterne o applicazioni commerciali, come nell'articolo degli autori di Freens et al. del 2015 in cui si fa riferimento ad applicazioni commerciali come Digipac-3D e Netfabb per il packing tridimensionale [43].

Sebbene esistano numerosi criteri per definire la “non identità” delle macchine, si considerano principalmente tre proprietà rappresentative: la posizione (Location - Lo), la grandezza (Size - Si) e il parametro di processo (Process Parameter - Pr). Le proprietà della macchina non identiche (S_{δ}) possono essere considerate come vincoli per la scelta della macchina: banalmente, ad esempio, se le macchine AM si trovano in luoghi fisicamente remoti, è più probabile che si scelgano determinate macchine con distanze ravvicinate per ridurre al minimo i costi logistici. Inoltre, anche le proprietà dell'ordine (S_{γ}) (vale a dire la data di scadenza, il materiale e la qualità richiesta del pezzo finito) possono essere determinanti nella scelta delle macchine AM. Ad esempio, se una parte ha un'alta priorità in base alla data di scadenza, può essere assegnata a una determinata macchina AM con un tasso di produzione elevato.

In alcuni casi le build sono generate prima di un processo di annidamento. A tal proposito, nell'articolo degli autori Wang et al. del 2019 è proposto un metodo in base al quale, prima di un approccio di annidamento, le parti sono raggruppate per macchine AM target considerando il materiale richiesto o altre caratteristiche, per poi successivamente essere

posizionate nel modo più ottimale [44]. Poiché le macchine di destinazione a cui sono assegnate le build sono dunque già determinate, non è necessaria una fase di assegnazione dopo l'annidamento.

- Classe [-/M/M]

Alcuni problemi di schedulazione basati su AM, classificati nella classe [-/M/M], presuppongono una parte per build e ciò fa sì che non sia necessario un processo di annidamento. Pertanto, tali problemi possono concentrarsi maggiormente su problemi di schedulazione rispetto ad altre classi. In questa casistica le build possono essere generate (Create), come nell'articolo degli autori di Jun et al. del 2017, o essere considerate come input (Given), come negli articoli degli autori Kim et al. del 2017 ([45], [21] e [46]).

Gli autori Kim e Lee in questo articolo hanno inizialmente affrontato un problema di scheduling considerando un modello flow-shop basato su AM, per poi estendere la loro ricerca negli studi del 2017 e 2018 ([21] e [47]). I loro studi presuppongono che prodotti identici siano fabbricati in un flow-shop comprendente macchine AM e ciascun prodotto sia composto da due sottoassiemi; pertanto, ad un processo di assemblaggio segue un processo di creazione. Per ridurre al minimo il makespan, sono stati confrontati due casi di produzione con macchine parallele: 1) più parti per build (classe [M/M/iM]); 2) una parte per build (classe [-/M/iM]). Tuttavia, si sottolinea che questi studi, in cui le build sono considerate come input (Given) e costituite da parti fra loro identiche, sono limitati sotto il punto di vista dell'eterogeneità della domanda che si ha in un contesto AM.

La prima classe ad esser stata studiata negli anni '90 è stata la [M/S/S], costituita solamente da problemi *NfAM*: ciò significa che i ricercatori AM hanno tradizionalmente iniziato a studiare come imballare e disporre più parti nel volume di costruzione (limitato, bounded) della macchina AM, senza considerare tematiche di schedulazione. Gli studi precedenti a quelli della classe [M/S/S], difatti, non si preoccupavano particolarmente di caratteristiche specifiche dell'AM come il tempo di costruzione o la rugosità superficiale dello strato e del pezzo finito. Rispetto alla classe [M/S/S], che per l'appunto si occupa solitamente di problemi di tipo *NfAM*, recentemente sono state anche studiate problematiche di schedulazione per AM. Nel 2015 difatti, nell'articolo degli autori Freens et al., si è combinato per la prima volta un tema di schedulazione con un tema di annidamento per l'AM [43]. Nel 2016 è stato poi pubblicato il primo articolo *SfAM*: il documento di Kucukkoc et al., e da allora il numero di documenti relativi alla schedulazione è aumentato notevolmente [48]. Questa tendenza a considerare temi differenti ed approcci nuovi volti all'ottimizzazione

indica come l'ambito di ricerca dell'AM si sia pian piano sempre più ampliato: passando da una singola build all'interno di una singola macchina a più build distribuite su più macchine e arrivando ad avere articoli che trattano molteplici funzioni obiettivo per affrontare sia i problemi di nidificazione che quelli di schedulazione.

La maggior parte degli studi di schedulazione per l'AM si basano su modelli di macchina singola e parallela, mostrando l'opportunità di estendere la ricerca a modelli flow-shop o job-shop e ampliando dunque il modello a una fase in un modello a più fasi. Fino ad ora, la maggior parte dei documenti AM per problemi di nesting e scheduling si è concentrata solamente su semplici macchine AM con un singolo ugello e un singolo laser in un processo a fase singola, ma l'ambito di indagine potrebbe essere comunque esteso a macchine AM specializzate e più complesse, che supportano il multimateriale, il multi-laser, il multi-estrusore e il multi-asse ([49], [50], [51] e [52]). Le macchine AM avanzate in grado di eseguire un processo in più fasi possono ridurre la complessità della gestione operativa.

La maggior parte degli studi di nesting e scheduling basati su macchine AM presuppone che le parti all'interno dello stesso volume di costruzione abbiano parametri di processo identici. Quanto appena detto è uno dei motivi principali per cui alcune parti sono raggruppate in una build specifica, per dunque condividere gli stessi parametri di processo; tuttavia, ciò non significa che alcune macchine AM più complesse non possano produrre una build comprendente parti con parametri di processo differenti (ad esempio, colori e materiali).

1.4 Analisi della letteratura per la classe [M, M, S]

Come detto precedentemente, i problemi di questa classe sono caratterizzati da build multiple, tutte elaborate sulla stessa macchina AM, e annidamenti multipli. Determinare l'orientamento di costruzione delle parti da processare è essenziale poiché l'orientamento delle parti della build, oltre ad influire sulla posizione della parte stessa, influisce anche sul numero di build stesse.

Facendo particolare riferimento alla minimizzazione dei tempi e all'annidamento 2D e 3D, di seguito è riportata una breve analisi della letteratura dei problemi appartenenti alla classe [M, M, S] che più si avvicinano al problema presentato nel successivo Capitolo 3.

Nell'articolo degli autori Fera et al. del 2018 si ha lo scopo di fornire un modello matematico per la schedulazione di una macchina AM, in particolare di tecnica SLM [38]. Essendo la complessità di tipo NP-HARD, le possibili soluzioni devono essere trovate mediante metaeuristica oppure algoritmi come quelli genetici.

Nell'articolo dell'autore Dvořák et al. del 2018 si analizza un problema in cui un insieme di parti, ognuna caratterizzata da una data di scadenza predefinita, deve essere stampato su un insieme di macchine sia minimizzando i tempi sia rispettando le scadenze [23]. In questo articolo, inoltre, si considera anche l'aspetto del nesting (bin packaging bidimensionale). Ogni parte ha difatti il proprio orientamento di stampa e si presuppone che le proiezioni approssimanti le parti da processare non possano fra loro sovrapporsi. Sebbene il bin-packing 3D sia concettualmente possibile, in questo articolo si sottolinea non essere stato volutamente considerato. Caratteristica singolare di questo problema è la suddivisione dei vincoli a cui sottostare fra vincoli rigidi, che devono essere sempre soddisfatti (come, ad esempio, che una parte può essere assegnata solo a una singola build) e vincoli soft (come, ad esempio, non tutte le parti possono essere sempre completate in tempo). A tal proposito, la qualità della soluzione è anche valutata in base al numero di vincoli non soddisfatti, fattore riportato nella funzione obiettivo.

Il criterio di ottimizzazione principale di questo articolo è dunque ridurre al minimo il numero di vincoli soft (scadenza e annidamento) non soddisfatti e ridurre al minimo il makespan della schedulazione.

Nell'articolo dell'autore Küçükkoç del 2019 ci si concentra su un sistema di macchine AM, sia singole sia multiple, proponendo modelli matematici per l'ottimizzazione [20]. Il problema difatti, con l'obiettivo di minimizzare il makespan, è stato gestito considerando diverse configurazioni delle macchine 3D (macchina singola, macchine parallele identiche e macchine parallele non identiche). I modelli sono stati codificati e risolti tramite il risolutore commerciale IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (v12.8.0).

Nell'articolo degli autori Liu et al. del 2023 il problema target può essere indicato come un problema di scheduling a macchina singola in cui si vuole ridurre al minimo il makespan (C_{max}), tenendo in considerazione il nesting bidimensionale [101]. A differenza della maggior parte dei problemi BPM che sono modellati come problemi a zaino unidimensionali, qui i file STL sono semplificati come riquadri di delimitazione rettangolari minimi che racchiudono le parti. L'area di produzione di ciascuna parte è rappresentata dall'area proiettata del riquadro di delimitazione sulla piattaforma di costruzione della macchina e l'impacchettamento di un gruppo di parti è considerato un problema di impacchettamento rettangolare 2D. In questo articolo è riportato un algoritmo (esatto) di Branch and Price, di cui sono state testate le prestazioni tramite il risolutore commerciale

MIP Gurobi. I risultati riportati in questo articolo dimostrano che per la maggior parte delle istanze testate, tale algoritmo produce risultati simili o identici a quelli di Gurobi con tempi di calcolo ragionevoli e supera Gurobi in termini di qualità della soluzione e tempo di esecuzione su alcune istanze di grandi dimensioni.

Nell'articolo degli autori Ying et al. del 2022 si considera un problema in cui la maggior parte delle soluzioni migliori, sia in termini di qualità e stabilità della soluzione stessa, sono state trovate con l'algoritmo Adjusted Iterated Greedy (AIG) [102]. Il tradizionale modello di AIG non risolve problemi di questa tipologia, qui difatti ne è stato fatto uno ad hoc basandosi sulle principali caratteristiche della produzione additiva. In questo articolo, oltre a tenere in considerazione l'aspetto dei tempi, si tiene in considerazione anche quello dei costi, difatti la funzione obiettivo è volta a minimizzare la totale Earliness+Tardiness e i costi operativi (tempi e costi di produzione sono i principali fattori tenuti in considerazione).

CAPITOLO 2: Powder Bed Fusion

2.1 Introduzione

Uno degli aspetti più importanti dei processi di fusione del letto di polvere (o Powder Bed Fusion, PBF) è proprio la diffusione dello strato di polvere, è difatti necessario sia applicato in modo tale da garantirne l'uniformità e l'omogeneità dello strato stesso. Questo aspetto, a sua volta, garantirà che nessuna incongruenza o difetto degli strati di polvere non sinterizzati, interni o superficiali, sia ereditata dal pezzo finito, che influirebbe negativamente sulle sue proprietà meccaniche e sull'accuratezza dimensionale, causando dunque un drastico deterioramento della qualità.

Prendendo come riferimento l'articolo degli autori Avrampos et al. del 2021, saranno in seguito analizzati i parametri del processo di ricopertura della polvere, intrinseci ed estrinseci, che influenzano la qualità dello strato di polvere non sinterizzato e, in ultima analisi, la qualità del pezzo finito [53]. La qualità dello strato non sinterizzato e la qualità del pezzo finito sono rispettivamente esaminate attraverso alcuni indicatori di qualità dello strato di polvere (PLQI) e indicatori di qualità del pezzo finito (FPQI). Inoltre, sono poi presentati molteplici modi e corrispondenti metodi presenti in letteratura per quantificare la qualità dello strato di polvere, con i vantaggi e gli svantaggi di ciascuno.

Nei processi di fabbricazione additiva a letto di polvere, denominati anche processi di fusione a letto di polvere (PBF), è applicato un sottile strato di polvere sulla superficie superiore di un pistone di fabbricazione che si muove verso il basso. Lo spessore di questo strato varia tipicamente tra 30 e 150 μm . Successivamente una forza energetica adeguatamente controllata e concentrata, come un laser o un fascio di elettroni, segue un determinato percorso di riempimento dello spazio per sinterizzare o fondere la polvere nelle aree predefinite dal software di taglio. La polvere, solidificandosi, crea il materiale di base del pezzo finito. In alternativa, può anche essere presente un ugello che distribuisce un liquido legante (binder) sullo strato di polvere depositato seguendo il percorso definito dal software di taglio. A questo punto, il pistone di fabbricazione si sposta poi verso il basso di un'altezza pari allo spessore dello strato desiderato e un altro strato di polvere è applicato sopra il precedente. La polvere non sinterizzata (o non fusa) funge da materiale di supporto e segue lo stesso processo di solidificazione della polvere. Una volta completata la scansione di ogni strato e rimosso il prodotto finito dalla camera di polverizzazione, la polvere non fusa è poi rimossa con tecniche di aspirazione.

Nella Figura 2.1 è riportata una rappresentazione della tecnica PBF [54]:

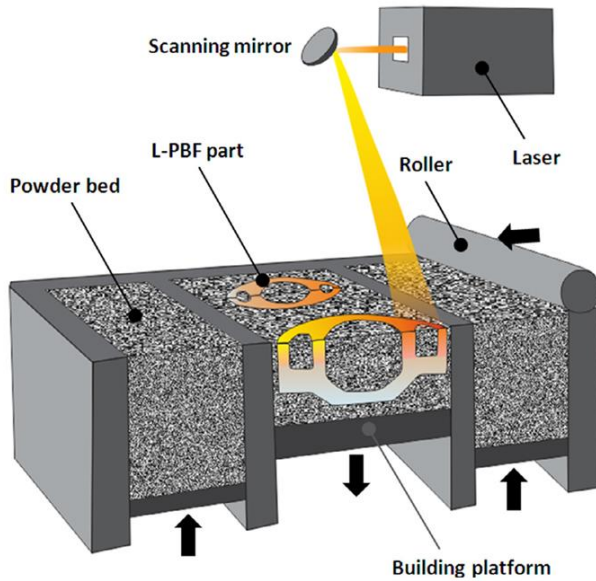


Figura 2.1: Rappresentazione della tecnica PBF

Esistono vari tipi di processi PBF: la categorizzazione può basarsi sul tipo di fonte/metodo di alimentazione utilizzato, sul tipo di polvere impiegata e dal livello di fusione raggiunto dai grani di polvere. Se le particelle di polvere sono completamente fuse, il processo è definito "fusione", se invece lo sono solo parzialmente il processo è definito "sinterizzazione". Se si utilizza un legante liquido, non vi è allora alcuna fonte di energia e la fusione avviene tramite la solidificazione del legante che crea "ponti" tra le particelle. Come mostrato in Tabella 2.1 esistono per la precisione sette sottocategorie di processi PBF [53]. L'aspetto comune a tutte le suddette sottocategorie di PBF è la necessità di spargere strati di polvere uniformi e omogenei per produrre un pezzo finito di alta qualità.

Process	Acronym	Power source/ method	Powder type	Melting level of grain
Selective laser sintering	SLS	Laser beam	Polymer	Partial
Selective laser melting	SLM	Laser beam	Metal	Complete
Direct metal laser sintering	DMLS	Laser beam	Metal	Partial
Selective heat sintering	SHS	Thermal printhead	Polymer	Partial
Electron beam melting	EBM	Electron beam	Metal	Complete
3-Dimensional printing or 3D inkjet powder or binder jet printing	3DP/ 3DIJPP (BJP)	None (drop-on-demand or continuous-jet printheads)	Any	None (liquid binder)
Selective laser reactive sintering	SLRS	Laser beam	Si, ZrO ₂ , Cr, Cr ₂ O ₃	Partial, with simultaneous chemical conversion of solid precursors

Tabella 2.1: Sottocategorie di processi PBF

Quando si parla di processi PBF, la maggior parte delle ricerche si è concentrata sull'interazione del fascio laser con il materiale in polvere. Successivamente alla registrazione di tale risultato sia sperimentalmente che tramite simulazioni, si applica un determinato tipo di controllo ai parametri del fascio laser, alla velocità di scansione o al modello di scansione, così da ottimizzare il risultato ed ottenere le proprietà desiderate del pezzo finito. Tuttavia, non sono stati compiuti altrettanti sforzi di ricerca sul letto di polvere stesso, essendo il processo di stesura della polvere caratterizzato da un livello di complessità particolarmente alto.

Per comprendere appieno lo stato dell'arte del processo di Powder Bed Fusion, è necessario siano approfonditi i seguenti temi e sottotemi:

- 1) I parametri di processo (materiale della polvere, distribuzione granulometrica (Particle Size Distribution - PSD), forma della particella (analisi 2D-3D, circolarità, convessità, allungamento, ecc.), materiale e forma del recoater, strategia di ricopertura (parametri del processo di ricopertura e schema di impostazione/diffusione), spessore nominale ed effettivo dello strato, parametri ambientali (temperatura, umidità, ecc.));
- 2) L'importanza della fluidità della polvere;
- 3) Gli indicatori di qualità dello strato di polvere (rugosità superficiale e distribuzione, densità di riempimento (indicata anche come livello di compattazione della polvere) e distribuzione, aspetto di difetti superficiali (ad esempio, crepe, separazioni, cavità), precisione nel raggiungere lo spessore desiderato dello strato);
- 4) I metodi di misurazione degli indicatori di qualità dello strato di polvere;
- 5) Gli indicatori di qualità del prodotto finito (percentuale di densità/porosità, resistenza alla trazione/allungamento a rottura, durezza, rugosità della superficie, precisione dimensionale, comparsa di difetti superficiali o interni).

2.2 Parametri di processo

Come detto precedentemente, la maggior parte dei lavori in letteratura si concentra sull'interazione tra il materiale e la fonte di energia che esegue la sinterizzazione/fusione delle particelle di polvere. Spesso lo strato di polvere è modellato come un materiale sfuso di densità pari alla media ponderata della densità della materia prima della polvere e dell'aria. È tuttavia da sottolineare che il processo di ricopertura/deposizione dello strato di polvere è di fondamentale importanza, essendo la qualità dello strato direttamente collegata alla qualità del pezzo finito, e che quindi tale semplificazione non è adeguata a simulare la realtà.

Nelle sezioni successive non solo si stabilisce l'importanza di ciascun parametro di processo in sé, ma anche delle interconnessioni tra questi.

2.2.1 Materiale della polvere

Uno dei parametri più importanti di questo processo è il materiale della polvere stesso, poiché definisce le proprietà e le caratteristiche intrinseche del materiale, come la densità apparente o la durezza. Tiwari et al. nell'articolo degli autori Tiwari et al. del 2015 si identificano cinque categorie di materiali adatti alla sinterizzazione laser selettiva (SLS), in particolare: polimeri, ceramici, metalli, compositi e bio-materiali [55].

Nella Tabella 2.2 sono riportati i materiali in polvere (P = Polimeri, M = Metalli, CER = Ceramica, COM = Compositi, BM = Bio Materiali), la distribuzione dimensionale e la forma delle particelle presenti in vari processi PBF [53].

Material	Particle size distribution	Particle shape	Process
Fe-Mn-Si alloy (M)	$d_{50} = 29.7 \mu\text{m}$, $d \in (10,50)\mu\text{m}$	Spherical (mostly)	LPBF-SLM
Cu-doped HAP (CER, BM)	$d < 5 \mu\text{m}$ (est. by film layer thickness)	Non-spherical (concluded by photo)	LPBF-SLS
Al-Si alloys (M)	$d_{50} = 35 \mu\text{m}$, ($d_{10} = 16 \mu\text{m}$, $d_{90} = 56 \mu\text{m}$)	Approximately spherical	LPBF-SLM
Fe-Co alloys (M)	Gaussian, $d_{50} = 38 \mu\text{m}$, $d \in (10,100)\mu\text{m}$	Spherical	LPBF-SLM
Ti-6Al-4V (M)	$d_{v,10} = 45 \mu\text{m}$, $d_{v,50} = 69 \mu\text{m}$, $d_{v,90} = 105 \mu\text{m}$ (virgin) $d_{r,10} = 47 \mu\text{m}$, $d_{r,50} = 71 \mu\text{m}$, $d_{r,90} = 107 \mu\text{m}$ (recycled)	Spherical with few satellites, elongations, irregularly shaped particles and particles with open porosities	EBM
Al ₂ O ₃ (alumina)/Glass (COM)	d_{50} , Alumina $\approx 1 \mu\text{m}$ d_{50} , Glass = $15 \mu\text{m}$, d_{max} , Glass = $50 \mu\text{m}$ (opt. Mix ratio Glass:Alumina = 70:30)	Irregular, highly angular (glass frit, concluded by photo) Not mentioned (Alumina powder)	LPBF-SLS
Stainless steel 316 L (M)	$d_{10} = 20 \mu\text{m}$, $d_{50} = 29 \mu\text{m}$, $d_{90} = 45 \mu\text{m}$	Spherical (produced via gas atomization)	LPBF-SLM
Limestone-soda glass beads (L-S) & ceramic powder (CP) (CER)	(6 bimodal mixtures) Sauter mean diameter $d_{i,1}$ and $d_{i,2}$ (in μm) couples (27,160) (L-S), (86,184) (L-S), (27,184) (L-S), (48,184) (L-S), (22.5,104.2) (CP), (51,104.2) (CP)	Spherical (glass beads) & irregular with sharp edges (ceramic material)	LPBF-SLS
Limestone-soda glass beads (CER)	(Examined d_{50} between 16 and 184 μm) Optimum product strength at $d_{50} = 48 \mu\text{m}$	Spherical	LPBF-SLS
Inconel 718 (M)	$d_{10} = 19.62 \mu\text{m}$, $d_{50} = 34.6 \mu\text{m}$, $d_{90} = 55.23 \mu\text{m}$	Mostly spherical (few satellites and irregularly shaped particles)	LPBF-SLM
Poly- (ethylene terephthalate) (PET) (P)	$d_{f,10} = 23 \mu\text{m}$, $d_{f,50} = 46 \mu\text{m}$, $d_{f,90} = 89 \mu\text{m}$ (fresh) $d_{h-a,10} = 25 \mu\text{m}$, $d_{h-a,50} = 49 \mu\text{m}$, $d_{h-a,90} = 93 \mu\text{m}$ (heat-aged)	Irregular, "like potatoes and carrots" (similar for fresh and heat-aged powder)	LPBF-SLS
PA12 and glass fibres (COM)	d_{50} , PA12 $\approx 50 \mu\text{m}$ $d_{\text{fibre}} = 8 \mu\text{m}$, $L_{\text{fibre}} \in (80,120)\mu\text{m}$	PA12: Complex, non-spherical Fibres: Spherocylindrical shape	LPBF-SLS

Tabella 2.2: materiali in polvere, distribuzione dimensionale e forma delle particelle presenti in processi PBF

Gli autori Singh et al. nel loro articolo del presentano la seguente Tabella (Tabella 2.3), in cui sono elencati i principali produttori di macchine commerciali e i fornitori di materiali di tutti i processi PBF [56].

Name	Manufacturer(s)	Material provider(s)
SLS, selective heat sintering	3DSYSTEMS, Farsoon Technologies, Blueprinter (Denmark), eos, MC Machinery Systems, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.	3DSYSTEMS, Paramount Product Development Specialists, Farsoon Technologies, Concept Laser, eos, LuxExcel, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.
Selective laser melting	MICROFABRICA, REALIZER, SLM Solutions, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.	MICROFABRICA, REALIZER, SLM Solutions, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.
Metal laser melting	Concept Laser	Concept Laser
EBM	Arcam (Sweedon), Sciaky	Arcam (Sweedon), Sciaky
Laser metal deposition	BEAM (France)	BEAM (France)
Inkjet, poly jet, binder jet	Envisiontec, ExOne, MicroFab, Stratasys, Solidscape	Envisiontec, ExOne, MicroFab, Prodways, Stratasys, Solidscape
SLA, lithography-based ceramic manufacturing	3DSYSTEMS, CMET Inc., Somos, Lithoz, Prodways, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.	3DSYSTEMS, CMET Inc., Somos, Lithoz, Prodways, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.
Digital wax machine	DWS	DWS
FDM	UP-3D, Stratasys, CandyFab, Fab@Home, MAKERBOT, Solidscape, Polyflex	UP-3D, Stratasys, CandyFab, Fab@Home, MAKERBOT, LuxExcel, RepRap, Solidscape, Argyle Materials Inc., Polymakers [®]
DMLS	Insstek	Concept Laser, Insstek
Metal powder bed fusion	Renishaw	Renishaw
Ultrasonic additive manufacturing	Fabrisonic	Fabrisonic
LENS	Optomec	Optomec, Concept Laser
LOM	Cubic Technologies	Cubic Technologies
3DP	Asiga, Keyence Corporation	Asiga, Keyence Corporation
ZCast	ZCast	ZCast

Tabella 2.3: Tecniche AM con i relativi produttori di macchine commerciali e fornitori di materiali

Ad influire sulla composizione della polvere è anche il rapporto tra polvere vergine e polvere riciclata utilizzata per il processo, poiché quest'ultima è stata influenzata sia dalle interazioni meccaniche durante la fase di stesura che dal calore durante la fase di stampa, comportando una variazione nella concentrazione di ciascun ingrediente nelle particelle (ad esempio, aumento dell'O, leggera diminuzione di Al e V, ecc.). Inoltre, la polvere riutilizzata ha una PSD più stretta ed una rotondità significativamente inferiore (per via degli urti subiti a causa delle collisioni durante gli usi precedenti) e la maggior parte dell'umidità è stata dissipata dal calore dei cicli precedenti: tutti questi sono fattori che aumentano la fluidità. Nelle leghe, la variazione di concentrazione potrebbe essere un effetto dell'evaporazione di un metallo durante il riscaldamento della particella, che porta per l'appunto alla diminuzione della concentrazione del metallo stesso nella polvere impiegata.

Approfondimenti sulla valutazione dell'effetto del riutilizzo della polvere si trovano ad esempio negli articoli degli autori Popov et. al del 2018 e Tang et al. del 2015 ([57] e [58]). La Tabella 2.4 presenta le interconnessioni tra il materiale della polvere e gli altri parametri di processo della deposizione di polvere per i processi PBF [53].

1. Powder material	
2. PSD	<p>Polymers: $d_{50} = 50\text{--}90\ \mu\text{m}$ Metal: $d_{50} = 20\text{--}100\ \mu\text{m}$ Ceramic: $d_{50} = 40\text{--}60\ \mu\text{m}$ Composites: $d_{50,\text{matrix}} =$ (same as in the matrix material's category) $d_{50,\text{reinforcement}} \leq 0.1 \cdot d_{50,\text{matrix}}$ $d_{50} \approx 20\ \mu\text{m}$ (avg.) Bio-material: $d_{50} \approx 20\ \mu\text{m}$ (avg.)</p>
3. Particle shape	<p>Polymers: Mostly irregular, with rounded edges Metal: Mostly spherical, few satellites and irregular ones Ceramic: Sometimes spherical (e.g., glass beads), others irregular and highly angular (e.g., glass frit)</p>
4. Recoater material	Any combination is viable. Metal recoaters: not suitable for ferromagnetic powders . Similarly, the combination of recoater-powder materials that can both get electrostatically charged is to be avoided.
5. Recoater shape	This relationship has not been studied in literature.
6. Recoating strategy	This relationship has not been studied in literature.
7. Layer thickness	The connection can be made via the connection between the 1–2 and 2–7 boxes (Typical PSD for each material and layer thickness limitations due to PSD respectively)
8. Environmental parameters	Different materials require different preheating and chamber conditions (e.g., metals require less humidity and no oxygen , to avoid oxidation and chemisorption). Polymers get tribocharged and their cohesion \uparrow in very low humidity (RH < 20%).

Tabella 2.4: Interconnessioni tra il materiale della polvere e gli altri parametri di processo per il processo di PBF

I polimeri sono stati tra i primi materiali ad essere utilizzati nella Selective Laser Sintering, considerando che il Nylon 11 (noto anche come Poliammide o PA 11) è in uso da 1993. La dimensione delle particelle (d_{50}) delle polveri polimeriche per i processi PBF è compresa tra i 50 e i 90 μm . I polimeri possono essere categorizzati sia in base alla loro struttura (termoplastici, dunque semi-cristallini o amorfi, e termoindurenti) sia in base alle loro applicazioni. Nell'articolo degli autori Bourell et. al del 2017, oltre a sottolineare l'importanza della fluidità della polvere per la qualità del pezzo finito, si identificano soprattutto i polimeri semicristallini, ad esempio il PA11 e PA12, come materiali più che adatti alla PBF, ad eccezione di alcuni amorfi, come il polistirene [59]. Un elenco completo dei materiali polimerici utilizzati nei processi di PBF, ponendo l'accento sulle caratteristiche meccaniche e della fluidità della polvere, è presente nell'articolo degli autori Leigh et al. del 2020.

Le ceramiche, come la silice o l'allumina, sono state utilizzate per decenni nei processi di PBF: i materiali ceramici sono ampiamente impiegati per realizzare componenti di motori e propulsori in applicazioni aerospaziali, automobilistiche ed energetiche, come isolanti

termici e come anche materiali strutturali. Grazie alla loro resistenza meccanica e durezza, alla loro stabilità termica e chimica, oltre che alle loro valide prestazioni termiche, ottiche, elettriche e magnetiche, questi materiali trovano applicazione in una vasta gamma di campi. Tuttavia, le temperature di fusione molto elevate rendono molto difficile la produzione di parti in ceramica con i processi PBF, soprattutto utilizzando esclusivamente le tecniche SLS, SLM o EBM senza un materiale legante che fonda ad una temperatura inferiore per creare un ponte tra le particelle ceramiche. Inoltre, è stato dimostrato che la densità delle parti in ceramica prodotte con le tecniche di Powder Bed Fusion è piuttosto bassa (e dunque sono caratterizzate da una porosità elevata). Questi fattori, in combinazione con l'elevato ritiro dovuto all'alto gradiente di temperatura, mostrano perché la 3DP (o BJP) fra tutte sia la tecnica più promettente per la stampa 3D di parti in ceramica.

I metalli e le loro leghe sono ampiamente utilizzati nei processi PBF, in particolare nella Selective Laser Melting e nell'Electron Beam Melting, poiché possono fondere completamente e migliorare le loro proprietà meccaniche durante il processo di raffreddamento-solidificazione, formando allo stesso tempo pezzi densi e a bassa porosità. Il fatto che la velocità di raffreddamento e lo schema di riscaldamento-raffreddamento seguito possano definire la microstruttura e variare le proprietà meccaniche di un metallo in base a come ritenuto opportuno rende i metalli materiali estremamente versatili. Nei processi PBF sono stati impiegati diversi metalli, come leghe di alluminio (ad esempio, Al6063 e Al3003), leghe di titanio (ad esempio, Ti-6Al-4V), acciaio inossidabile, tungsteno, ecc. La sfida principale con questi materiali è quella di garantire che il letto di polvere sia di alta qualità e che non causi difetti, poiché i più piccoli difetti possono influenzare drasticamente la velocità di raffreddamento o il gradiente di temperatura, e quindi anche la microstruttura del pezzo finito.

I compositi sono materiali che si formano combinando due o più materiali con proprietà differenti, senza dissolverli o fonderli l'uno nell'altro. Gli autori Puttegowda et al. nel loro articolo del 2018 definiscono i materiali compositi come strutture costituite da due materiali che possono essere macroscopicamente identificati e che nell'insieme creano una “superior structure” [61]. Questi materiali sono tipicamente costituiti da una matrice, che deve essere omogenea il più possibile, e dal rinforzo, che deve essere distribuito uniformemente all'interno della matrice affinché il composito si sviluppi correttamente. I compositi sono stati impiegati in quasi tutti i tipi di industria, avendo questi proprietà superiori rispetto a quelle dei materiali comuni, come metalli, polimeri, ceramiche, ecc.

I biomateriali, nonostante siano composti da materiali che possono essere classificati nelle quattro categorie sopra citate, sono una categoria di materiali ben definita e a sé stante, in grado di offrire notevoli caratteristiche come resistenza meccanica, leggerezza, porosità, ecc. Gli autori Hudecki et al. nel loro articolo del 2019 presentano un'ampia rassegna delle categorie in cui possono essere classificati i bio-materiali, nominando vari esempi di metalli/leghe, biopolimeri, ceramiche e bio-compositi, oltre ad indicare le proprietà di base che un materiale deve avere per poter essere utilizzato come bio-materiale [62]. Gli autori Nouri et al. nel loro articolo del 2021, invece, forniscono una rassegna della produzione additiva di biomateriali portanti, sottolineando che, nel campo dei biomateriali la SLS si concentra principalmente sulla lavorazione di polimeri, ceramiche e loro compositi, a differenza della SLM e della DMLS che sono utilizzate d'altro canto per sviluppare parti in metallo e loro leghe [63]. Infine, nell'articolo degli autori Harun et. al del 2018 sono fornite informazioni molto dettagliate su ogni aspetto della fabbricazione additiva di bio-materiali: dalla distribuzione dimensionale richiesta della polvere alla dimensione media delle particelle e al materiale ottimale per ogni diverso processo AM, fino alla microstruttura e alle proprietà meccaniche delle parti sviluppate [64].

2.2.2 Distribuzione granulometrica (PSD)

La percentuale di particolato fine all'interno della polvere influisce direttamente sulla sua fluidità; più precisamente, esiste una soglia di percentuale di particolato fine oltre la quale la polvere non è più spalmabile attraverso un recoater. Questo accade perché più piccole sono le dimensioni delle particelle, maggiore è l'effetto delle forze coesive tra le particelle e delle forze adesive tra le particelle ed il recoater stesso. Le forze di Van der Waals, difatti, superano in questo caso l'effetto delle forze gravitazionali, impedendo alla polvere di formare uno strato omogeneo e uniforme sul substrato.

Una PSD può essere unimodale, bimodale o addirittura multimodale: ciò significa che il diagramma della funzione di distribuzione della grandezza delle particelle presenta uno, due o molti picchi. È stato riscontrato che una PSD bimodale influisce positivamente sulla densità di impaccamento dello strato, poiché le particelle fini si raccolgono negli spazi vuoti tra le particelle grossolane, diminuendo essenzialmente i grandi spazi vuoti e riducendo quindi drasticamente la porosità dello strato.

Gli autori Egger et al. e Spierings et al. nei loro articoli corrispondentemente del 1999 e del 2009 hanno definito alcune relazioni tra le dimensioni delle particelle fini e grossolane e lo spessore effettivo dello strato (t_{eff}) ([65] e [66]). Queste relazioni, se applicate e soddisfatte,

garantiscono che l'aumento della quantità di polveri fini non abbia un impatto negativo né sulla fluidità né sulla rugosità superficiale dello strato, oltre che neppure sulla densità di impaccamento. Più specificamente, i requisiti che hanno indicato sono i seguenti:

1. $t_{eff} > D_{90}$, tipicamente si ha $\frac{t_{eff}}{D_{90}} \cong 1,5$;
2. $\frac{D_{50}}{D_{10}} \in [1,4 ; 2,5]$, con $D_{10} \geq 5 \mu m$;
3. $\frac{D_{90}}{D_{10}} \in [2 ; 5]$, tipicamente si ha $\frac{D_{90}}{D_{10}} \cong 5$.

Questi requisiti stabiliscono una PSD ragionevolmente stretta per le polveri unimodali: ciò significa che, in generale, le PSD strette favoriscono un buon flusso.

Si precisa che non è vero che le polveri bimodali o quelle con una PSD più ampia non possano fluire altrettanto bene da formare uno strato uniforme e omogeneo, ma in questi casi è necessario applicare una determinata compensazione essendoci una scarsa scorrevolezza dovuta alle forze coesive che le particelle fini introducono (difatti, queste fungono da satelliti per quelle grossolane e diminuiscono dunque la mobilità dei grani).

Per le polveri bimodali, i requisiti assumono la forma mostrata nelle seguenti equazioni:

4. $t_{eff} > D_{90, non\ fine}$, tipicamente si ha $\frac{t_{eff}}{D_{90, non\ fine}} \cong 1,5$;
5. $\frac{D_{50, non\ fine}}{D_{50, fine}} \geq 10$, con $D_{10, fine} \geq 5 \mu m$;
6. $\frac{m_{non\ fine}}{m_{fine}} \cong \frac{7}{3}$.

Inoltre, le polveri con una PSD più ampia sono più inclini a sviluppare agglomerati e cluster, determinando vuoti sul letto di polvere o addirittura linee causate dal trascinamento dell'agglomerato da parte del recoater.

Gli autori Weaver et al. nel loro articolo del 2021 suggeriscono che, anche se è noto che una dimensione minore delle particelle aumenti le forze adesive e coesive, per stabilire un collegamento più preciso tra la qualità del pezzo finito e la PSD è necessario controllare più strettamente la morfologia, la forma e la chimica della polvere stessa [67]. Essi suggeriscono difatti che, per garantire che gli strati di polvere che saranno creati siano identici in termini di indicatori di qualità dello strato di polvere, un modo utile potrebbe essere quello di creare diversi campioni di PSD con lo stesso lotto di polvere prima di eseguire esperimenti a titolo comparativo.

Definendo le interconnessioni tra la distribuzione granulometrica e gli altri parametri di processo della deposizione di polvere per le tecniche di PBF e prendendo in esempio la relazione tra la forma delle particelle e la PSD, più le particelle sono sferiche e più aumenta

la fluidità, tenendo conto che più piccole sono le particelle e maggiore è la probabilità che queste siano meno sferiche. Inoltre, più le particelle sono fini e più dovrebbero essere spalmate con strumenti realizzati con materiali a minore energia superficiale, di modo da ridurre al minimo le forze di adesione e la “appiccicosità”: tendenzialmente in questi casi si predilige uno strumento rivestito con materiali polimerici, a seguire con materiali ceramici e infine con materiali metallici.

Le polveri con una PSD stretta mostrano sì una migliore scorrevolezza, ma le particelle con PSD più ampia o le polveri bimodali possono anche offrire una migliore densità di impaccamento purché distribuite in modo uniforme. Essendo le polveri con PSD più ampia e le bimodali più coesive, in questi casi sono preferibili i rivestimenti con una forza di compressione maggiore (lama rotonda > rullo > lama verticale) e da qui la relazione tra la forma del recoater e la PSD.

Infine, essendo le polveri con una PSD più ampia più soggette alla segregazione durante la ricopertura, è opportuno in questi casi fare uso anche di un setaccio oltre che ad una lama ed un rullo, di modo così da ottenere una densità di impacchettamento e una rugosità dello strato ottimali (relazione fra la strategia di ricopertura e la PSD).

2.2.3 Forma della particella (analisi 2D-3D, circolarità, convessità, allungamento, ecc.)

Come già detto precedentemente, la forma delle particelle influisce sulla fluidità della polvere. È stato dimostrato che una sfericità e una rotondità più elevate favoriscono una buona fluidità della polvere, grazie al minore incastro delle particelle tra loro e alla naturale capacità della sfera di rotolare facilmente, causando collisioni più prevedibili rispetto alle particelle di forma irregolare. Inoltre, le particelle di forma irregolare sono più inclini all'assorbimento, implicando il fatto che un aumento del livello di umidità renderà tali polveri più coese tra loro rispetto alle polveri con particelle quasi sferiche.

La sfericità è data dal seguente rapporto: $\varphi = \frac{S_n}{S} = \frac{\sqrt[3]{36 * \pi * V^2}}{S}$, dove S_n è l'area superficiale nominale (vale a dire l'area superficiale di una sfera che ha lo stesso volume della particella in esame), S e V sono invece rispettivamente l'area superficiale e il volume effettivi della particella.

L'equivalente 2D della sfericità è la circolarità (C), definita come: $C = \frac{4 * \pi * S}{P^2}$, dove S è la superficie e P è il perimetro della traccia 2D della particella in oggetto.

Sia la sfericità che la circolarità possono assumere come massimo valore 1, per le forme sferiche / circolari, e minimo valore 0, per le forme allungate.

Sebbene la sfericità sia un buon indicatore di quanto la superficie di una particella 3D si avvicini alla sfera di pari volume, non è comunque sufficiente e proprio per questo motivo si considera anche il parametro della rotondità (R). Questo indicatore, essendo una proprietà 3D, può essere calcolato definendo l'oriented bounding box (OBB) e il suo ellissoide di riferimento tramite l'analisi delle componenti principali (PCA). La rotondità è dunque data dal seguente rapporto: $R = \frac{V}{(S * \sqrt[3]{a * b * c})}$, dove a, b, c sono le lunghezze degli assi principali dell'ellissoide di riferimento, V e S invece rispettivamente il volume e la superficie della particella.

La sfericità e la rotondità sono sufficienti a determinare la pertinenza della forma della particella rispetto alla forma sferica perfetta e ottimale. Tuttavia, è stato osservato che nella maggior parte dei lavori di ricerca presenti in letteratura gli autori usano il termine "sfericità" in modo astratto sia per descrivere la sfericità di una particella dal punto di vista del volume sia per indicare quanto questa sia liscia e rotonda, causando interpretazioni errate dei risultati e delle deduzioni degli autori.

È indubbiamente più semplice sviluppare modelli DEM¹ per la simulazione dello spargimento di polveri basati su particelle sferiche; tuttavia, questa semplificazione non sempre porta a risultati realistici, poiché le polveri a volte hanno forme irregolari, o addirittura è possibile che le particelle di alcuni materiali abbiano volutamente una forma alternativa (ad esempio, sferocilindrica). Il metodo più comune per modellare particelle di forma irregolare consiste nel combinare insieme un certo numero di sfere, definendo le coordinate dei loro centri e le distanze tra essi, di modo da creare una nuova particella. In molti lavori questo è stato un metodo per creare particelle con forme molto angolari ed irregolari, essendo lo scopo di questi studi quello di approssimare il più possibile la forma reale delle particelle. Esistono anche studi, come quello degli autori Nasato et al. riportato nel loro articolo del 2020, che ottimizzano questo processo, riuscendo a ottenere una somiglianza accettabile dei modelli di particelle di polvere con le parti reali utilizzando un numero minimo di sfere (aspetto incredibilmente importante poiché, anche se è facile utilizzare un gran numero di sfere per combinarle tra loro e sviluppare il modello della particella reale con un'elevata precisione dimensionale, maggiore è il numero di sfere e maggiore è il costo computazionale e quindi il tempo necessario per la simulazione) [68].

¹ Il Modello Digitale di Elevazione (Digital Elevation Model – DEM) è una generica superficie statistica in cui ad un numero finito di coppie (X, Y) è attribuita un'elevazione, una Z, corrispondente. (DTM e DSM e DEM - i modelli digitali di elevazione | 3DMetrica)

È stato anche dimostrato che il riutilizzo della polvere influisce sia sulla PSD che sulla forma delle particelle. Nell'articolo del 2021 degli autori Soundarapandiyan et al. è dimostrato che la polvere riciclata ha una migliore sfericità, una migliore fluidità (essendoci una minore quantità di satelliti e di polveri fini) e un migliore comportamento di impaccamento (per via di una minore coesione complessiva, essendo la sfericità più alta e la quantità di fini/satelliti minore) [69]. Tuttavia, è sì possibile che nella polvere riutilizzata la sfericità aumenti leggermente, ma anche che la rotondità delle particelle diminuisca in modo significativo, dato che generalmente, durante il riutilizzo della polvere, le particelle tendono a scontrarsi sia tra loro sia con il substrato sia con il recoater, perdendo dunque di rotondità e di levigatezza. Infine, le particelle di polvere meno sferiche mostrano una maggiore sensibilità alle variazioni di spessore dello strato, aspetto che influisce negativamente sulla qualità dello strato del letto di polvere.

Se si considera la relazione tra lo spessore dello strato e la forma delle particelle, non è sufficiente considerare il diametro medio delle particelle irregolari per stabilire lo spessore minimo dello strato: è necessario infatti misurare la lunghezza maggiore delle particelle di dimensioni D_{90} , poiché queste potrebbero orientarsi nello spazio tra il recoater e il substrato e bloccarlo, essere trascinate e creare difetti o semplicemente ridurre la fluidità o la distribuzione uniforme del flusso e delle forze di compressione/taglio.

2.2.4 Materiale del recoater

In questa sezione si esamina l'effetto dei diversi materiali di rivestimento del recoater. Quanto più duro è il materiale del recoater, tante più vibrazioni infligge al pezzo che si sta costruendo se questo si scontra accidentalmente con qualche sporgenza solidificata dello strato precedente, creando una piccola fessura ai lati alla sporgenza solidificata. Questo comporta che il nuovo strato di polvere abbia un'irregolarità e che quindi il pezzo finito presenti conseguenti imprecisioni dimensionali. In alcuni casi, questa collisione può anche distorcere o spostare leggermente il pezzo già solidificato, causando una posizione relativa impropria degli strati, che porta nuovamente a imprecisioni dimensionali. Invece, le lame di ricopertura meno dure riducono al minimo o addirittura eliminano queste vibrazioni, garantendo l'accuratezza dimensionale del pezzo finito.

Gli autori Shamsdini et al. nel loro articolo del 2021 hanno esaminato l'effetto dell'utilizzo di lame di rivestimento di materiali diversi: uno di elevata durezza, realizzato in materiale ceramico (ZrO_2) e uno meno duro, realizzato con una spazzola in fibra di carbonio [70]. È stato dimostrato che, sebbene lo snervamento e il carico di rottura dei campioni realizzati

con spazzole (LPBF-Brush) e quelli realizzati con rivestimenti ceramici (LPBF-Ceramic) siano pressoché identici, i campioni LPBF-Brush presentano gravi carenze in termini di duttilità e resistenza alla trazione. Si ipotizza che il recoater di materiale più duro possa essere in grado di applicare una pressione maggiore per aumentare la densità di impaccamento, ma il recoater di materiale meno duro applica la polvere in modo più delicato, consentendo il movimento delle particelle più fini. È comunque da sottolineare che i campioni LPBF-Brush mostrano l'emergere di micro-vuoti che inglobano la polvere non fusa, influenzando negativamente dunque sulla duttilità del pezzo.

Sono poi state fatte ulteriori significative osservazioni sul materiale dei recoater e su quando sia opportuno preferire materiali più duri (ad esempio, in HSS o ceramica) e meno duri (in fibra di carbonio, silicone o gomma nitrilica butadiene-NBR per citarne alcuni) [71]. I recoater di materiali più duri garantiscono una maggiore compattazione della polvere, oltre a una maggiore ripetibilità e consistenza in termini di spessore dello strato di polvere. Sono in grado di rimuovere gli spruzzi dal letto di polvere, "pulendo" efficacemente l'area contaminata e prevenendo difetti della superficie dello strato. Presentano l'ulteriore vantaggio di una resistenza all'usura superiore e di una durabilità maggiore, anche se più costosi rispetto ai materiali meno duri. Tuttavia, a causa della loro rigidità, se lo strato precedente ha formato delle sporgenze durante la solidificazione, come già detto precedentemente, il contatto con la lama danneggerà il recoater o sposterà anche solo leggermente il pezzo, causando imprecisioni dimensionali. Inoltre, nel caso di un materiale in polvere magnetizzabile, come le polveri ferromagnetiche, un recoater in materiale sufficientemente duro può essere solo in ceramica, poiché l'acciaio potrebbe le particelle a aderire alla lama del recoater stesso. D'altra parte, il principale vantaggio di un rigeneratore di materiale meno duro è la possibilità di costruire facilmente geometrie fragili e parti con un rapporto d'aspetto elevato, poiché le forze di attrito sono molto più ridotte e il rischio di rottura del pezzo o della lama è minore in caso di collisione con una sporgenza solidificata dello strato precedente. Inoltre, è meno probabile che si creino vibrazioni che sarebbero trasferite allo strato di polvere sotto forma di ondulazioni, proprio grazie alle forze di attrito ridotte.

2.2.5 Forma del recoater

Gli autori Haeri et al. nel loro articolo del 2017 hanno dimostrato che, nelle stesse condizioni operative (velocità di traslazione del recoater e spessore dello strato) e per la stessa polvere, un rullo controrotante performa meglio di una racla, a causa del "contatto inadeguato di una

lama con il letto di polvere, che causa il trascinarsi delle particelle e degrada la qualità del letto di polvere stesso” [72].

Gli autori Zhang et al., invece, nel loro articolo del 2020 hanno esaminato il rullo controrotante come mezzo per la diffusione della polvere e hanno dedotto che, all'aumentare del diametro del cilindro, aumenta la zona di compressione della polvere e quindi la densità di impaccamento dello strato [73]. Si noti tuttavia che questo vale solo fino a un certo punto perché, se la forza di compressione diventa troppo forte e lo spessore dello strato non aumenta per distribuire questa forza maggiore in un volume più ampio, lo strato di polvere si rompe e interi pezzi di crosta sono trascinati dal rullo lungo la superficie, distruggendo inevitabilmente lo strato.

Inoltre, è stato dimostrato che i recoater inclinati applicano una maggiore forza di compressione sullo strato applicato, che può portare a una maggiore densità di impaccamento, ma solo se la deposizione rimane regolare e senza fenomeni di scoppio o inceppamento delle particelle.

Dall'autore Haeri nel suo articolo del 2017 sono anche state esaminate diverse forme di profilo per gli spanditori di polvere a lama verticale e come il profilo di queste influisca sul risultato dello strato di polvere depositato [74]. In particolare, per definire il profilo della lama è stato utilizzato un profilo super-ellittico e in questo documento ne sono stati definiti i valori ottimali di modo da garantire un profilo di velocità omogeneo del flusso. Per questi valori e tramite simulazioni in cui sono stati utilizzati modelli realistici di particelle multi-sfera, il risultato della ricopertura è stato confrontato con quello di uno spandimento a rulli controrotanti con la stessa velocità di traslazione e la stessa distanza dal substrato. Anche se si osserva la stessa tendenza (l'aumento della velocità di traslazione riduce la densità di impaccamento e aumenta la rugosità superficiale dello strato depositato), la rugosità superficiale ottenuta dalla lama con i parametri ottimizzati è inferiore a quella ottenuta dal rullo controrotante e la densità di impaccamento della lama è superiore a quella del rullo, con un'eccezione per velocità di traslazione molto basse. Inoltre, la densità di impaccamento ottenuta dalla lama è molto meno influenzata dall'aumento della velocità di traslazione rispetto a quella ottenuta dal rullo e ciò potrebbe essere un effetto del fenomeno di esplosione delle particelle, che si intensifica per un rullo controrotante ad alte velocità e che diminuisce l'effetto positivo dell'elevata forza di compressione. La lama a profilo super-ellittico è un caso simile a quello della lama rotonda, nel senso che, nonostante l'elevata forza di compressione che applica allo strato, non provoca alcun conflitto di movimento delle

particelle nella regione di compattazione rispetto al rullo controrotante ed è quindi immune al fenomeno dello scoppio delle particelle.

Gli autori Wang et al. nel loro articolo del 2021 hanno esaminato varie forme di recoater: in particolare la lama inclinata, la lama declinata, la lama verticale, la lama larga, il rullo controrotante e la lama rotonda [75].

In termini di volume di particelle depositate, l'ordine dal più alto (l'ottimale) al più basso è: lama rotonda > lama inclinata > rullo, ma per spessori nominali maggiori può anche essere che rullo > lama inclinata.

In termini di trasmissione delle forze di contatto alla parte sottostante, l'ordine è invece: lama rotonda > rullo > lama inclinata > lama verticale. Si noti che, da un lato, forze di contatto elevate nella zona di compattazione promuovono una maggiore densità di impaccamento e, dall'altro, trasmettono forze più elevate sul pezzo da costruire attraverso l'attrito, aumentando però il rischio di deformazione o di leggero spostamento e quindi causando errori dimensionali. In vista di ciò, risulta perciò evidente la necessità di trovare una tipologia di recoater ottimale per garantire sia un'elevata densità di impaccamento sia per prevenire i rischi di difetti del pezzo finito.

In termini di importanza del fenomeno dell'esplosione di particelle, l'ordine da quello più colpito a quello meno colpito (l'ottimale) è: rullo > lama inclinata > lama verticale > lama rotonda.

Il sistema a lame rotonde, infine, presenta la minore segregazione delle dimensioni delle particelle, a differenza del sistema a rulli che ne presenta la maggiore. La segregazione dipende in larga misura dal grado di miscelazione delle particelle nel cumulo di polvere durante la ricopertura, che è favorita dalla rotazione antioraria del rullo.

2.2.6 Parametri del processo di ricopertura e configurazione - schema di spalmatura

I parametri del processo di ricopertura si riferiscono strettamente alla configurazione del sistema di deposizione della polvere e sono: la velocità di traslazione del recoater (importante indipendentemente dalla forma e dalle caratteristiche geometriche generali dello stesso), la velocità angolare del recoater (nel caso di un rullo), il senso di rotazione del recoater (in senso orario o antiorario, sempre nel caso di un rullo) e l'angolo di inclinazione della racla.

In base all'impostazione del sistema di deposizione delle polveri (PDS) di ogni macchina, esistono diversi schemi di spalmatura della polvere (termine che in molti lavori si trova anche come "strategie di ricopertura"), come la deposizione di questa tramite: rullo rotante

in senso orario o antiorario, lama rotonda, lama inclinata, lama verticale, combinazione di una racla seguita da un rullo rotante in senso orario, ecc. Nell'articolo degli autori Budding et. al del 2013 è stato dimostrato però che la strategia del rullo a rotazione in senso antiorario porta quasi sempre alla separazione della superficie dello strato, distruggendolo, a causa delle forze di compressione molto elevate [76].

Gli autori Zhang et al. nel loro articolo del 2020, precedentemente citato, hanno esaminato la dinamica e i risultati ottenuti da un rullo che ruota in senso antiorario, considerando fattori come il diametro del rullo, lo spessore nominale dello strato, la velocità di traslazione e di rotolamento del rullo [73]. La velocità di traslazione è considerato il fattore più importante, poiché, se aumenta oltre un limite, non è possibile che lo strato di polvere mantenga una bassa rugosità superficiale e una buona densità di impaccamento. A seconda del fenomeno di scoppio delle particelle (causato dal conflitto di movimento delle particelle tra il recoater e il substrato), l'aumento della velocità di traslazione, soprattutto nel caso di un rullo CCW, causa una superficie altamente disomogenea, al punto che anche lo spessore dello strato ottenuto risulta essere molto diverso rispetto allo spessore effettivo previsto.

2.2.7 Spessore nominale, effettivo e reale dello strato

Quando in un processo di PBF si deposita il primo strato di polvere sul pistone di fabbricazione che si muove verso il basso, lo spessore previsto dello strato è pari alla distanza verticale tra la superficie superiore del pistone e la superficie del bordo inferiore del recoater mentre si muove lungo l'asse x. Il secondo strato sarà depositato sul primo strato di polvere dopo che il pistone si sarà spostato verso il basso di ΔH , dove ΔH è lo strato nominale di deposizione della polvere per i processi PBF ed è pari allo spostamento verso il basso del pistone di fabbricazione tra due strati di polvere successivi. Si deve comunque precisare che la polvere ha alcune caratteristiche reologiche specifiche che, in combinazione con la geometria e il movimento del recoater, definiscono il modo in cui la polvere sarà distribuita sul substrato, sia esso la superficie del pistone o lo strato di polvere precedente. Più specificamente, in base ai fenomeni di attrito-movimento tra le particelle di polvere e il substrato, la superficie superiore dello strato di polvere non è un piano perfettamente livellato, ma presenta alcune asperità e, a seconda dei parametri di spalmatura e delle caratteristiche della polvere, può persino presentare alcuni crateri, picchi e/o ondulazioni.

Una volta completata la sinterizzazione/fusione dello strato n-esimo, il pistone si abbassa di una distanza pari allo spessore nominale per consentire al recoater di stendere lo strato di n + 1 di polvere. Tuttavia, quando le particelle dello strato precedente si sono fuse, il materiale

fuso ha riempito i vuoti tra di queste e andando così a ridurre la porosità dello strato. È persino possibile che si verifichino fenomeni di infiltrazione, in cui il materiale fuso si infila in qualche misura nella vicina polvere non sinterizzata. Inoltre, durante il consolidamento del materiale fuso si verifica un ulteriore ritiro. Questi fenomeni fanno sì che la superficie superiore dello strato di polvere n-esimo sia più bassa rispetto al punto in cui si trovava prima del processo di fusione/sinterizzazione. L'altezza dello strato misurata tra la superficie superiore dello strato di polvere n-esimo dopo il ritiro e la superficie dello strato di polvere n + 1 prima del ritiro è definita spessore effettivo dello strato (t_{eff}). Nell'articolo degli autori Jacob et al. del 2018 è stata attribuita la differenza tra lo spessore effettivo e quello nominale dello strato alla fusione e al ritiro di consolidamento dello strato, definendo equazioni che calcolano lo spessore effettivo dello strato come segue:

$$t_{eff,n+1} = t_{eff,n} + (t_{shrink,n} - t_{shrink,n-1})$$

$$t_{shrink,n} = t_{eff,n} \cdot (1 - \varphi_n), \text{ dove } \varphi_n \text{ è la densità di impaccamento dello strato n-esimo.}$$

È necessario, per garantire che tutti i livelli abbiano una polvere dello stesso PSD, che:

$$d_{90} < t_{act,min} = t_{nom}$$

Questo vincolo sta a significare che, per ogni singolo strato, dal primo all'ultimo depositato, la dimensione massima delle particelle deve essere approssimativamente inferiore allo spessore effettivo dello strato, altrimenti le particelle più grandi saranno trascinate dal recoater lungo il substrato, creando scanalature nello strato di polvere appena depositato. Anche se non causano scanalature, se le particelle più grandi sono trascinate via, lo strato sarà composto solo da particelle più fini, il che significa che la PSD della polvere depositata sarà diversa dalla PSD effettiva della polvere, inserendo un errore tra gli strati [77].

2.2.8 Parametri ambientali (temperatura, umidità, ecc.)

Un aspetto poco analizzato nella letteratura è l'effetto dei fattori ambientali sulle caratteristiche reologiche della polvere e sul suo processo di spalmatura in generale. Se è stato dimostrato che la temperatura della camera di costruzione e l'umidità giocano un ruolo importante nel processo termico di sinterizzazione/fusione e solidificazione della polvere, pochi hanno esaminato come questi fattori influenzino il processo di spandimento della polvere e quale sia la connessione tra questi e gli altri parametri del processo.

Quando si parla di umidità, l'umidità relativa indica la quantità di acqua in forma di vapore presente nell'atmosfera o, in questo caso, in una camera chiusa. Le molecole d'acqua vaporizzate possono entrare in contatto con le particelle di polvere e così, a seconda delle proprietà igroscopiche del materiale, possono anche essere assorbite o adsorbite dalla

particella di polvere, influenzandone drasticamente le caratteristiche meccaniche e reologiche. Come detto, l'umidità può dunque influenzare le particelle in due modi: tramite assorbimento o adsorbimento. Nel primo caso, la particella di polvere assorbe le molecole d'acqua, con il risultato di una concentrazione uniforme di molecole d'acqua in tutto il suo volume. Al contrario, nel secondo caso, le molecole d'acqua si attaccano alla superficie esterna della particella, circondandola anziché permeare all'interno del suo volume. Più alta è l'umidità relativa (RH) della camera, più molecole d'acqua saranno assorbite e adsorbite dalle particelle di polvere.

Il coefficiente di assorbimento dell'acqua dipende soprattutto dal materiale: alcuni materiali (detti "igroscopici", come polimeri quali il PA6) sono in grado di assorbire quantità maggiori di umidità, mentre altri, come la maggior parte dei metalli, quantità invece minori. L'assorbimento dell'umidità è direttamente collegato alla porosità delle particelle di polvere, difatti più pori ha una particella e più molecole d'acqua vi rimangono intrappolate all'interno. Le particelle di polvere assorbono l'umidità sia per imbibizione capillare che per rigonfiamento. L'imbibizione capillare avviene quasi istantaneamente, a differenza del rigonfiamento che richiede un certo tempo. Il rigonfiamento delle particelle, causato dall'assorbimento di umidità, ne aumenta le dimensioni e ne altera leggermente la forma. Ciò rende evidente che, nel caso di polveri con un'elevata capacità di assorbimento dell'umidità, è necessario mantenere bassa la RH, perché la distribuzione dimensionale potrebbe essere alterata se le particelle assorbono abbastanza umidità.

L'adsorbimento dell'acqua, invece, dipende da molti parametri oltre che dal materiale e uno di questi è la temperatura: l'efficienza dell'adsorbimento è inversamente proporzionale alla temperatura, il che significa che più alta è la temperatura e minore è la quantità di molecole d'acqua che verrà adsorbita da una particella di polvere (ciò si spiega con il fatto che si tratta di un processo esotermico). Si specifica che questo vale solo per l'adsorbimento fisico, cioè l'unico caso di adsorbimento che può verificarsi durante il processo di spandimento della polvere, poiché la temperatura è troppo bassa per innescare l'adsorbimento chimico tra l'ossigeno e le polveri metalliche (che potrebbe invece verificarsi durante la fase di lavorazione termica dei processi PBF).

Inoltre, quanto meno sferica è una particella e tanto più grande è la sua superficie esterna, il che significa che è più incline ad adsorbire molte molecole di vapore acqueo. Analogo discorso vale se le particelle hanno un'elevata porosità, poiché si creano cavità in cui le molecole d'acqua possono "agganciarsi" alla particella. In aggiunta a ciò, se una polvere ha particelle molto fini o molti satelliti, significa che la frazione di superficie/volume aumenta

drasticamente per una data quantità (massa) di polvere ed ecco perché le polveri fini sono maggiormente interessate dall'adsorbimento.

Si è dimostrato che l'adsorbimento avviene rapidamente e che influenza la scorrevolezza della polvere solamente in presenza di basse sollecitazioni di flusso (come quelle osservate con una recoater a lama) e che non vi è invece alcun effetto significativo in presenza di elevate forze di compressione (come quando è utilizzato invece un recoater a rullo), probabilmente perché le elevate forze di compressione prevalgono sulle forze capillari sviluppate dalle molecole d'acqua adsorbite dalle particelle di polvere.

La polvere riutilizzata è ancora più incline all'adsorbimento rispetto alla polvere vergine, perché durante i cicli di lavoro la sfericità delle particelle si riduce e si creano più satelliti e particelle fini, aumentando il rapporto superficie/volume totale della polvere.

Per una polvere è più difficile raggiungere la densità di battitura desiderata tramite compressione sia quando l'umidità relativa è troppo alta, a causa dell'attrazione capillare, sia quando troppo bassa, perché le cariche elettrostatiche diventano prevalenti e aumentano la coesione della polvere. Pertanto, valori estremi di umidità relativa possono influire negativamente sulla fluidità della polvere sia in caso di forze di compressione elevate che basse.

Nonostante nella letteratura non sia stata stabilita una connessione univoca tra la temperatura e le proprietà reologiche della polvere, essendoci molteplici fattori come il materiale della polvere o il metodo di misurazione ad influenzare i risultati, si è comunque giunti a considerare anche la temperatura come fattore influente sulla coesione delle polveri. Inoltre, sebbene sia risaputo che il pistone di fabbricazione e la camera sono preriscaldati al fine di ridurre al minimo le tensioni residue e la formazione di cricche, così da ottenere un pezzo finito più denso con proprietà meccaniche migliorate, esistono numerosi articoli che svolgono test principalmente a temperatura ambiente, come quelli degli autori Mertens et al. del 2018 e del 2016 ([78] e [79]). Tuttavia, alcuni articoli, come quello degli autori Casati et al. del 2018, suggeriscono che il preriscaldamento può anche avere risultati negativi in termini di resistenza meccanica e durezza: è quindi importante selezionare attentamente il metodo di preriscaldamento, oltre all'intervallo di temperatura della camera e della piastra di costruzione [80]. La temperatura di preriscaldamento è selezionata in base alla temperatura di transizione vetrosa per le polveri polimeriche e in base al punto di fusione per le leghe e le polveri metalliche. Più precisamente, il preriscaldamento dei polimeri avviene a una temperatura leggermente inferiore a quella di transizione vetrosa e la temperatura di preriscaldamento per i metalli e le leghe si attesta comunemente a circa un quarto o metà

della temperatura di fusione. Soprattutto a temperature molto elevate, molti ricercatori hanno dimostrato che la differenza rispetto alla temperatura di stoccaggio contribuisce a modificare la fluidità e la coesione della polvere.

Come detto precedentemente, la valutazione della fluidità della polvere è stata effettuata con diversi metodi sperimentali e simulazioni che tendenzialmente valutano la spalmabilità e le proprietà reologiche della polvere a temperatura ambiente, quando ciò comunemente non avviene nei processi PBF. È dunque di fondamentale importanza sviluppare esperimenti e simulazioni DEM che tengano conto della temperatura di preriscaldamento del processo e di come questa influisca sulla distribuzione della temperatura all'interno di uno strato di polvere, al fine di prevedere con precisione il risultato del processo di spandimento della polvere. Il lavoro di Van der Eynde et al. del 2017 è un esempio di studio che segue questa direzione [81]. In questo documento è stata trattata la configurazione di uno spargitore di polvere costituito da una lama ad hoc per misurare la temperatura con riscaldatori ceramici a infrarossi accoppiati a un ciclo di controllo PID, di modo da mantenere così costante la temperatura del letto di polvere. Il loro dispositivo è in grado di misurare la densità di impaccamento misurando il peso dello strato di polvere e rapportandolo allo spessore dello strato, e di fare poi il collegamento con la temperatura, rendendolo un setup sperimentale molto utile per trarre dati sul processo.

2.3 L'importanza della fluidità della polvere

La fluidità della polvere, ovvero la facilità con cui una polvere scorre, funge da anello di congiunzione tra i parametri di processo e gli indicatori di qualità dello strato di polvere, essendo questa una caratteristica che influisce direttamente sulla sua spalmabilità. Nell'articolo degli autori Lefebvre et al. del 2020 emerge che però la fluidità non è una proprietà intrinseca del materiale, ma piuttosto il risultato di varie proprietà geometriche/fisiche della polvere esaminata e delle sue particelle, combinate con parametri ambientali e persino con il metodo di misurazione [82]. Nei processi di Powder Bed Fusion altre variabili esogene che influenzano il modo in cui la polvere si comporta sono ad esempio la portata, l'umidità, il tempo di stoccaggio e nei casi di polveri polimeriche anche la carica elettrostatica. Oltre a queste variabili appena elencate, anche la distribuzione granulometrica, la forma delle particelle e il materiale in polvere influiscono direttamente sulla fluidità della polvere. Come detto precedentemente, per le polveri con una distribuzione granulometrica stretta più le particelle sono sferiche e grandi, migliore è la loro fluidità. Ovviamente anche il materiale riveste un'importanza cruciale dal momento che, nel caso dei polimeri, le

particelle ricevono una carica triboelettrica durante il processo di ricopertura, che influisce per l'appunto sulla fluidità. A tal proposito, Hesse et al. nel loro articolo del 2019 hanno sviluppato un metodo per misurare l'accumulo di corrente elettrostatica sulle particelle di polvere polimerica durante lo spandimento per i processi PBF, dimostrando che la carica aumenta significativamente per il materiale in polvere invecchiato, il che influisce potenzialmente sulla fluidità delle miscele di polvere con un elevato rapporto di polvere riutilizzata [83]. Ciò non accade invece nel caso di polveri metalliche, poiché la carica triboelettrica diminuisce rapidamente a causa dell'elevata conduttività elettrica del materiale stesso.

L'aumento della coesione della polvere causato dall'effetto delle cariche statiche è prevalente in presenza di un basso livello di umidità relativa (inferiore al 20%), l'aumento della coesione dovuto invece all'adsorbimento compare a un livello di umidità relativa superiore al 50%. La combinazione di tribo-carica e forze capillari contribuisce ad avere un minimo di coesione della polvere per valori di umidità relativa circa pari al 45%. Per le polveri fini, la piccola dimensione delle particelle implica che la fluidità della polvere sia già influenzata dalle forze di Van der Waals (non più trascurabili rispetto alle forze gravitazionali) e se a ciò si aggiungono anche i legami capillari liquidi interparticellari creati dalle molecole d'acqua adsorbite, è evidente che la fluidità si riduce ulteriormente.

Molti ricercatori hanno eseguito simulazioni DEM del processo di spandimento della polvere con varie combinazioni di parametri di modo da definire una polvere che si comportasse esattamente come quella reale in termini di fluidità. La combinazione più comune di parametri è l'angolo di valanga e l'angolo di riposo: l'angolo di valanga è misurato quando la polvere, posta in un cilindro di rotolamento, forma un angolo con il piano orizzontale mentre è ribaltata dal movimento del cilindro (il profilo della polvere mentre il cilindro rotola a una velocità angolare stabile e l'angolo di valanga dipendono sempre dalla coesione e dalla fluidità della polvere); l'angolo di riposo è l'angolo che si forma invece se si versa una polvere su una superficie piana e orizzontale. L'esperimento dell'angolo di valanga è un test di flusso "dinamico", a differenza dell'esperimento dell'angolo di riposo che è definito come test di flusso "statico". La combinazione di questi due parametri è sufficiente a garantire che un modello di polvere assomigli strettamente alla polvere reale, poiché l'esperimento dell'angolo di valanga sottopone la polvere alle forze gravitazionali, coesive e di taglio inflitte dalla parete del cilindro fino a raggiungere uno stato di equilibrio dinamico (se possibile), mentre l'esperimento dell'angolo di riposo esamina solo la coesione della polvere rispetto alle forze gravitazionali, lasciando che la polvere raggiunga uno stato di equilibrio

statico. Tale combinazione ricrea perciò completamente ogni tipo di forza e movimento a cui la polvere può essere sottoposta. Tuttavia, affinché una simulazione DEM di questo tipo possa assomigliare adeguatamente alla realtà, è importante definire anche i coefficienti di attrito statico e di rotolamento tra le particelle e il substrato, nonché tra le particelle e il recoater e tra le particelle stesse.

2.4 Gli indicatori di qualità dello strato di polvere

Generalmente la qualità dello strato di polvere depositato è valutata misurando:

- 1) la rugosità superficiale dello strato;
- 2) il livello di compattazione della polvere (definito anche come densità di impaccamento della polvere);
- 3) la comparsa di difetti superficiali (ad es. cricche, separazioni e cavità) sullo strato depositato;
- 4) l'accuratezza nel raggiungere lo spessore desiderato, poiché, come già detto, lo spessore nominale dello strato, pari allo spostamento verso il basso del pistone di fabbricazione, non è uguale allo spessore effettivo dello strato.

Uno strato di polvere uniforme e omogeneo deve avere un'uniforme densità di impaccamento della polvere su tutta la superficie, mantenendo una rugosità superficiale relativamente ridotta e un errore minimo tra lo spessore effettivo e quello nominale (teorico) dello strato.

2.4.1 Rugosità superficiale dello strato

La rugosità superficiale dello strato di polvere non sinterizzato/non fuso depositato è l'indicatore di qualità più affidabile e più semplice da utilizzare per valutare il risultato del processo di spandimento della polvere. La rugosità superficiale dello strato di polvere depositato deve essere mantenuta bassa il più possibile, poiché un valore maggiore di rugosità va a significare che il raggio laser/elettronico colpisce lo strato a un'altezza diversa, influenzando dunque, anche se solo leggermente, la focalizzazione e il trasferimento di energia sullo strato. Anche se questi effetti possono essere considerati trascurabili poiché non hanno alcun effetto sui fenomeni termici, è però da sottolineare che, se la rugosità è elevata, ciò si tradurrà in una grande rugosità dello strato consolidato. Alti valori di rugosità superficiale su strati successivi di polvere implicano un errore nella dimensione verticale del pezzo, comportando o una cattiva qualità superficiale o, nel peggiore dei casi, imprecisioni dimensionali.

In diverse fonti di letteratura è stato dimostrato che non solo la rugosità superficiale può essere utilizzata come misura della densità di impaccamento della polvere, poiché quest'ultima è anche direttamente collegata alla qualità del pezzo finito. In generale, la rugosità superficiale aumenta con l'aumentare della coesività della polvere: una diminuzione della fluidità della polvere dovuta all'aumento delle forze coesive ha difatti un impatto negativo sulla rugosità superficiale.

È importante notare che la maggior parte degli articoli di ricerca condotti fino ad ora esegue esperimenti o simulazioni di deposizione della polvere sulla superficie superiore solida e piana del pistone di fabbricazione, per poi misurare gli indicatori di qualità dello strato di polvere: con questo metodo si valuta soltanto il primo strato depositato durante il processo di deposizione della polvere, quando in realtà da lì in avanti la polvere è poi depositata su un nuovo strato che altro non è che una matrice di polvere consolidata per fusione e non fusa. La superficie su cui è depositata la polvere è un elemento molto rilevante e, per giungere a conclusioni sicure che possano essere applicate a tutto il processo di costruzione 3D del pezzo, è importante sia tenuto in considerazione.

2.4.2 Livello di compattazione della polvere (densità di impaccamento della polvere – PD: packing density)

La densità di impaccamento (ϕ) dello strato di polvere influisce direttamente sulla densità e sulla porosità del pezzo finito. Se il livello di compattazione della polvere varia fortemente tra punti diversi del letto di polvere, la densità del pezzo finito non sarà uniforme in tutto il suo volume e ciò potrebbe anche rendere il pezzo inutilizzabile. La ricerca ha dimostrato che per massimizzare la PD di uno strato sono state utilizzate miscele di polveri bimodali o multimodali: in questo modo le particelle più piccole riempiono i vuoti interstiziali che si sviluppano tra le particelle più grandi. Nell'articolo degli autori Grossin et al. del 2021 è stato anche dimostrato come la massima PD si ottenga con un rapporto dimensionale superiore a 1:10 (particelle grossolane : particelle fini) e un rapporto per il peso pari a 7:3 (particelle grossolane : particelle fini) [84].

Gli autori Shanjani et al. nel loro articolo del 2008 hanno esaminato la fisica alla base dello spargimento della polvere con un rullo controrotante e hanno dimostrato che tanto minore è lo spessore dello strato compattato e tanto maggiore è la sua densità relativa; quindi, tanto è alto il livello di compattazione della polvere [85]. Tuttavia, la compattazione dello strato dipende anche dall'accumulo di polvere davanti al cilindro: più grande è la zona di densificazione, più compattato diventa lo strato di polvere. Infine, indipendentemente dal

tipo di rigeneratore, la densità dell'impaccamento diminuisce con la distanza di avanzamento del recoater: ciò è causato da un'evoluzione della distribuzione del diametro delle particelle, dovuta alla deposizione preferenziale di particelle più fini che riempiono i vuoti (effetto noto come segregazione).

Nell'articolo degli autori Jacob et al. del 2018, precedentemente citato, è definita una connessione tra lo spessore effettivo dello strato e la sua stessa densità, affermando che maggiore è la densità di impaccamento dello strato di polvere e minore è la differenza tra lo spessore nominale e quello effettivo dello strato, e viceversa [77]. Inoltre, gli autori Penny et al. del 2021 hanno dimostrato che, per valori elevati dello spessore normalizzato dello strato, la densità di impaccamento ϕ si comporta secondo un'equazione della forma seguente: $\phi = \alpha * (1 - \exp(-\beta * t_{norm}))$, dove α e β sono parametri liberi che dipendono dal materiale e dalle caratteristiche della polvere [86]. In particolare, il parametro α rappresenta la densità di impaccamento di uno strato teorico di dimensioni infinite, β è puramente legato alla fluidità. Un aumento dello spessore normalizzato dello strato causa un aumento della densità di impaccamento secondo la formula appena citata.

2.4.3 Comparsa di difetti superficiali (crepe, separazioni, cavità, ecc.)

La rugosità superficiale dello strato è un buon mezzo per rilevare i difetti che vanno a crearsi sulla superficie, come crepe, ondulazioni o trascinamento di agglomerati. Tali difetti devono essere individuati e poi eliminati, poiché l'errore che creano è inevitabilmente ereditato dagli strati successivi, agendo in modo additivo attraverso l'impilamento dei difetti tra la creazione di uno strato e il successivo e dando luogo così a una scarsa rugosità superficiale del pezzo finito, oltre che ad un'imprecisione dimensionale. Inoltre, i difetti di superficie e di legame negli strati intermedi aumentano la possibilità di innesco di cricche.

I difetti di adesione negli strati intermedi possono essere causati da un difetto superficiale casuale, come una cavità o un picco di rugosità elevato dello strato di polvere non fuso, comportando un aumento locale dello spessore effettivo dello strato successivo e la creazione di un poro. Nella maggior parte dei casi i difetti superficiali sono causati da agglomerati di polvere, solitamente costituiti da un nucleo di particelle più grandi fuse tramite forze coesive interparticellari con molte particelle più piccole. Questi agglomerati appaiono più facilmente quando la percentuale di polveri fini nel campione di polvere diventa più alta o quando la PSD diventa più piccola. La coesione della polvere aumenta all'aumentare della temperatura di riscaldamento prossima alla transizione vetrosa per i polimeri (SLS) o prossima alla temperatura di fusione per i metalli (SLM), come anche

all'aumentare dell'umidità relativa RH. Questi agglomerati possono essere trascinati lungo il substrato attraverso il recoater creando scanalature, o provocare l'inzeppamento della deposizione della polvere "bloccando" lo spazio tra il recoater e il substrato, causando in entrambi i casi aree vuote sul nuovo strato e rendendolo dunque non adatto alla continuazione del processo PBF.

2.4.4 Accuratezza nel raggiungere lo spessore desiderato

Nei processi PBF lo spessore effettivo dello strato post sinterizzazione/fusione è leggermente inferiore rispetto allo spessore dello strato di polvere a causa dell'infiltrazione della fase liquida del materiale (materiale fuso) attraverso i pori e le cavità interparticellari verso gli strati inferiori del pezzo. Questa differenza di spessore tra spessore effettivo e nominale è meno significativa nella SLS grazie alla fusione parziale e meno violenta, a differenza della SLM o dell'EBM in cui è più marcata.

Tale problema rende imperativa la necessità di controllare e/o compensare lo spessore dello strato di modo ottenere un'adeguata precisione dimensionale del pezzo finito: in particolare, se il software di slicing crea sezioni orizzontali di spessore t_f del pezzo finito, il sistema di rivestimento dovrà applicare strati di polvere di spessore $t_p > t_f$ per ottenere una precisione dimensionale accettabile. A questo punto è necessario calcolare una relazione tra t_f e t_p , pari a: $t_p = a * t_f$, dove $a > 1$; tuttavia, a seconda del numero di strati, della potenziale esistenza di sporgenze e pareti sottili e in generale della variazione della curva di riempimento dello spazio di scansione utilizzata dal fascio di potenza per fondere/sinterizzare la polvere, questo numero potrebbe variare da strato a strato.

Inoltre, lo spessore teorico previsto (noto anche come nominale) dello strato di polvere potrebbe essere leggermente diverso da quello effettivo in base al metodo di ricopertura della polvere, soprattutto a causa della dinamica della polvere nei casi in cui il recoater esegua una diffusione dello strato molto rapida e alla possibilità che emerga il fenomeno di esplosione delle particelle (dovuto al conflitto di movimento delle stesse nella regione di compattazione tra il recoater e il substrato).

È stato dunque chiarito che durante il processo di slicing del pezzo devono essere presi in considerazione le differenze tra spessori nominali ed effettivi, i valori di efficacia e i valori di efficienza, proprio poiché lo spessore delle "fette" del pezzo finito che il software di taglio produce potrebbe non essere uguale allo spostamento verticale necessario del pistone di fabbricazione e quindi portare a gravi imprecisioni dimensionali.

2.5 Metodi di misurazione degli indicatori di qualità dello strato di polvere

L'uniformità e l'omogeneità dello strato sono solitamente stimate misurando le proprietà menzionate nella sezione precedente per lo più con metodi ottici, poiché non invasivi e poiché non distruggono lo strato applicato, consentendo di continuare il processo di produzione e di rilevare il legame di questi con la qualità del pezzo finito.

Gli autori Pasalopoulos et al. nel loro articolo del 2020 hanno utilizzato la scansione 3D a luce bianca per ottenere una rappresentazione dello strato di polvere come una nuvola di punti in tre dimensioni [87]. Per la precisione, hanno calcolato sia la rugosità superficiale lungo i piani di intersezione verticali della superficie sia lo spessore dello strato come distanza media verticale tra due strati consecutivi scansionati. Essendo il pistone di fabbricazione dotato di sensori di peso incorporati in varie posizioni che creano una distribuzione del peso della polvere, si può combinare poi questo dato con il calcolo del volume tra due strati successivi ed ottenere così una distribuzione della densità di impaccamento della polvere sulla superficie del letto di polvere.

Gli autori Lin et al. nel loro articolo del 2019 hanno calcolato la rugosità superficiale dello strato di polvere otticamente fotografando lo strato e applicando filtri in scala di grigi all'immagine acquisita [88]. L'immagine in scala di grigi è stata poi binarizzata mediante un'opportuna selezione di un valore di soglia, per poi confrontare la distribuzione dei pixel in bianco e nero con un'immagine binarizzata di uno "strato ideale", di modo da stimare così la qualità dello strato.

Nell'articolo del 2019 degli autori Beitz et al. è stato implementato un metodo intrusivo in cui si preleva un campione da un impianto di perforazione a inserto su una scala di laboratorio, in seguito esaminato con i metodi della microtomografia a raggi X e della microscopia a scansione laser per ottenere immagini della superficie ed estrarre dati sulla rugosità [89].

Gli autori Ali et al. nel loro articolo del 2018 hanno invece proposto una metodologia per misurare la densità di impaccamento nel processo di SLS utilizzando una pipetta per applicare gocce di polimero polimerizzabile con raggi UV sullo strato in esame [90]. Il liquido difatti permea lo strato non sinterizzato, si emette in seguito luce UV per solidificarlo, si preleva un campione delle particelle di polvere inglobate ed infine lo si sottopone a scansione nano-CT di modo da poter misurare la densità di impaccamento.

Choi et al., isolando campioni di polvere dal letto di polvere, hanno valutato la densità dello strato di polvere producendo tramite SLM un contenitore cubico con un volume interno di 1000 mm^3 . Tramite la conservazione in questo contenitore di una quantità di polvere non

fusa durante il processo di produzione, è stato possibile calcolare la densità di impacchettamento rapportando la massa della polvere al volume interno dello stesso, come descritto nell'articolo degli autori Choi et al. del 2017 [91].

Gli autori Le et al. nel loro articolo del 2021 hanno sviluppato un metodo chiamato "tecnologia scanner a letto di polvere", in grado di offrire immagini dell'intero strato di polvere durante la ricopertura con risoluzione al livello di particella [92]. Tale sistema è costituito da una piattaforma di rivestimento intercambiabile, da un sensore di immagine a contatto (CIS) e dal substrato, che può adattare la sua altezza per fornire una messa a fuoco ottimale al CIS. Essendo possibile estrarre con precisione i profili dello strato mediante lievi variazioni della messa a fuoco del CIS e trasponendo la sfocatura in valori di altezza sull'asse z mediante l'analisi dell'immagine, anche in questo modo è possibile conoscere la densità di impaccamento della polvere.

2.6 Indicatori di qualità del prodotto finito

Solo assicurando l'omogeneità e l'uniformità del letto di polvere, grazie al controllo completo dei parametri di processo della diffusione della polvere, è possibile controllare le proprietà meccaniche del pezzo finito che ne determinano la qualità. Le proprietà del pezzo finito più comunemente misurate dai ricercatori sono:

- 1) la densità/porosità;
- 2) la resistenza meccanica (snervamento, trazione, allungamento a rottura, ecc.);
- 3) la durezza;
- 4) la rugosità superficiale;
- 5) l'accuratezza dimensionale, nonché la comparsa di difetti superficiali o interni (sporgenze, pori o cavità).

L'ottimale sarebbe collegare questi indicatori di qualità con gli indicatori di qualità dello strato di polvere non fuso e, in ultima analisi, con i parametri del processo di spandimento della polvere. Tuttavia, occorre tenere presente che gli indicatori di qualità del prodotto finito dipendono in larga misura anche dai parametri del processo di fusione della polvere, come la distanza tra i tratteggi, la velocità di scansione, la potenza del fascio laser/elettronico, ecc. ed è proprio per questo motivo che è incredibilmente difficile collegare le differenze di qualità del pezzo finito a uno specifico indicatore di qualità del letto di polvere (a patto che non si progetti un esperimento che mantenga costanti i parametri di fusione della polvere e si esegua un'analisi dei risultati).

2.6.1 Densità/porosità

Come detto precedentemente, la PSD influisce sulla densità del pezzo finito: in particolare, per ottenere sia una maggiore densità (e dunque una minore rugosità superficiale) sia una maggiore resistenza meccanica, è necessario includere un'adeguata quantità di particelle fini nella polvere e limitare la quantità delle particelle con dimensioni maggiori per garantire che la rugosità dello strato di polvere rimanga entro livelli accettabili.

Precedentemente si è anche detto che la modifica dello spessore dello strato influisce sulla densità di impaccamento dello strato non fuso, portando a risultati in cui, all'aumentare di questo, la densità di impaccamento va sia a migliorare che a peggiorare. Ad esempio, nell'articolo degli autori Tan et al. del 2021, l'aumento dello spessore dello strato ha avuto un effetto positivo aumentando anche la densità di impaccamento, ma sono presenti anche ricercatori che affermano l'opposto, come nell'articolo degli autori Mostafei et al. del 2021 ([93] e [94]). È possibile che entrambi i punti di vista contraddittori siano corretti e che, anche se in entrambi gli articoli citati è stato utilizzato un rullo controrotante come recoater, alla base di questa differenza ci siano numerosi altri fattori, come: la forma delle particelle della polvere utilizzata, il materiale della polvere, la PSD, il materiale del recoater e non solamente la forma, i parametri ambientali, ecc. Per giungere a conclusioni fra loro coerenti, in questi casi è dunque necessario che questi elementi appena menzionati siano mantenuti stabili e costanti durante tutta la serie di esperimenti.

Per quanto riguarda la relazione tra densità/porosità e la precisione nel raggiungere lo strato desiderato, più lo spessore dello strato ottenuto è maggiore di quello desiderato (dunque: $t_{act} > t_{desiderd}$) e più allora è probabile che ci sia stata una parziale fusione a strati e che la porosità sia elevata.

Tendenzialmente $t_{act} > t_{desiderd}$ può verificarsi se i ricercatori omettono di prendere in considerazione il ritiro dello strato di polvere dovuto a denudazione, schizzi, infiltrazione del materiale fuso nella porosità della polvere che funge da supporto. Analogamente, il caso in cui $t_{act} < t_{desidered}$ può verificarsi se i ricercatori sovrastimano il ritiro dello strato di polvere (possibilmente sottostimando la densità di impaccamento dello strato di polvere),

2.6.2 Resistenza meccanica

Il carico di rottura è il carico massimo di trazione che un materiale può sopportare prima della frattura, a differenza del carico di snervamento che è il carico di trazione che un materiale può sopportare prima di subire una deformazione plastica. L'allungamento a

rottura, invece, è una misura della duttilità ed è il rapporto tra la lunghezza modificata (finale) e la lunghezza iniziale dopo la rottura del campione.

Quanto appena elencato sono proprietà che fungono da indicatori di qualità del pezzo finito e possono variare in base alle differenze tra i parametri del processo di spandimento della polvere, tra gli indicatori di qualità del letto di polvere e tra i parametri del processo di fusione (come la distanza tra i boccaporti, la velocità di scansione, la potenza del laser, ecc.). Gli autori Leicht et al. nel loro articolo del 2020 hanno dimostrato che aumentando il t_{nom} da 20 μm a 80 μm si può aumentare la produttività senza inficiare sul carico a rottura, ma che la resistenza allo snervamento e l'allungamento a rottura diminuiscono rispettivamente del 15% e del 30% rispetto alla situazione di partenza [95]. Gli autori hanno però utilizzato una polvere con PSD compresa tra 20 e 53 μm , vale a dire tutte particelle più grandi dello spessore nominale dello strato (per cui, durante la stesura dei primi strati e mentre il t_{act} non aveva ancora raggiunto il valore di t_{eff} , il recoater stava stendendo uno strato composto solo da particelle fini e quindi con una densità di strato molto più elevata). A seguito di ciò, si può affermare che i risultati presentano un errore intrinseco dovuto alla differenza della PSD della polvere depositata in ogni strato, dato che per ottenere risultati affidabili è necessario assicurarsi che $d_{90} < t_{act, min} = t_{nom}$.

Oltre al gradiente di temperatura e alla velocità di raffreddamento, sul carico di rottura e sulle restanti proprietà influisce anche l'aspetto del riciclo della polvere. Gli autori Soundarapandiyam et al. nel loro articolo del 2021, precedentemente citato, hanno esaminato proprio questo tema giungendo alla conclusione che il carico di rottura e di snervamento aumentano marginalmente con l'utilizzo della polvere riciclata [69]. Questo risultato è stato attribuito all'aumento della quantità di ossigeno nella polvere di Ti6Al-4V riutilizzata, anche se hanno constatato come la durata a fatica sia diminuita drasticamente quando è stata utilizzata polvere riciclata, a causa dei difetti interni del pezzo finito causati dai vuoti del letto di polvere.

Gli autori Spierings et al. nel loro articolo del 2011 riportano che le particelle fini si sciolgono facilmente e promuovono un'alta densità del pezzo finito e resistenza alla trazione, differentemente dalle particelle più grandi che favoriscono un maggiore allungamento a rottura [96]. Questa deduzione porta alla conclusione che la PSD deve essere scelta in modo tale da soddisfare entrambe queste osservazioni contraddittorie, pur tenendo sempre conto delle proprietà desiderate del pezzo finito.

Riportando in questo caso la relazione tra la resistenza meccanica del pezzo finito e la precisione nel raggiungere lo strato desiderato, più lo spessore dello strato ottenuto è

maggiore di quello desiderato (dunque: $t_{act} > t_{ddesiderd}$) e più allora è probabile che ci sia stata una parziale fusione a strati, che dunque il legame fra questi non sia solido e che il carico di snervamento ne risenta negativamente.

2.6.3 Durezza

La durezza è un importante criterio di qualità del pezzo finito, poiché consente di resistere alla deformazione plastica, alla penetrazione, all'indentazione e alla graffiatura; di conseguenza, un elevato valore di durezza aumenta la resistenza all'usura per attrito o erosione (ad esempio, da acqua, olio o vapore). I metodi più utilizzati per misurare la durezza sono le prove di indentazione, come i test Brinell, Rockwell e Vickers. Questi test differiscono principalmente per la forma del penetratore (piramide a base quadrata per il test Vickers, penetratori di forma conica o sferica per il test di Rockwell, penetratore a sfera per il test Brinell), ma anche per il materiale del penetratore. La durezza è calcolata in base alla profondità e alla forma dell'impronta lasciata sul campione.

Nei processi PBF la durezza è direttamente collegata alla microstruttura cristallina del pezzo, ottenuta grazie allo schema di riscaldamento-raffreddamento seguito durante il processo. Il preriscaldamento e la densità di potenza del laser svolgono un ruolo fondamentale, ma è stato dimostrato che l'effetto dello spessore dello strato è altrettanto importante: un letto di polvere altamente poroso implica che l'energia fornita allo strato troverà una maggiore resistenza nel trasferimento di calore alle posizioni vicine del punto laser. Quanto appena detto accade perché il coefficiente di trasferimento di calore per conduzione dello strato è un valore medio ponderato della conduttività del materiale di base della polvere e della conduttività dell'aria, con i pesi definiti dalla porosità dello strato depositato (inversamente, la densità di impaccamento). Più lo strato è poroso, maggiore è la percentuale di aria nello strato e minore è la conducibilità termica. Questo aspetto influisce fortemente sull'andamento del riscaldamento e del raffreddamento che seguirà localmente, quindi anche sulla microstruttura cristallina del pezzo finito. In generale, un raffreddamento più lento porta a valori di durezza inferiori.

Inoltre, è stato dimostrato che una bassa densità di impaccamento dello strato depositato porta a valori più bassi di densità del pezzo finito: maggiore è la porosità del pezzo finito e minore è la sua durezza, poiché il penetratore durante la prova penetra più facilmente nel pezzo a causa del collasso dei micropori durante le fasi di precarico o di carico della prova. Gli autori Ziri et al. nel loro articolo del 2021 hanno inoltre dimostrato che, poiché la porosità può essere collegata alla PSD, una PSD con diametro medio nella media ($d_{50} = 29 \mu\text{m}$ e d_{90}

= 41 μm) è preferibile all'utilizzo di polveri grossolane o molto fini per ottenere un elevato livello di durezza [97]. Lo stesso è stato confermato dagli autori Balbaa et al. nel loro articolo del 2021: una polvere molto fine, con un diametro medio inferiore al 10 μm e quindi con una fluidità molto più bassa, ha prodotto difatti strati di polvere con una densità di impaccamento decisamente ridotta [98]. Da ciò ne è risultato un pezzo finito con una porosità molto più elevata e, di conseguenza, con una durezza particolarmente basso.

Gli autori Nadiyadi et al. nel loro articolo del 2021 hanno invece dimostrato che tra lo spessore dello strato, la potenza del laser e la velocità di scansione del laser, è lo spessore dello strato ad avere il maggiore impatto sulla durezza del pezzo finito [99]. Ne hanno dedotto che un minore spessore dello strato richiede una minore quantità di energia per creare pezzi finiti con una durezza sufficiente, a differenza di strati più spessi che necessitano di più energia per fondere ad un'adeguata profondità, creando fenomeni di fusione più violenti e aumentando quindi la porosità del pezzo finito, con conseguente riduzione della durezza. Un'ampia rugosità della superficie dello strato implica un'elevata variazione dello spessore fra gli strati di polvere che, secondo il meccanismo spiegato sopra, può avere un effetto negativo sulla durezza.

Riportando in questo caso la relazione tra la resistenza meccanica del pezzo finito e la precisione nel raggiungere lo strato desiderato, più lo spessore dello strato ottenuto è minore di quello desiderato (dunque: $t_{\text{act}} < t_{\text{desiderd}}$) e più allora è probabile che ci sia stata una rifusione dello strato precedente (creando una differente struttura cristallina per le polveri metalliche ad esempio), comportando una modifica della durezza in base al modello di riscaldamento - raffreddamento.

2.6.4 Rugosità della superficie

Gli autori Spierings et al., nel loro articolo del 2011 precedentemente citato, hanno registrato una migliore qualità della superficie con una PSD che include un maggior numero di polveri fini, poiché queste riempiono gli spazi tra le particelle più grandi [96]. Tuttavia, si deve comunque sottolineare che un quantitativo eccessivo di polveri fini può causare sia una riduzione della fluidità sia della spandibilità a causa dell'aumento delle forze di coesione, ottenendo risultati opposti a quelli desiderati. Le particelle di grandi dimensioni, in particolare quelle di forma irregolare, tendono ad aumentare la rugosità superficiale del pezzo finito. In particolare, gli autori Balbaa et al. nel loro articolo del 2021 menzionato in precedenza riportano un aumento della rugosità superficiale dell'ordine del 5-73% per i pezzi

realizzati con polvere grossolana rispetto a quelli realizzati con polvere più fine, a seconda della velocità di scansione del laser [98].

Inoltre, un aumento dello spessore dello strato tende ad aumentare la rugosità superficiale del pezzo finito, ma solamente nel caso in cui lo spessore dello strato sia inferiore alla dimensione massima delle particelle della polvere. Questo accade perché, se il $d_{90} > t_{nom}$, si verifica una deposizione preferenziale di un PSD "più fine", che diventa pian piano più grossolana con l'aumentare dello spessore dello strato, diminuendo così la densità di impaccamento dello stesso (nel caso in cui tutte le polveri presentino una buona fluidità e le forze coesive non ostacolano la deposizione). Oltre alla rugosità superficiale orizzontale del pezzo finito, anche quella verticale è importante: questo valore aumenta con l'aumentare dello spessore effettivo dello strato a causa dell'effetto scalino.

2.6.5 Precisione dimensionale

Gli autori Brika et al. nel loro articolo del 2020 hanno confrontato pezzi realizzati con SLM di tre diversi lotti di polvere di lega Ti-6Al-4V con approssimativamente la stessa PSD [100]. È stato dimostrato che la polvere più sferica ha una migliore fluidità e un impacchettamento delle particelle più efficiente, che porta a letti di polvere più densi e crea pezzi finiti con densità, finitura superficiale e precisione dimensionale superiori. Come già detto precedentemente, un'eccessiva quantità di polveri fini influisce negativamente sulle proprietà sopra menzionate a causa dell'aumento delle forze coesive. Gli autori Balbaa et al. nel 2021 sono giunti alla stessa conclusione, confrontando una polvere fine con il 75% di coesione in più rispetto ad una polvere più grossolana: la prima ha creato strati con circa il 30% di densità di impaccamento in meno rispetto a quelli creati con la polvere meno fine [98]. La polvere più fine ha portato alla costruzione di pezzi con una minore accuratezza dimensionale sia nel piano X-Y sia lungo la direzione di costruzione in altezza (asse Z), dimostrando come la PSD influisca a sua volta sulla fluidità della polvere e quindi sulla densità di impaccamento, sulla rugosità superficiale e sull'accuratezza dimensionale del pezzo finito. La minore accuratezza dimensionale nel piano X-Y è causata principalmente dall'elevata adesione della polvere fine, che fa sì che le particelle non fuse o parzialmente fuse si attacchino ai lati del pezzo; la minore accuratezza dimensionale lungo l'asse Z è invece causata dalla tendenza delle particelle di polvere fine a formare agglomerati che, a loro volta, aumentano drasticamente la rugosità dell'area superficiale dello strato depositato oppure fanno sì che i difetti siano ereditati dagli strati successivi, che così impilano e ingrandiscono gli errori dimensionali.

È inoltre ovvio che lo spessore dello strato influisce sulla precisione dimensionale a causa dell'effetto "stair stepping": maggiore è lo spessore dello strato e maggiore è la perdita di precisione dimensionale e di qualità della superficie. In particolare, all'aumentare della differenza fra lo spessore dello strato effettivo e lo strato nominale, diminuisce la precisione dimensionale.

2.6.6 Comparsa di difetti superficiali o interni

Gli autori Soundarapandiyar et al. nel loro articolo del 2021 precedentemente citato hanno confrontato la vita a fatica di campioni realizzati con EBM e polvere vergine di Ti-6Al-4V riutilizzata per poi dieci volte, riscontrando come i provini realizzati con polveri riutilizzate avessero una vita a fatica ridotta di circa il 25-30%, attribuita all'aumento dei difetti interni di mancata fusione nei vari processi [69]. Essi hanno rintracciato questi vuoti formati nel letto di polvere a causa del ridotto quantitativo di polveri fini e della presenza di alcune particelle (allungate) presenti nella polvere riutilizzata.

Gli autori Balbaa et al. nel 2021 hanno dimostrato che le polveri molto fini e altamente coesive (di dimensioni medie inferiori a 10 μm) creano microfratture che possono drasticamente ridurre la microdurezza del pezzo [98]. D'altra parte, la presenza di pori nel volume del pezzo finito può ridurre drasticamente anche la macrodurezza, poiché il penetratore penetra più facilmente nel pezzo. Gli agglomerati di polvere che si formano da particelle di polveri molto coesive possono essere trascinati sul letto di polvere e formare difetti nello strato di polvere, come spiegato precedentemente.

In generale, ogni difetto causato sullo strato di polvere può essere ereditato anche dal pezzo finito: ad esempio, una bassa densità di impaccamento aumenta la porosità del pezzo finito; quindi, ogni impostazione dei parametri di processo che causa una bassa densità di impaccamento dello strato non fuso non può che portare a difetti interni del pezzo finito.

È importante anche considerare sempre la differenza tra lo spessore effettivo e quello nominale dello strato e non calibrare mai la potenza di un fascio laser/elettronico assumendo che lo spessore nominale dello strato sia quello effettivo. Nel primo caso, il fascio potrebbe non essere abbastanza forte da fondere in sufficiente profondità per consolidare lo strato di riferimento con lo strato precedente, creando dei pori. Nel secondo caso, la potenza del fascio potrebbe essere eccessiva rispetto allo spessore effettivo dello strato, dando luogo a fenomeni di fusione violenta, che causano spruzzi che contaminano il letto di polvere, aumentando la rugosità superficiale del pezzo finito o addirittura causando imprecisioni

dimensionali (dato che gli spruzzi possono persino disturbare la ricopertura durante la stesura dello strato di polvere successivo).

CAPITOLO 3: Modellazione del problema

3.1 Introduzione e descrizione del sistema

In letteratura, l'annidamento e la schedulazione delle parti sono generalmente affrontati per fasi: questa metodologia, pur semplificando il problema, porta inevitabilmente ad un potenziale divario rispetto alle decisioni congiunte ottimali. Di seguito è invece proposto un modello matematico con l'obiettivo di definire congiuntamente l'orientamento di costruzione della build, l'annidamento e la schedulazione delle parti, di modo da ridurre al minimo il makespan in una configurazione a macchina singola con tecnica Powder Bed Fusion (PBF).

Per il modello matematico presentato in seguito è stata presa in considerazione la configurazione a macchina singola con tecnica Powder Bed Fusion (PBF). Come precedentemente detto nel paragrafo 1.4, il problema preso in oggetto ricade nella classe [M/M/S]: avendo più parti da processare, queste devono essere assegnate ad una e una sola precisa build (o job), per avere poi le build assegnate secondo una determinata sequenza alla macchina AM di riferimento, di modo da massimizzare o minimizzare una specifica funzione obiettivo.

Le decisioni di schedulazione della produzione generalmente determinano: il raggruppamento delle parti in build (anche dette batch o job), l'assegnazione delle build alle macchine e la definizione delle sequenze di elaborazione delle build sulle macchine stesse. È qui sviluppato un modello di schedulazione di modo che le decisioni di raggruppamento delle parti in build e la pianificazione delle sequenze delle build siano prese in modo interconnesso. Essendo qui considerata una configurazione a macchina singola, non è dunque preso in considerazione il passaggio di assegnazione delle build alle varie macchine disponibili. Nella fase di assegnazione, le parti sono combinate in build e assegnate poi alla macchina considerando i vincoli di capacità.

Poiché i tempi di elaborazione (processing time) delle build dipendono sia dai tempi di setup sia dalle geometrie delle build assegnate (oltre che anche dall'altezza massima delle parti considerate), il raggruppamento delle parti in build è un punto molto critico in questo problema.

Durante la produzione, oltre al problema della schedulazione, sorge dunque anche quello della nidificazione, che riguarda precisamente il posizionamento delle parti all'interno della piattaforma di costruzione di dimensioni limitate. Le decisioni includono lo spostamento e

la rotazione delle parti attorno all'asse z (asse verticale e di costruzione). Un adeguato posizionamento delle parti porta ad un elevato tasso di utilizzo della macchina.

Esistono due tipi di annidamento, 2D e 3D, a seconda che le parti non siano o siano sovrapposte.

In questo studio, considerando il caso delle tecniche di Powder Bed Fusion (PBF), non sono prese in considerazione figure di supporto poiché non necessarie.

Per ridurre la difficoltà di considerare geometrie di parti complesse, un modo comune è quello di rappresentare le proiezioni delle parti mediante i loro riquadri di delimitazione minimi, portando a un problema di bin-packing 2D (2D-BPP), o approssimare la geometria delle parti con adeguati parallelepipedi, parlando in questo caso di bin-packing 3D (3D-BPP).

Anche la scelta dell'orientamento di costruzione delle parti è importante. Ovviamente, l'orientamento verticale rappresenta l'area della parte di proiezione più piccola ma l'altezza maggiore, contrariamente all'orientamento orizzontale in cui si ha una situazione invertita. Come già detto, essendo il tempo di elaborazione della build dipendente dall'altezza massima delle parti raggruppate in essa, la selezione dell'orientamento di costruzione può essere vista come un compromesso tra il numero massimo di parti annidate e il tempo di elaborazione della build. Pertanto, anche la selezione dell'orientamento della build ha un impatto sulle prestazioni della pianificazione.

3.2 Assunzioni

In questo paragrafo sono riportate le assunzioni e ipotesi sottostanti al modello matematico descritto in seguito:

- Si presuppone che tutte le parti siano disponibili all'istante di tempo $t = 0$;
- La macchina AM presa in considerazione è in grado di elaborare al massimo una build alla volta;
- Ogni parte deve essere elaborata una sola ed unica volta;
- Una volta iniziato il processamento della build, questo deve essere continuato fino al completamento: non può essere interrotto.

3.3 Presentazione del problema

Come accennato precedentemente, nel paragrafo seguente è proposto un modello matematico con l'obiettivo di definire una schedulazione delle parti volta a ridurre al minimo il makespan in una configurazione a macchina singola con tecnica Powder Bed Fusion

(PBF), tenendo in considerazione l'insieme di possibili ed opzionali orientamenti di costruzione associati ad ogni parte da processare.

Ogni parte $i \in I$ ha un insieme di orientamenti di costruzione opzionali K . Tale insieme corrisponde a una geometria 3D con tre parametri $\{w_{ik}, d_{ik}, h_{ik}\}$, rispettivamente corrispondenti alla lunghezza, alla larghezza e all'altezza del parallelepipedo con cui si approssima la geometria della parte i secondo l'orientamento di costruzione k . Le parti devono essere posizionate parallelamente alla lunghezza, larghezza o altezza della piattaforma, potendo ruotare attorno all'asse z di 90° .

A ciascuna parte $i \in I$ è anche associato il parametro v_i , che ne indica il volume.

Le coordinate della parte i (x_i, y_i, z_i) sono le coordinate dell'angolo posteriore inferiore sinistro del parallelepipedo con cui la parte i è approssimata, come raffigurato in Figura 3.1.

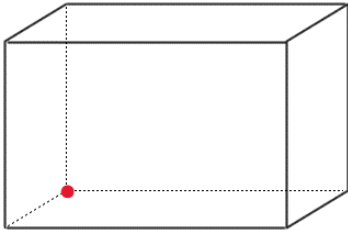


Figura 3.1: Punto di coordinate (x_i, y_i, z_i)

È sottointeso che nessuna parte i possa avere un volume superiore al volume della camera di costruzione della macchina AM. Inoltre, essendo in questo modello considerato anche il posizionamento delle parti i -esime, è necessario siano soddisfatti anche i seguenti vincoli, in cui, oltre alle dimensioni del parallelepipedo rappresentante la parte i , si tengono in considerazione anche le relative coordinate spaziali (x_i, y_i, z_i) : $0 \leq x_i + w_{ik} \leq W$ in merito alla lunghezza, $0 \leq y_i + d_{ik} \leq D$ in merito alla larghezza e $0 \leq z_i - h_{ik} \leq H$ in merito all'altezza (dove W , D e H rappresentano rispettivamente la lunghezza, la larghezza e l'altezza della camera di costruzione).

Prendendo in considerazione per questo punto l'articolo degli autori Egeblad et al. del 2009, sono state introdotte anche le seguenti variabili decisionali binarie indicanti le posizioni reciproche fra le parti i e i' se presenti nella stessa build: $l_{ii'}$ (la parte i si trova a sinistra della parte i' nella build a cui sono state assegnate), $u_{ii'}$ (la parte i si trova sotto alla parte i' nella build a cui sono state assegnate), $b_{ii'}$ (la parte i si trova dietro alla parte i' nella build a cui sono state assegnate), dove $i \neq i'$ [105].

A seconda della posizione relativa dei due parallelepipedi rappresentanti le parti i e i' , le coordinate (x_i, y_i, z_i) e $(x_{i'}, y_{i'}, z_{i'})$ devono soddisfare le seguenti disuguaglianze:

$$l_{ii'} = 1 \Rightarrow x_i + w_{ik} \leq x_{i'}, \quad b_{ii'} = 1 \Rightarrow y_i + d_{ik} \leq y_{i'}, \quad u_{ii'} = 1 \Rightarrow z_i + h_{ik} \leq z_{i'}.$$

Nella Figura 3.2 è riportata una disposizione di esempio di due parti, i e i' , in cui le rispettive variabili reciproche di posizione sono pari a: $l_{ii'} = 1, u_{ii'} = 0$ e $b_{ii'} = 1$.

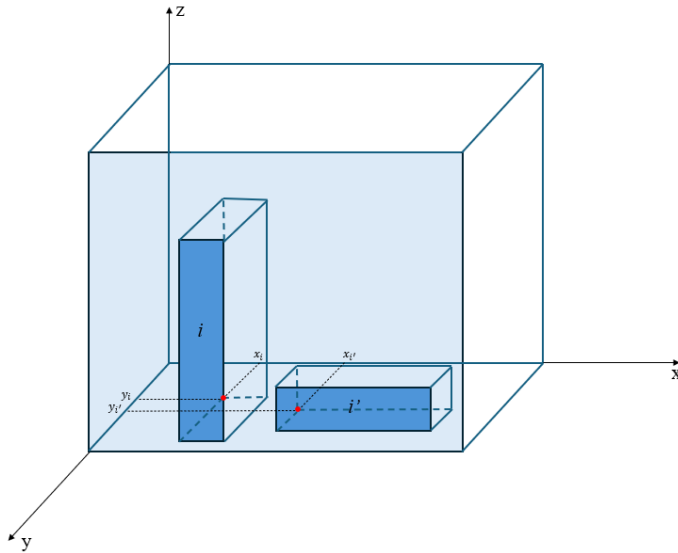


Figura 3.2: Disposizione di esempio di due parti, i e i' ($l_{ii'} = 1, u_{ii'} = 0$ e $b_{ii'} = 1$)

Sulla macchina AM si verifica un tempo di setup fisso per l'inizializzazione e per la pulizia prima dell'elaborazione di una nuova build j -esima, indicato come SET.

A differenza delle tecnologie tradizionali, il tempo di produzione di una build dipende sia dal volume totale sia dall'altezza massima delle varie parti che la compongono. Per la precisione, il tempo speso per unità di volume e dunque dipendente dalla geometria della build è denominato “tempo di scansione” (forming time o laser scanning time, VT); il tempo impiegato per la stratificazione e dipendente dall'altezza delle parti è denominato “tempo di ricopertura” (recoating time, HT), ripetuto per ogni strato in base all'altezza della build.

Il tempo di produzione per ogni build j è dunque definito da queste tre componenti.

Lo spessore dello strato, essendo lo stesso per ogni parte i in ogni build j e per l'intero ciclo di produzione, all'interno del modello è dunque trattato come una costante (sp).

3.4 Metodo di risoluzione

Il metodo di risoluzione adottato per risolvere il problema appena esposto è un modello matematico di Programmazione Mista Lineare Intera (MILP), poi implementato sul risolutore commerciale CPLEX.

Di seguito sono riportati gli indici, i parametri, le variabili ed il modello, poi dettagliato tramite opportuni riferimenti alla funzione obiettivo e suddetti vincoli.

Indici:

- Parte: i , dove $i \in I = \{1, \dots, N\}$;
- Build (Job o Batch): j , dove $j \in J = \{1, \dots, M\}$;
- Per la macchina AM non è necessario alcun indice, avendo una configurazione a macchina singola;
- Orientamento di costruzione per la parte i -esima: k , dove $k = \{1, \dots, K\}$.

Il parametro k per la precisione può solamente assumere i valori pari a 1, 2 e 3:

- $k = 1$ se la dimensione maggiore del parallelepipedo approssimante la parte da processare si trova parallela all'asse x ;
- $k = 2$ se la dimensione maggiore del parallelepipedo approssimante la parte da processare si trova parallela all'asse y ;
- $k = 3$ se la dimensione maggiore del parallelepipedo approssimante la parte da processare si trova parallela all'asse z .

Di seguito la Figura 3.3 rappresenta il sistema ad assi cartesiani preso come riferimento e la Figura 3.4 i tre possibili orientamenti per una parte i -esima.

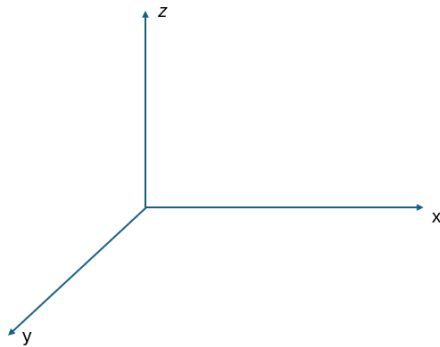


Figura 3.3: Sistema di riferimento cartesiano

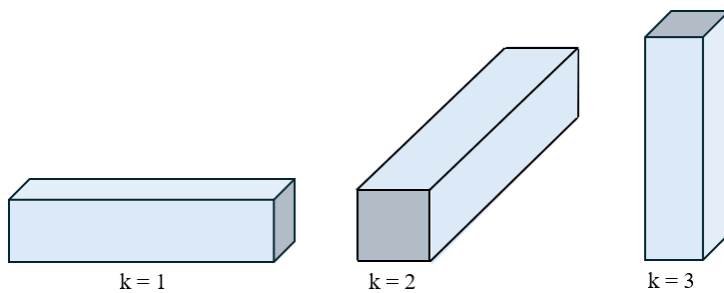


Figura 3.4: Possibili orientamenti per una parte i -esima

Parametri:

- Altezza della parte i secondo l'orientamento di costruzione k : h_{ik} ;
- Lunghezza della parte i secondo l'orientamento di costruzione k : w_{ik} ;
- Larghezza della parte i secondo l'orientamento di costruzione k : d_{ik} ;
- Volume della parte i : v_i (il volume v_i non necessita del pedice k , essendo un parametro di cui non varia il valore a seconda degli orientamenti);
- Lunghezza della camera di costruzione della macchina AM: W ;
- Larghezza della camera di costruzione della macchina AM: D ;
- Altezza della camera di costruzione della macchina AM: H ;
- Tempo di setup fisso della macchina AM: SET ;
- Tempo di produzione per unità di volume della build j : VT ;
- Tempo di produzione speso per ogni strato, fino all'altezza massima della build j : HT ;
- Spessore dello strato: sp .

Variabili:

- U_{ikj} : variabile binaria pari a 1 se la parte i con orientamento k è assegnata alla build j , altrimenti pari a 0;
- q_j : variabile binaria pari a 1 se alla build j è assegnata almeno una parte i (build / job attivo), altrimenti pari a 0;
- C_j : variabile continua che indica l'istante di completamento della build j ;
- PT_j : variabile continua che indica il tempo di produzione per la build j :

$$PT_j = SET * q_j + VT * \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N v_i * U_{ikj} + HT * \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \frac{h_{ik} * U_{ikj}}{sp} \quad \forall j \in J$$

- (x_i, y_i, z_i) : coordinate dell'angolo posteriore inferiore sinistro del parallelepipedo;
- $l_{ii'}$: variabile binaria pari a 1 se la parte i si trova a sinistra della parte i' nella build in cui sono entrambe allocate, 0 altrimenti;
- $u_{ii'}$: variabile binaria pari a 1 se la parte i si trova a sotto la parte i' nella build in cui sono entrambe allocate, 0 altrimenti;
- $b_{ii'}$: variabile binaria pari a 1 se la parte i si trova dietro alla parte i' nella build in cui sono entrambe allocate, 0 altrimenti;

- $s_{ii'}$: variabile binaria pari a 1 se la parte i e la parte i' si trovano nella stessa build, 0 altrimenti.

MILP:

$$\min C_{max}, \text{ avendo } C_{max} = C_M \quad (1)$$

s.t.

$$PT_j = SET * q_j + VT * \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N v_i * U_{ikj} + HT * \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \frac{h_{ik} * U_{ikj}}{sp} \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J U_{ikj} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N U_{ikj} \leq N * q_j \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$q_{j+1} \leq q_j \quad \forall j \in J : j = \{1, \dots, M - 1\} \quad (5)$$

$$C_{j-1} + PT_j \leq C_j \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$C_0 = 0 \quad (7)$$

$$s_{ii'} \leq \sum_{k=1}^K U_{ikj} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i', \forall j \in J \quad (8)$$

$$s_{ii'} \leq \sum_{k=1}^K U_{i'kj} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i', \forall j \in J \quad (9)$$

$$s_{ii'} \geq \sum_{k=1}^K (U_{ikj} + U_{i'kj}) - 1 \quad \forall i, i' \in I : i \neq i', \forall j \in J \quad (10)$$

$$l_{ii'} + l_{i'i} + b_{ii'} + b_{i'i} + u_{ii'} + u_{i'i} \geq s_{ii'} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (11)$$

$$l_{ii'} + l_{i'i} \leq 1 \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (12)$$

$$u_{ii'} + u_{i'i} \leq 1 \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (13)$$

$$b_{ii'} + b_{i'i} \leq 1 \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (14)$$

$$l_{ii'} \leq T * s_{ii'} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (15)$$

$$u_{ii'} \leq T * s_{ii'} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (16)$$

$$b_{ii'} \leq T * s_{ii'} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (17)$$

$$x_i \geq x_{i'} + \sum_{k=1}^K U_{i'kj} * w_{i'k} + (l_{i'i} - 1) * T + (s_{ii'} - 1) * T \quad \forall i, i' \in I : i \neq i', \forall j \in J \quad (18)$$

$$y_i \geq y_{i'} + \sum_{k=1}^K U_{i'kj} * d_{i'k} + (b_{i'i} - 1) * T + (s_{ii'} - 1) * T \quad \forall i, i' \in I : i \neq i', \forall j \in J \quad (19)$$

$$z_i \geq z_{i'} + \sum_{k=1}^K U_{i'kj} * z_{i'k} + (u_{i'i} - 1) * T + (s_{ii'} - 1) * T \quad \forall i, i' \in I : i \neq i', \forall j \in J \quad (20)$$

$$x_i + \sum_{k=1}^K w_{ik} * U_{ikj} \leq W \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (21)$$

$$y_i + \sum_{k=1}^K d_{ik} * U_{ikj} \leq D \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (22)$$

$$z_i + \sum_{k=1}^K h_{ik} * U_{ikj} \leq H \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (23)$$

$$U_{ikj} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (24)$$

$$q_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (25)$$

$$C_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (26)$$

$$PT_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (27)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (28)$$

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (29)$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (30)$$

$$l_{ii'} \in \{0, 1\} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (31)$$

$$u_{ii'} \in \{0, 1\} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (32)$$

$$b_{ii'} \in \{0, 1\} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (33)$$

$$s_{ii'} \in \{0, 1\} \quad \forall i, i' \in I : i \neq i' \quad (34)$$

L'equazione (1) definisce la funzione obiettivo, dunque la minimizzazione del makespan.

L'equazione (2) definisce la variabile PT_j , vale a dire il tempo di processamento per ogni build j . Come detto precedentemente, il tempo PT_j è qui rappresentato come funzione di tre addendi: il primo riguardante il setup, il secondo riguardante il volume della build j che si sta stampando e un terzo riguardante l'altezza.

Il vincolo (3) assicura che ogni parte deve essere assegnata ad una e unica sola build j e con un unico e solo orientamento k .

Il vincolo (4) riguarda la definizione della variabile q_j , in particolare se è presente almeno una parte i assegnata ad una build j , tale build j deve essere contrassegnata come utilizzata (o attiva).

Il vincolo (5) indica che le build debbano essere "attive" in ordine incrementale e crescente (se ad esempio si ha un upper bound del numero di build M pari a 5, ma ne si considerano attive solamente 3, quest'ultime dovranno necessariamente essere la build $j=1$, la build $j=2$ e la build $j=3$).

Il vincolo (6) indica che il tempo di completamento della build j sulla macchina AM di riferimento è maggiore o uguale alla somma del suo tempo di elaborazione (PT_j) e del tempo di completamento della build precedente $j-1$ sulla macchina stessa.

Il vincolo (7) è necessario per definire la variabile C_0 : si assegna automaticamente il valore 0 al tempo di lavorazione (completamento) dei lotti non utilizzati.

I vincoli (8), (9) e (10) sono vincoli di definizione della variabile $s_{ii'}$.

I vincoli (11), (12), (13) e (14) riguardano la posizione relativa fra le parti i e i' se presenti nella stessa build.

I vincoli (15), (16) e (17) sono i vincoli di lot-sizing per le variabili binarie indicanti la posizione reciproca delle parti i e i' se appartenenti alla stessa build j .

I vincoli (18), (19) e (20) permettono di mettere in relazione le coordinate della parte i (x_i, y_i, z_i) con le variabili di posizione reciproca $l_{ii'}$, $u_{ii'}$ e $b_{ii'}$ nel caso in cui la parte i e la parte i' appartengono alla stessa build; nel caso in cui le due parti prese in considerazione non fossero nella stessa e medesima build tali vincoli non risultano eccessivamente stringenti, avendo la componente $T * (s_{ii'} - 1)$.

I vincoli (21), (22), (23) permettono di considerare, oltre alle dimensioni del parallelepipedo rappresentante la parte i , anche le relative coordinate spaziali (x_i, y_i, z_i), di modo che, ovunque questo sia posizionato, la parte i non si trovi al di fuori delle dimensioni consentite W, D e H del volume di costruzione della macchina AM.

I vincoli (24), (25), (26), (27), (28), (29), (30), (31), (32), (33) e (34) costituiscono i vincoli di dominio delle variabili presenti nel modello, binarie e intere.

CAPITOLO 4: Esperimenti e Casi di studio

4.1 Esperimenti – Design of Experiment

Di seguito sono riportati le modalità tramite cui sono stati valorizzati i parametri del modello e le fonti da cui sono stati estratti i dati per alcuni di essi.

I dati riguardanti lo spessore dello strato di ogni parte i sono stati ricavati tramite una distribuzione uniforme di parametri $a = 0,1$ mm e $b = 0,15$ mm, essendo questi i valori di minimo e massimo che si hanno per la tecnica additiva di Powder Bed Fusion con polveri polimeriche.

Le dimensioni della camera di costruzione (W, D, H) sono stati considerate sulla base di quanto riportato nel sito del produttore 3D Systems di macchine per AM per la macchina sPro 230 HS, la quale risulta avere un volume di costruzione pari a $550 \times 550 \times 750$ mm³ [104].

I dati riguardanti la lunghezza, larghezza e altezza della parte i -esima secondo l'orientamento k -esimo sono stati campionati tramite una distribuzione uniforme di parametri $a = 0$ e $b = 550$ mm per la larghezza e la lunghezza e di parametri $a = 0$ e $b = 750$ mm per l'altezza.

I dati riguardanti i parametri con cui è stata definita la funzione del tempo di processamento PT_j della build j -esima (dunque SET, VT, HT) sono stati utilizzati avendo come riferimento l'articolo del 2019 dell'autore Küçükkoç [20]. Nella Tabella 4.1 sono riportati i corrispondenti valori:

SET (hr)	1
VT (hr/mm ³)	0,000030864
HT (hr/mm)	0,07

Tabella 4.1: Parametri SET, VT e HT

Nel successivo paragrafo sono considerati e resi variabili alcuni degli elementi che impattano sul valore della funzione obiettivo, come ad esempio il numero N di parti i da processare (e consequenzialmente il numero di build j) e lo spessore dello strato. Per la precisione, in merito al valore di N , si considereranno le casistiche in cui $N = 5$, $N = 10$, $N = 15$ e $N = 20$ (utilizzando un valore medio di spessore dello strato pari a $0,125$ mm); in merito al valore di sp , si considereranno le casistiche in cui $sp = 0,1$, $sp = 0,125$ e $sp = 0,15$ (utilizzando un valore di N pari a 10).

Le dimensioni delle parti nelle casistiche $N = 5$, $N = 10$, $N = 15$ e $N = 20$ sono riportate nelle seguenti tabelle (Tabella 4.2, Tabella 4.3, Tabella 4.4 e Tabella 4.5):

N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)
1	85 x 545 x 505
2	460 x 425 x 595
3	30 x 280 x 660
4	430 x 320 x 140
5	365 x 265 x 85

Tabella 4.2: Dimensioni della parte i-esima per N = 5

N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)	N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)
1	85 x 545 x 505	6	350 x 420 x 740
2	460 x 425 x 595	7	235 x 440 x 160
3	30 x 280 x 660	8	405 x 225 x 405
4	430 x 320 x 140	9	160 x 135 x 115
5	365 x 265 x 85	10	530 x 195 x 635

Tabella 4.3: Dimensioni della parte i-esima per N = 10

N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)	N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)	N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)
1	85 x 545 x 505	6	350 x 420 x 740	11	95 x 390 x 660
2	460 x 425 x 595	7	235 x 440 x 160	12	195 x 315 x 80
3	30 x 280 x 660	8	405 x 225 x 405	13	305 x 120 x 460
4	430 x 320 x 140	9	160 x 135 x 115	14	50 x 445 x 435
5	365 x 265 x 85	10	530 x 195 x 635	15	210 x 215 x 225

Tabella 4.4: Dimensioni della parte i-esima per N = 15

N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)	N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)	N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)	N	$w \times d \times h$ (mm x mm x mm)
1	85 x 545 x 505	6	350 x 420 x 740	11	95 x 390 x 660	16	305 x 25 x 515
2	460 x 425 x 595	7	235 x 440 x 160	12	195 x 315 x 80	17	425 x 150 x 180
3	30 x 280 x 660	8	405 x 225 x 405	13	305 x 120 x 460	18	515 x 275 x 420
4	430 x 320 x 140	9	160 x 135 x 115	14	50 x 445 x 435	19	400 x 250 x 695
5	365 x 265 x 85	10	530 x 195 x 635	15	210 x 215 x 225	20	50 x 505 x 190

Tabella 4.5: Dimensioni della parte i-esima per N = 20

4.2 Risultati

Le soluzioni presentate di seguito tramite il risolutore commerciale CPLEX sono ottime e nessun vincolo è stato rilassato.

Di seguito la Tabella 4.6 riporta il valore della funzione obiettivo, C_M , sia in ore sia in giorni all'aumentare del numero di parti da processare, dunque all'aumentare di N (nel particolare sono riportati i risultati per $N = 5$, $N = 10$, $N = 15$ e $N = 20$). In tale tabella è riportata anche un'ulteriore colonna in cui è indicato il tempo impiegato dal risolutore commerciale per trovare la soluzione ottimale. Nelle seguenti figure (Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4) si riportano invece le disposizioni e i corrispettivi orientamenti delle parti i -esime all'interno delle build j -esime a cui sono state assegnate durante l'elaborazione della soluzione.

	M	$C_M (h)$	$C_M (gg)$	Tempo (s)
N = 5	2	6445,240	268 circa	7,93
N = 10	3	14706,281	612 circa	19,48
N = 15	4	17787,155	741 circa	99,20
N = 20	5	23512,504	979 circa	895,35

Tabella 4.6: Valori di C_M al variare del numero di parti N da processare

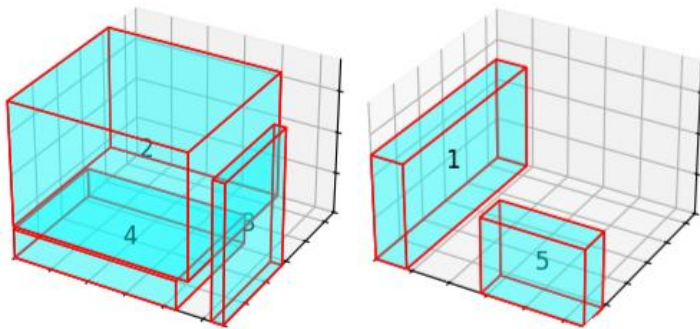


Figura 4.1: $N = 5$, $M = 2$ ($j = 1$ e $j = 2$)

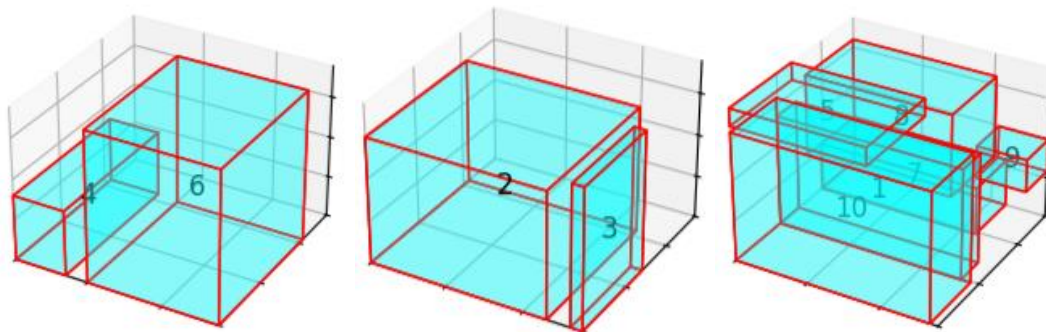


Figura 4.2: $N = 10$, $M = 3$ ($j = 1$, $j = 2$ e $j = 3$)

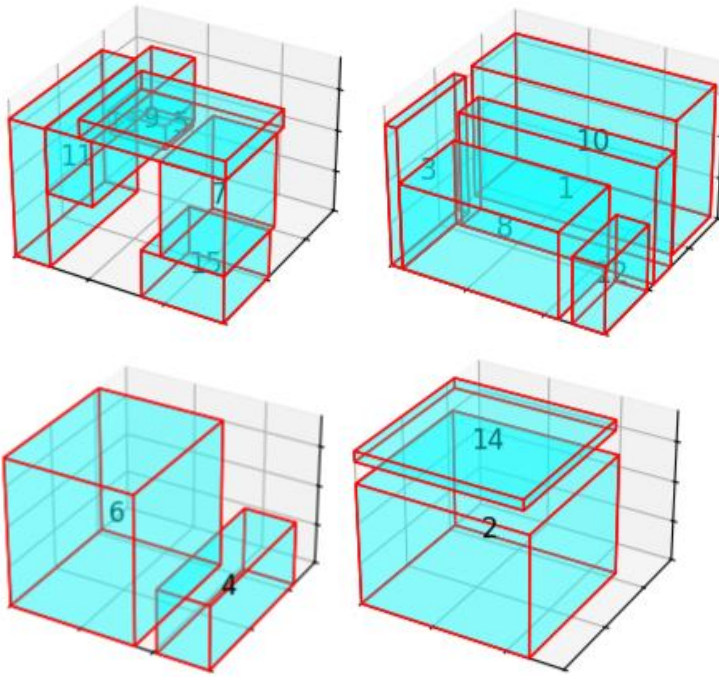


Figura 4.3: $N = 15$, $M = 4$ ($j = 1, j = 2, j = 3$ e $j = 4$)

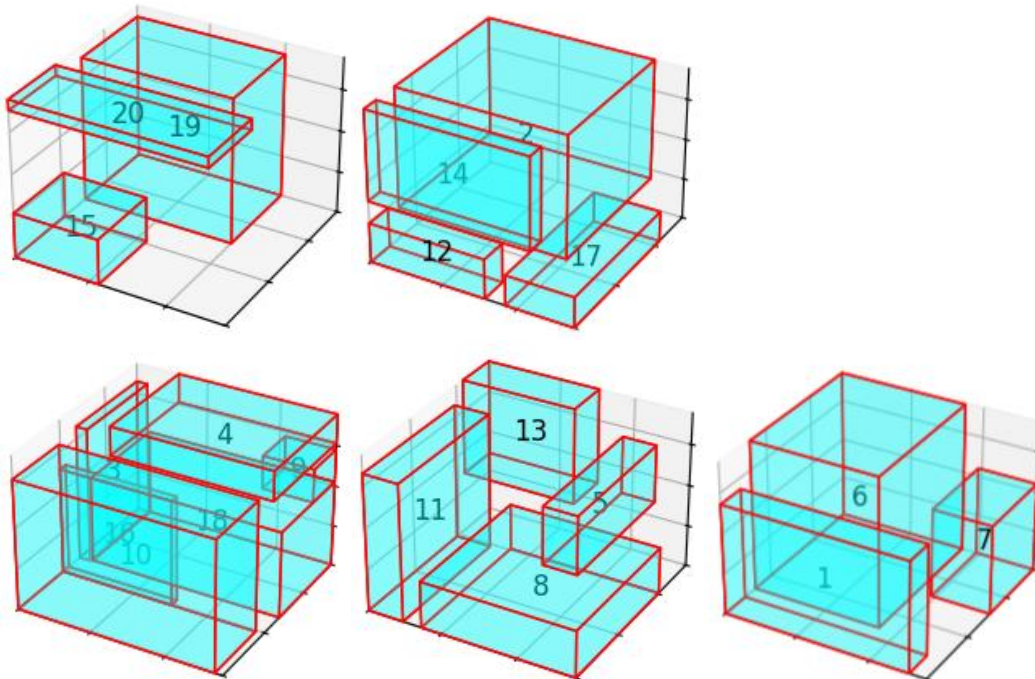


Figura 4.4: $N = 20$, $M = 5$ ($j = 1, j = 2, j = 3, j = 4$, e $j = 5$)

Al variare del numero di N (e di M) il tempo di completamento dell'ultima build aumenta notevolmente, come anche il tempo di elaborazione richiesto dal modello. Al passare dalla casistica $N = 5$ alla casistica $N = 10$, il tempo di completamento dell'ultima build con questa struttura dati aumenta di circa il 128%, passando invece alla casistica $N = 20$ tale valore aumenta addirittura del 265%. Analogamente succede al tempo di elaborazione impiegato

dal modello per la ricerca della soluzione ottimale, arrivando ad impiegare circa 15 minuti (895 secondi) per la casistica $N = 20$ parti. Essendo il tempo di elaborazione caratterizzato da un andamento esponenziale al crescere del valore di N , si può giungere alla conclusione di come questo modello performi in modo migliore e risulti, eventualmente, più facilmente usufruibile in ambito produttivo nel caso in cui sia da processare un numero relativamente basso di parti i . Tale andamento è mostrato nella Figura 4.5:

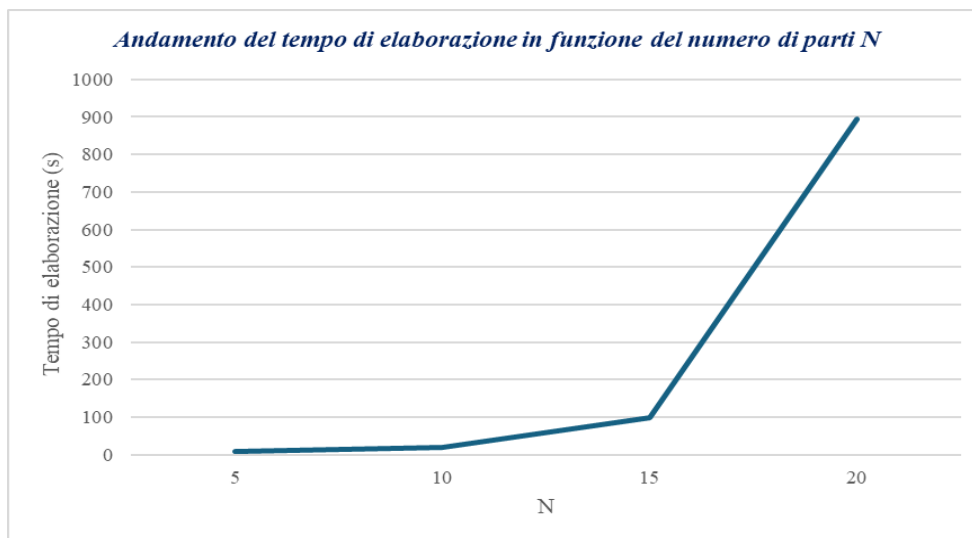


Figura 4.5: Andamento del tempo di elaborazione in funzione del numero di parti N

Di seguito si riporta la Tabella 4.7 in cui si pone a confronto il valore di C_M , sia in ore sia in giorni, con il tempo di processamento PT_j di ogni build j , anch'esso sia in ore sia in giorni, di modo da cogliere quanto sia il tempo in attesa di ogni build j (avendo $C_{j-1} + PT_j \leq C_j \quad \forall j \in J$). Tale confronto è effettuato in particolare per le casistiche $N = 5$, $N = 10$ e $N = 15$, analogo ragionamento si può ripetere anche per la casistica $N = 20$. Ad esempio, nel caso in cui $N = 5$, la build $j = 2$ partirà dopo 214 giorni circa l'inizio del processo.

		$PT_j (h)$	$PT_j (gg)$	$C_j (h)$	$C_j (gg)$	$C_M (h)$	$C_M (gg)$
N = 5	j = 1	5138,051	214 circa	5138,051	214 circa	6445,240	268 circa
	j = 2	1307,189	54 circa	6445,240	268 circa		
	j = 1	4445,75	185 circa	4445,75	185 circa		

N = 10	j = 2	4465,087	186 circa	8910,837	371 circa	14706,281	612 circa
	j = 3	5795,444	241 circa	14706,281	612 circa		
N = 15	j = 1	3384.716	141 circa	3384,716	141 circa	17787,155	741 circa
	j = 2	5489.987	228 circa	8874,703	369 circa		
	j = 3	4445.75	185 circa	13320,453	555 circa		
	j = 4	4466.702	185 circa	17787,155	741 circa		

Tabella 4.7: Confronto tra C_M e il PT_j per ogni j nelle casistiche N = 5, N = 10 e N = 15

Nella Tabella 4.8, prendendo come riferimento la casistica con N = 10 parti da processare, è riportato il valore di C_M , sia in ore sia in giorni, al variare del valore dello spessore dello strato con cui ogni parte i è creata. In particolare, sono riportati tali risultati per i corrispondenti valori di minimo, medio e massimo per la tecnologia di Powder Bed Fusion, i quali risultano essere $sp = 0,10$ mm, $sp = 0,125$ mm e $sp = 0,15$ mm.

	$C_M (h)$	$C_M (gg)$
sp = 0,10 mm	15271,881	636 circa
sp = 0,125 mm	14706,281	612 circa
sp = 0,15 mm	14330,214	597 circa

Tabella 4.8: Attuale e nuovi valori degli spessori e impatto su C_M

Alla luce dei risultati ottenuti in quest'ultimo scenario, si può notare come anche lo spessore dello strato, seppur in modo meno evidente rispetto al variare del numero di parti e di build da processare, influenzi il valore della funzione obiettivo C_M . Si vede come, aumentando la precisione dimensionale e dunque diminuendo lo spessore dello strato con cui sono create le varie parti i -esime, il valore di C_M ne risenta in negativo, aumentando ad esempio di circa il 3,92% passando da un valore di $sp = 0,125$ mm a $sp = 0,10$ mm. Diminuendo invece la precisione dimensionale e aumentando dunque lo spessore dello strato con cui sono create

le varie parti i -esime, il valore di C_M passando ad esempio da un valore di $sp = 0,125$ mm a $sp = 0,15$ mm diminuisce di circa il 2,45%.

Come già descritto precedentemente, per consentire la formazione di ciascun nuovo strato durante il processo di stampa 3D, la piattaforma di costruzione si abbassa progressivamente di un Δh esattamente pari allo spessore dello strato di polvere predefinito. Il fatto che il tempo di stampa diminuisca dunque all'aumentare dello spessore dello strato si verifica per i seguenti motivi, come ad esempio:

- Riduzione del numero di strati: con uno spessore di strato maggiore, è necessario un minore numero di strati per completare la stampa della build j . Di conseguenza, si risparmia parte del tempo necessario per il cambiamento di strato e l'applicazione del materiale del letto di polvere.
- Minore overhead di movimento: riducendosi il numero totale di strati, si riduce anche il tempo dedicato allo spostamento della piattaforma di costruzione lungo l'asse z per la formazione di un nuovo strato fino al completamento del pezzo.

In sintesi, aumentare lo spessore dello strato consente una maggiore efficienza nel processo di stampa riducendo il tempo complessivo richiesto per la fabbricazione di un pezzo, tenendo comunque sempre in considerazione l'impatto sulla qualità superficiale e la precisione dimensionale. È perciò necessario trovare un adeguato bilanciamento tra lo spessore dello strato ottimale per ridurre il tempo di stampa e mantenere i requisiti di qualità richiesti per l'applicazione specifica.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato dunque sviluppato un modello di programmazione lineare mista intera (MILP) per affrontare congiuntamente il tema di nesting tridimensionale e di scheduling in una configurazione a macchina singola per la produzione additiva. Questo modello ha permesso di ottimizzare il posizionamento e l'orientamento delle parti all'interno del volume di costruzione della macchina 3D, minimizzando il makespan e permettendo l'ottenimento di un miglioramento significativo dell'efficienza del processo.

Nonostante si sia osservato come il tempo di elaborazione della soluzione secondo questo modello sia caratterizzato da un andamento esponenziale al crescere del valore di N, e risulti dunque più performante e più facilmente usufruibile se in presenza di un numero relativamente basso di parti da processare, i risultati ottenuti dimostrano l'efficacia della tecnica di ottimizzazione sviluppata. Al variare del numero di parti da processare e al variare dello spessore dello strato predefinito, il modello presenta infatti soluzioni solide e robuste.

Questa tesi contribuisce quindi alla letteratura esistente fornendo un approccio risolutivo per la gestione congiunta del tema dell'annidamento tridimensionale e della schedulazione nei processi di fabbricazione additiva. La tecnica proposta può essere adattata e applicata in vari contesti industriali, aprendo nuove opportunità per l'adozione diffusa della produzione additiva. Le future ricerche potranno espandere ulteriormente questi risultati, esplorando nuovi modelli e nuove metodologie di risoluzione per l'ottimizzazione congiunta di tali temi all'interno anche di configurazioni alternative, come quella multi-macchina.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA:

- [1] Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545–554.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- [2] Godec, D., Pilipović, A., & Breški, T. (2022). General Process workflow in Additive Manufacturing. In *Springer tracts in additive manufacturing* (pp. 45–57).
https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9_2
- [3] Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering/Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 168781401882288.
<https://doi.org/10.1177/1687814018822880>
- [4] Produzione additiva: tendenze e prospettive del settore. Formlabs.
<https://formlabs.com/it/blog/produzione-additiva/>
- [5] Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- [6] Busaschi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Filomeno, M., Watts, C., & Drake, R. (2017). A review of additive manufacturing technology and cost estimation techniques for the defence sector. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 117–128.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581717300299>
- [7] Scott, J., Weber, C., Newsome, S., & Wohlers, T. (2012). Additive Manufacturing: status and opportunities.
https://cgsr.llnl.gov/content/assets/docs/IDA_AdditiveM3D_33012_Final.pdf
- [8] Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873–3882.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>

- [9] Emmelmann, C., Rudolph, J., Güntzer, F., & Zühlke, S. (2018). Automatisierte Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung für die additive Produktion. *Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb/ZWF. Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(6), 398–401.
<https://doi.org/10.3139/104.111925>
- [10] Kapadia, M. S., Starly, B., Thomas, A., Uzsoy, R., & Warsing, D. P. (2019). Impact of Scheduling Policies on the Performance of an Additive Manufacturing Production System. *Procedia Manufacturing*, 39, 447–456.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.388>
- [11] Baumung, W., & Fomin, V. V. (2018). Optimization model to extend existing production planning and control systems for the use of additive manufacturing technologies in the industrial production. *Procedia Manufacturing*, 24, 222–228.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.035>
- [12] Ziegler, S., Struller, S., Scherwitz, P., & Reinhart, G. (2021). Approach for a production control system within metal-based additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 99, 39–44.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.007>
- [13] Denkena, B., Dittrich, M., & Jacob, S. (2019). Methodology for integrative production planning in highly dynamic environments. *Production Engineering*, 13(3–4), 317–324.
<https://doi.org/10.1007/s11740-019-00889-0>
- [14] Durão, L. F. C. S., Christ, A., Anderl, R., Schützer, K., & De Senzi Zancul, E. (2016). Distributed manufacturing of spare parts based on additive manufacturing: use cases and technical aspects. *Procedia CIRP*, 57, 704–709.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.122>
- [15] Serres, N., Tidu, D., Sankaré, S., & Hlawka, F. (2011). Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1117–1124.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.010>
- [16] Oh, Y., Witherell, P., Lu, Y., & Sprock, T. (2020). Nesting and scheduling problems for additive manufacturing: A taxonomy and review. *Additive Manufacturing*, 36, 101492.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101492>

- [17] De Antón, J., Villafañez, F. A., Poza, D., & López-Paredes, A. (2022). A framework for production planning in additive manufacturing. *International Journal of Production Research (Print)*, 61(24), 8674–8691.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2160026>
- [18] De Araújo, L. J. P., Panesar, A., Özcan, E., Atkin, J., Baumers, M., & Ashcroft, I. (2019). An experimental analysis of deepest bottom-left-fill packing methods for additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(22), 6917–6933.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1686187>
- [19] Zhang, Y., Bernard, A., Harik, R., & Fadel, G. (2018). A new method for single-layer-part nesting in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(5), 840–854.
<https://doi.org/10.1108/rpj-01-2017-0008>
- [20] Küçükkoç, İ. (2019). MILP models to minimise makespan in additive manufacturing machine scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 105, 58–67.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.006>
- [21] Kim, H. (2017). Bounds for parallel machine scheduling with predefined parts of jobs and setup time. *Annals of Operations Research*, 261(1–2), 401–412.
<https://doi.org/10.1007/s10479-017-2615-z>
- [22] Chergui, A., Hadj-Hamou, K., & Vignat, F. (2018). Production scheduling and nesting in additive manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 292–301.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.048>
- [23] Dvořák, F., Micali, M., & Mathieug, M. (2018). Planning and scheduling in additive manufacturing. *Inteligencia Artificial*, 21(62), 40–52.
<https://doi.org/10.4114/intartif.vol21iss62pp40-52>
- [24] Zhang, J., Yao, X., & Li, Y. (2019). Improved evolutionary algorithm for parallel batch processing machine scheduling in additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2263–2282.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1617447>
- [25] <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>

- [26] De Araújo, L. J. P., Özcan, E., Atkin, J., & Baumers, M. (2018). Analysis of irregular three-dimensional packing problems in additive manufacturing: a new taxonomy and dataset. *International Journal of Production Research*, 57(18), 5920–5934.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1534016>
- [27] Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44(2), 145–159.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-k](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-k)
- [28] Wäscher, G., Haußner, H., & Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1109–1130.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047>
- [29] De Araújo, L. J. P., Özcan, E., Atkin, J., Baumers, M., Tuck, C., & Hague, R. (2015b). Toward better build volume packing in additive manufacturing: classification of existing problems and benchmarks. *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
<http://eprints.nottingham.ac.uk/33945/>
- [30] Graves, S. C. (1981). A review of production scheduling. *Operations Research*, 29(4), 646–675.
<https://doi.org/10.1287/opre.29.4.646>
- [31] Kenmochi, M., Imamichi, T., Nonobe, K., Yagiura, M., & Nagamochi, H. (2009). Exact algorithms for the two-dimensional strip packing problem with and without rotations. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 73–83.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.020>
- [32] Egeblad, J., & Pisinger, D. (2009). Heuristic approaches for the two- and three-dimensional knapsack packing problem. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1026–1049.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.004>
- [33] Yang, W., Liu, W., Liu, L., & Xu, A. (2008b). A Genetic Algorithm for Automatic Packing in Rapid Prototyping Processes. In *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Theoretical and Methodological Issues* (pp. 1072–1077).
https://doi.org/10.1007/978-3-540-87442-3_132

[34] Zhang, X., Zhou, B., Zeng, Y., & Gu, P. (2002). Model layout optimization for solid ground curing rapid prototyping processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 18(1), 41–51.

[https://doi.org/10.1016/s0736-5845\(01\)00022-9](https://doi.org/10.1016/s0736-5845(01)00022-9)

[35] Hur, S., Choi, K. H., Lee, S., & Chang, P. (2001). Determination of fabricating orientation and packing in SLS process. *Journal of Materials Processing Technology*, 112(2–3), 236–243.

[https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00581-7](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00581-7)

[36] Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2019b). Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 317–325.

<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.007>

[37] Zhang, Y., Bernard, A., Harik, R., & Karunakaran, K. P. (2015). Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6), 1393–1407.

<https://doi.org/10.1007/s10845-015-1057-1>

[38] 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*, 423–438.

<https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.1.001>

[39] Oh, Y., Zhou, C., & Behdad, S. (2019). The impact of build orientation policies on the completion time in two-dimensional irregular packing for additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(21), 6601–6615.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1683253>

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

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.07.006>

- [41] Griffiths, V., Scanlan, J. P., Eres, H., Martínez-Sykora, A., & Chinchapatnam, P. (2019). Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM). *European Journal of Operational Research*, 273(1), 334–352.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.053>
- [42] Gopsill, J., & Hicks, B. (2017). Investigating the effect of scale and scheduling strategies on the productivity of 3D managed print services. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 232(10), 1753–1766.
<https://doi.org/10.1177/0954405417708217>
- [43] Freens, J. P. N., Adan, I., Pogromsky, A. Y., & Ploegmakers, H. (2015). Automating the production planning of a 3D printing factory. *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*.
<https://doi.org/10.1109/wsc.2015.7408327>
- [44] 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*, 58, 145–157.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.03.003>
- [45] Jun, K., Park, S., & Kim, H. (2017). Scheduling 3D printers with multiple printing alternatives. *13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*.
<https://doi.org/10.1109/coase.2017.8256151>
- [46] Kim, H., & Lee, J. (2017b). Robot task sequencing for a flexible assembly system with 3D printers. *4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*.
<https://doi.org/10.1109/codit.2017.8102557>
- [47] Kim, H., & Lee, J. (2018b). Cyclic robot scheduling for 3D printer-based flexible assembly systems. *Annals of Operation Research/Annals of Operations Research*, 298(1–2), 339–359.
<https://doi.org/10.1007/s10479-018-3098-2>
- [48] I. Kucukkoc, Q. Li, and D. Zhang, “Increasing the utilisation of additive manufacturing and 3D printing machines considering order delivery times,” *Innsbruck, Austria, Feb. 2016*, vol. 3, pp. 195–201.

- [49] Kim, H., Choi, J. W., & Wicker, R. B. (2010). Scheduling and process planning for multiple material stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 16(4), 232–240. <https://doi.org/10.1108/13552541011049243>
- [50] Masoomi, M., Thompson, S. M., & Shamsaei, N. (2017). Quality part production via multi-laser additive manufacturing. *Manufacturing Letters*, 13, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.05.003>
- [51] Yu, J., Pierson, H. A., & Liao, H. (2017). Toolpath allocation and scheduling for concurrent fused filament fabrication with multiple extruders. *IISE Transactions*, 51(2), 192–208. <https://doi.org/10.1080/24725854.2017.1374582>
- [52] Plakhotnik, D., Glasmacher, L., Vaneker, T. H., Smetanin, Y., Stautner, M., Murtezaoglu, Y., & Van Houten, F. (2019). CAM planning for multi-axis laser additive manufacturing considering collisions. *CIRP Annals*, 68(1), 447–450. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.007>
- [53] Avrampos, P., & Vosniakos, G.-C. (2021). *Journal of Manufacturing Processes*. A Review of Powder Deposition in Additive Manufacturing by Powder Bed Fusion, 332–352. <https://ir.cnu.edu.tw/handle/310902800/11812>
- [54] Nouri, A., Rohani Shirvan, A., Li, Y., & Wen, C. (2021). *Journal of Materials Science & Technology*. Additive Manufacturing of Metallic and Polymeric Load-bearing Biomaterials Using Laser Powder Bed Fusion: A Review, 196–215. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.058>
- [55] Tiwari, S. K., Pande, S., Agrawal, S., & Bobade, S. M. (2015). Selection of selective laser sintering materials for different applications. *Rapid Prototyping Journal*, 21(6), 630–648. <https://doi.org/10.1108/rpj-03-2013-0027>
- [56] Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>

[57] Popov, V. V., Katz-Demyanetz, A., Garkun, A., & Bamberger, M. (2018). The effect of powder recycling on the mechanical properties and microstructure of electron beam melted Ti-6Al-4 V specimens. *Additive Manufacturing*, 22, 834–843.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.003>

[58] Tang, H., Qian, M., Liu, N., Zhang, X. Z., Yang, G. Y., & Wang, J. (2015). Effect of powder reuse times on additive manufacturing of TI-6AL-4V by selective electron beam melting. *JOM*, 67(3), 555–563.

<https://doi.org/10.1007/s11837-015-1300-4>

[59] Bourell, D. L., Kruth, J. P., Leu, M. C., Levy, G., Rosen, D. W., Beese, A. M., & Clare, A. T. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659–681.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>

[60] Leigh, D. K., & Bourell, D. L. (2020b). Powder bed fusion of polymers. In *ASM International eBooks* (pp. 52–57).

<https://doi.org/10.31399/asm.hb.v24.a0006543>

[61] Puttegowda, M., Rangappa, S. M., Jawaid, M., Pradeep, S., Yogesha, B., & Saba, N. (2018). Potential of natural/synthetic hybrid composites for aerospace applications. In *Elsevier eBooks* (pp. 315–351).

<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102131-6.00021-9>

[62] Hudecki, A., Kiryczyński, G., & Łos, M. (2019). Biomaterials, Definition, Overview. In *Elsevier eBooks* (pp. 85–98).

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812258-7.00007-1>

[63] Nouri, A., Shirvan, A. R., Li, Y., & Wen, C. (2021). Additive manufacturing of metallic and polymeric load-bearing biomaterials using laser powder bed fusion: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 94, 196–215.

<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.058>

[64] Harun, W. S. W., Kamariah, M. S., Muhamad, N., Ghani, S. a. C., Ahmad, F., & Mohamed, Z. (2018). A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials. *Powder Technology*, 327, 128–151.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.058>

[65] Egger, G., Gygax, P. E., Glardon, R., & Karapatis, N. P. (1999). Optimization of powder layer density in selective laser sintering. Proceedings of the 9th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 255–263.

<https://doi.org/10.26153/tsw/746>

[66] Spierings, A. B., & Levy, G. (2009). Comparison of Density of Stainless Steel 316L Parts Produced with Selective Laser Melting using Different Powder Grades. Proceedings of the SFF Symposium Held in Austin, 342–353.

<https://doi.org/10.26153/tsw/15113>

[67] Weaver, J. S., Whiting, J. G., Tondare, V. N., Beauchamp, C., Peltz, M. A., Tarr, J., Phan, T. Q., & Donmez, M. A. (2021). The effects of particle size distribution on the rheological properties of the powder and the mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel. Additive Manufacturing, 39, 101851.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101851>

[68] Nasato, D. S., & Pöschel, T. (2020). Influence of particle shape in additive manufacturing: Discrete element simulations of polyamide 11 and polyamide 12. Additive Manufacturing, 36, 101421.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101421>

[69] Soundarapandiyan, G., Johnston, C., Khan, R. H., Leung, C. L. A., Lee, P., Hernández-Nava, E., Chen, B., & Fitzpatrick, M. E. (2021). The effects of powder reuse on the mechanical response of electron beam additively manufactured Ti6Al4V parts. Additive Manufacturing, 46, 102101.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102101>

[70] Shamsdini, S., Ghoncheh, M., & Mohammadi, M. (2021). Effect of recoater-blade type on the mechanical properties and microstructure of additively manufactured maraging steels. Materials Science and Engineering: A, 812, 141104.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141104>

[71] Use-Cases of different Recoater Configurations for Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Use-Cases of different Recoater Configurations for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) (eos.info)

<https://www.eos.info/en-us/content/blog/recoater-configurations-for-dmls>

[72] Haeri, S., Wang, Y., Ghita, O., & Sun, J. (2017). Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing. *Powder Technology*, 306, 45–54.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.002>

[73] Zhang, J., Tan, Y., Bao, T., Xu, Y., Xiao, X., & Jiang, S. (2020). Discrete element simulation of the effect of Roller-Spreading parameters on Powder-Bed density in additive manufacturing. *Materials (Basel)*, 13(10), 2285.

<https://doi.org/10.3390/ma13102285>

[74] Haeri, S. (2017). Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in Additive Manufacturing using DEM simulations. *Powder Technology*, 321, 94–104.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.011>

[75] Wang, L., Yu, A., Li, E., Shen, H., & Zhou, Z. (2021). Effects of spreader geometry on powder spreading process in powder bed additive manufacturing. *Powder Technology*, 384, 211–222.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.022>

[76] Budding, A., & Vaneker, T. H. (2013). New strategies for powder compaction in powder-based rapid prototyping techniques. *Procedia CIRP*, 6, 527–532.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.100>

[77] Jacob, G., Brown, C. U., & Dönmez, A. (2018). The influence of spreading metal powders with different particle size distributions on the powder bed density in laser-based powder bed fusion processes.

<https://doi.org/10.6028/nist.ams.100-17>

[78] Mertens, R., Dadbakhsh, S., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. (2018). Application of base plate preheating during selective laser melting. *Procedia CIRP*, 74, 5–11.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.002>

[79] Mertens, R., Vrancken, B., Holmstock, N., Kinds, Y., Kruth, J., & Van Humbeeck, J. (2016). Influence of powder bed preheating on microstructure and mechanical properties of H13 tool steel SLM parts. *Physics Procedia*, 83, 882–890.

<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.092>

[80] Casati, R., Nasab, M. H., Coduri, M., Tirelli, V., & Vedani, M. (2018). Effects of platform Pre-Heating and Thermal-Treatment strategies on properties of ALSi10MG alloy processed by selective laser melting. *Metals (Basel)*, 8(11), 954.

<https://doi.org/10.3390/met8110954>

[81] Van Den Eynde, M., Verbelen, L., & Van Puyvelde, P. (2017). Influence of temperature on the flowability of polymer powders in laser sintering. *AIP Conference Proceedings*.

<https://doi.org/10.1063/1.5016796>

[82] Lefebvre, L. P., Whiting, J. G., Nijikovsky, B., Brika, S. E., Fayazfar, H., & Lyckfeldt, O. (2020). Assessing the robustness of powder rheology and permeability measurements. *Additive Manufacturing*, 35, 101203.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101203>

[83] Hesse, N., Dechet, M. A., Bonilla, J. S. G., Lübbert, C., Roth, S., Bück, A., Schmidt, J., & Peukert, W. (2019). Analysis of Tribo-Charging during Powder Spreading in Selective Laser Sintering: Assessment of Polyamide 12 Powder Ageing Effects on Charging Behavior. *Polymers*, 11(4), 609.

<https://doi.org/10.3390/polym11040609>

[84] Grossin, D., Montón, A., Navarrete-Segado, P., Özmen, E., Urruth, G., Maury, F., Maury, D., Francès, C., Tourbin, M., Lenormand, P., & Bertrand, G. (2021). A review of additive manufacturing of ceramics by powder bed selective laser processing (sintering / melting): Calcium phosphate, silicon carbide, zirconia, alumina, and their composites. *Open Ceramics*, 5, 100073.

<https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100073>

[85] Shanjani, Y., & Toyserkani, E. (2008). Material Spreading and Compaction in Powder-Based Solid Freeform Fabrication Methods: Mathematical Modeling.

[https://www.semanticscholar.org/paper/Material-Spreading-And-Compaction-In-Powder-Based-:-Shanjani Toyserkani/98cbd586ba48a7f92af0c1bf7e6be1118d2c30dd](https://www.semanticscholar.org/paper/Material-Spreading-And-Compaction-In-Powder-Based-:-Shanjani-Toyserkani/98cbd586ba48a7f92af0c1bf7e6be1118d2c30dd)

[86] Penny, R. W., Praegla, P. M., Ochsenius, M. A., Oropeza, D., Weißbach, R., Meier, C., Wall, W. A., & Hart, A. J. (2021). Spatial mapping of powder layer density for metal additive manufacturing via transmission X-ray imaging. *Additive Manufacturing*, 46, 102197.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102197>

[87] Pasalopoulos, S., Avrampos, P., & Vosniakos, G. (2020). Surface quality evaluation of non-sintered powder layers in Selective Laser Sintering by 3D scanning. *Procedia Manufacturing*, 51, 748–754.

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.105>

[88] Lin, W., Gonçalves, D. A., De Souza Pinto Pereira, A., Pereira, M., & Weingaertner, W. L. (2019). Quality analysis method for powder deposited layers applicable to selective laser sintering and selective laser melting processes. *Journal of Laser Applications*, 31(2).

<https://doi.org/10.2351/1.5096144>

[89] Beitz, S., Uerlich, R., Bokelmann, T., Diener, A. C., Vietor, T., & Kwade, A. (2019). Influence of powder deposition on powder bed and specimen properties. *Materials (Basel)*, 12(2), 297.

<https://doi.org/10.3390/ma12020297>

[90] Ali, U., Mahmoodkhani, Y., Shahabad, S. I., Esmailizadeh, R., Liravi, F., Sheydaeian, E., Huang, K., Marzbanrad, E., Vlasea, M., & Toyserkani, E. (2018). On the measurement of relative powder-bed compaction density in powder-bed additive manufacturing processes. *Materials & Design*, 155, 495–501.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.030>

[91] Choi, J. N., Shin, G., Lee, H. S., Yang, D., Yang, S., Lee, C., Brochu, M., & Yu, J. (2017). Evaluation of powder layer density for the selective laser melting (SLM) process. *Materials Transactions*, 58(2), 294–297.

<https://doi.org/10.2320/matertrans.m2016364>

[92] Le, T., Wang, X., Davidson, K., Fronda, J. E., & Seita, M. (2021). Experimental analysis of powder layer quality as a function of feedstock and recoating strategies. *Additive Manufacturing (Online)*, 39, 101890.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101890>

[93] Tan, P., Shen, F., Tey, W. S., & Zhou, K. (2021). A numerical study on the packing quality of fibre/polymer composite powder for powder bed fusion additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping (Print)*, 16(sup1), S1–S18.

<https://doi.org/10.1080/17452759.2021.1922965>

- [94] Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>
- [95] Leicht, A., Fischer, M., Klement, U., Nyborg, L., & Hryha, E. (2020). Increasing the Productivity of Laser Powder Bed Fusion for Stainless Steel 316L through Increased Layer Thickness. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(1), 575–584. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05334-3>
- [96] Spierings, A. B., Herres, N., & Levy, G. (2011). Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(3), 195–202. <https://doi.org/10.1108/13552541111124770>
- [97] Ziri, S., Hor, A., & Mabru, C. (2021). Effect of powder size and processing parameters on surface, density and mechanical properties of 316L elaborated by Laser Powder Bed Fusion. *ESAFORM 2021*. <https://doi.org/10.25518/esaform21.1563>
- [98] Balbaa, M., Ghasemi, A., Fereiduni, E., Elbestawi, M., Jadhav, S. D., & Kruth, J. (2021). Role of powder particle size on laser powder bed fusion processability of AlSi10mg alloy. *Additive Manufacturing (Online)*, 37, 101630. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101630>
- [99] Nadiyadi, H., Gajera, H., Bidajwala, R., Abhisek, K., & Dave, K. (2021). Effects of powder bed fusion process parameters on hardness for Inconel 718. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2275–2280. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.388>
- [100] Brika, S. E., Letenneur, M., Dion, C. A., & Braïlovski, V. (2020). Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser powder bed fusion manufacturability of Ti-6Al-4V alloy. *Additive Manufacturing (Online)*, 31, 100929. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100929>

[101] Liu, L., Wu, Z., & Yu, Y. (2023). A branch-and-price algorithm to perform single-machine scheduling for additive manufacturing. *Journal of Management Science and Engineering*, 8(2), 273–286.

<https://doi.org/10.1016/j.jmse.2022.10.001>

[102] Ying, K., Fruggiero, F., Pourhejazy, P., & Lee, B. (2022). Adjusted Iterated Greedy for the optimization of additive manufacturing scheduling problems. *Expert Systems With Applications*, 198, 116908.

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116908>

[103] Li, X., & Zhang, K. (2018). Single batch processing machine scheduling with two-dimensional bin packing constraints. *International Journal of Production Economics*, 196, 113–121.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.11.015>

[104] <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/3d-systems-spro-230-hs/>

[105] Egeblad, J., & Pisinger, D. (2009). Heuristic approaches for the two- and three-dimensional knapsack packing problem. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1026–1049.

<https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.004>