



POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale
In Ingegneria della Produzione Industriale e dell'Innovazione
Tecnologica

**Sostenibilità nei sistemi di produzione innovativi:
analisi tecnico-economica e ottimizzazione di una
turbina tramite Fabbricazione Additiva**

Relatore:
Prof. Abdollah Saboori

Candidato:
Edoardo Potenza
Matricola: 347848

Anno Accademico 2025-2026

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi affronta il tema della sostenibilità nei sistemi di produzione innovativi, analizzando in chiave tecnico-economica il contributo della Fabbricazione Additiva (Additive Manufacturing, AM) alla transizione verso modelli industriali più efficienti e a basso impatto ambientale. Dopo un inquadramento del paradigma dell'Industria 4.0 e 5.0 e una rassegna delle principali tecnologie e materiali per l'AM, il lavoro approfondisce in che modo la produzione additiva consenta una riduzione degli sprechi di materiale, una semplificazione della catena logistica e un consolidamento delle parti rispetto ai processi tradizionali. Il nucleo applicativo della tesi consiste nel redesign in ottica Design for Additive Manufacturing (DfAM) di uno stadio di turbina, di cui vengono analizzate le specifiche funzionali, il processo produttivo convenzionale e le relative inefficienze, la riprogettazione e la simulazione del processo produttivo con relativa selezione del materiale. Il caso studio è infine valutato attraverso un'analisi dei costi e dei benefici e una valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA), volte a quantificare i vantaggi economici e ambientali della soluzione proposta rispetto alla configurazione tradizionale. I risultati ottenuti evidenziano come la sostenibilità ambientale e la convenienza economica possano convergere, rendendo la fabbricazione additiva una leva strategica per l'innovazione nel settore energetico.

Parole chiave: Fabbricazione Additiva, sostenibilità, Industria 4.0/5.0, Design for Additive Manufacturing (DfAM), turbina, Life Cycle Assessment (LCA), analisi tecnico-economica.

ABSTRACT (ENGLISH)

This thesis addresses sustainability in innovative production systems, analysing from a technical-economic perspective the contribution of Additive Manufacturing (AM) to the transition towards more efficient, low-impact industrial models. After framing the Industry 4.0/5.0 paradigm and reviewing the main AM technologies and materials, the work investigates how additive production enables material waste reduction, supply-chain simplification and part consolidation compared to conventional processes. The applicative core of the thesis is the redesign, following a Design for Additive Manufacturing (DfAM) approach, of a turbine stage: its functional specifications, the conventional manufacturing process and its inefficiencies, the redesign itself, and the simulation of the production process together with material selection are analysed. The case study is finally assessed through a cost-benefit analysis and a Life Cycle Assessment (LCA), aimed at quantifying the economic and environmental advantages of the proposed solution compared with the traditional configuration. The results show how environmental sustainability and economic viability can converge, making additive manufacturing a strategic lever for innovation in the energy sector.

Keywords: Additive Manufacturing, sustainability, Industry 4.0/5.0, Design for Additive Manufacturing (DfAM), turbine, Life Cycle Assessment (LCA), techno-economic analysis.

INDICE

ABSTRACT	2
ABSTRACT (ENGLISH)	3
INDICE FIGURE	6
INDICE TABELLE	7
GLOSSARY	8
INTRODUZIONE	10
IL CASO STUDIO: LA TURBINA COME FRONTIERA DELLA PROGETTAZIONE AVANZATA	11
PERCORSO METODOLOGICO E ARCHITETTURA DELLA TRATTAZIONE	12
CAPITOLO 1: IL PARADIGMA DI INDUSTRIA 4.0 E LA PRODUZIONE SOSTENIBILE	14
1.1 EVOLUZIONE DEI SISTEMI PRODUTTIVI DALL'AUTOMAZIONE AL DIGITALE	14
1.2 I PILASTRI DELL'INDUSTRIA 4.0 E L'INTEGRAZIONE DEI SISTEMI CYBER-FISICI	18
1.3 TRANSIZIONE VERSO INDUSTRIA 5.0 E FOCUS SULLA SOSTENIBILITÀ ENERGETICA	21
1.4 LA MANIFATTURA ADDITIVA COME TECNOLOGIA ABILITANTE PER LA GREEN FACTORY	23
CAPITOLO 2: TECNOLOGIE E MATERIALI PER LA FABBRICAZIONE ADDITIVA	26
2.1 ANALISI COMPARATIVA DEI PROCESSI ADDITIVI METALLICI INDUSTRIALI	26
2.2 CARATTERIZZAZIONE MICROSTRUTTURALE DELLE SUPERLEGHE BASE NICHEL	29
2.3 VINCOLI PROGETTUALI E LIMITI GEOMETRICI DELLE LAVORAZIONI CLASSICHE	31
CAPITOLO 3: LA SOSTENIBILITÀ NELL' ADDITIVE MANUFACTURING	35
3.1 EFFICIENZA DELLE RISORSE E STRATEGIE DI RIDUZIONE DEGLI SFRIDI	35
3.2 SOSTENIBILITÀ DEL SISTEMA: PRODUZIONE ON-DEMAND E LOGISTICA SNELLA	37
3.3 CONSOLIDAMENTO DELLE PARTI E RIDUZIONE DEI PROCESSI DI ASSEMBLAGGIO	39
3.4 ANALISI DEI PUNTI CRITICI E INCREMENTO DELLA RESISTENZA STRUTTURALE	40
CAPITOLO 4: SINERGIA TRA DFAM E PERFORMANCE TERMOMECCANICHE	43
4.1 SPECIFICHE FUNZIONALI E REQUISITI TERMOMECCANICI DELLO STADIO	43
4.2 CONFIGURAZIONE METODOLOGICA E VINCOLI STRUTTURALI DEL CASO STUDIO	45
4.3 ANALISI DEL PROCESSO DI FABBRICAZIONE CONVENZIONALE E INEFFICIENZE	48
4.4 RIPROGETTAZIONE IN OTTICA DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING (DFAM)	52
4.5 SIMULAZIONE FEM DEI GRADIENTI TERMICI E DELLE TENSIONI RESIDUE	54
CAPITOLO 5: VALUTAZIONE ECONOMICA E AMBIENTALE LCA	58
5.1 MODELLAZIONE DEI COSTI E DELL'EFFICIENZA MATERICA INIZIALE	58

5.2 FRAMEWORK QUANTITATIVO DELL'ANALISI DI SOSTENIBILITÀ E LIFE CYCLE ASSESSMENT	61
5.3 ANALISI DEI GUADAGNI E VALORIZZAZIONE DELLE PERFORMANCE OPERATIVE	64
5.4 BILANCIO DI SOSTENIBILITÀ E OTTIMIZZAZIONE DEL RAPPORTO BUY-TO-FLY	67
CONCLUSIONI.....	72
1. SINTESI DEI RISULTATI E PERFORMANCE DELLA TURBINA.....	72
2. SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE E FATTIBILITÀ ECONOMICA	74
3. CONSIDERAZIONI SUL FUTURO DELLA FABBRICAZIONE ADDITIVA NEL SETTORE ENERGETICO..	75
4. VERSO UN MERCATO "GREEN-BY-DESIGN"	77
BIBLIOGRAFIA.....	78
RINGRAZIAMENTI.....	81

INDICE FIGURE

FIGURA 1.1- EVOLUZIONE DEI PARADIGMI INDUSTRIALI DALLA MECCANIZZAZIONE (1.0) ALLA SOSTENIBILITÀ UMANOCENTRICA (5.0)	16
FIGURA 1.2 - VOLUMI E VARIETÀ PRODUTTIVA: MANIFATTURA TRADIZIONALE VS AM.	17
FIGURA 1.3 - ARCHITETTURA FUNZIONALE E LOOP DI FEEDBACK DI UN SISTEMA CPS.....	19
FIGURA 2.1 - REGIMI DI FUSIONE LASER: CONDUZIONE STABILE VS KEYHOLE INSTABILE.....	27
FIGURA 2.2 - SCHEMA DEL PROCESSO LASER POWDER BED FUSION (L-PBF)	28
FIGURA 2.3 - OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DI UN BRACCETTO DI SOSPENSIONE	32
FIGURA 3.1 - ANALISI DEL BUY-TO-FLY (BTF): MANIFATTURA CNC VS L-PBF	35
FIGURA 3.2 - MICROSTRUTTURA E DIFETTI: FONDERIA TRADIZIONALE VS L- PBF.....	41
FIGURA 4.1 - WORKFLOW E INEFFICIENZE DELLA MANIFATTURA CONVENZIONALE.....	49
FIGURA 4.2 - CONFRONTO TRA DESIGN PER FONDERIA E REDESIGN DFAM	52
FIGURA 4.3 - ANALISI FEA DEI GRADIENTI TERMICI E DELLE TENSIONI RESIDUE.....	55
FIGURA 5.1 - CURVA DI BREAK-EVEN: COSTO UNITARIO VS COMPLESSITÀ GEOMETRICA.....	58
FIGURA 5.2 - ANALISI LCC ED EFFETTI DELL'OTTIMIZZAZIONE DELLA TURBINA	65
FIGURA 5.3 - BILANCIO MATERICO ED EFFICIENZA DEL RAPPORTO BUY-TO- FLY	68

INDICE TABELLE

TABELLA 4.1 -MATRICE DEI PARAMETRI TECNOLOGICI, VINCOLI OPERATIVI E IPOTESI DI SIMULAZIONE PER IL PROCESSO L-PBF.	45
<i>TABELLA 5.1 - PARAMETRI DI INPUT PER I MODELLI LCA/LCC E INTERVALLI DELLA MATRICE DI SENSITIVITA.</i>	<i>61</i>

GLOSSARY

Acronimo	Significato esteso (Lingua Italiana / Lingua Inglese)	Ambito applicativo nel testo
AM	Additive Manufacturing (Manifattura Additiva)	Tecnologia di produzione generale
BTF	Buy-to-Fly (Rapporto tra massa grezza e finale)	Efficienza materica e analisi dei costi
CAD	Computer-Aided Design (Progettazione Assistita dall'Elaboratore)	Modellazione geometrica tridimensionale
CNC	Computer Numerical Control (Controllo Numerico Computatizzato)	Lavorazioni meccaniche di post-processing
CPS	Cyber-Physical Systems (Sistemi Ciberfisici)	Architetture e pilastri di Industria 4.0 / 5.0
DfAM	Design for Additive Manufacturing	Criteri e regole di progettazione additiva
EOS	Electro Optical Systems	Produttore del sistema industriale L-PBF (M290)
FCC	Face-Centered Cubic (Cubica a Facce Centrate)	Struttura cristallina della matrice dell'Inconel 718
FEA	Finite Element Analysis (Analisi agli Elementi Finiti)	Simulazione termo-strutturale computazionale
HCF	High Cycle Fatigue (Fatica ad Alto Numero di Cicli)	Validazione strutturale e vita utile delle pale
HIP	Hot Isostatic Pressing (Pressatura Isostatica a Caldo)	Trattamento termico di post-processing per porosità
ISO	International Organization for Standardization	Standard internazionali per l'analisi LCA
LCA	Life Cycle Assessment (Valutazione del Ciclo di Vita)	Analisi quantitativa dell'impatto ambientale

Acronimo	Significato esteso (Lingua Italiana / Lingua Inglese)	Ambito applicativo nel testo
LCC	Life Cycle Costing (Valutazione dei Costi del Ciclo di Vita)	Modellazione economica e Total Cost of Ownership
L-PBF	Laser Powder Bed Fusion (Fusione Laser a Letto di Polvere)	Processo specifico di manifattura additiva metallica
Ni-Cr-Fe	Nichel - Cromo - Ferro	Composizione chimica principale della superlega
RPM	Revolutions Per Minute (Giri al Minuto)	Regime rotazionale cinematico della turbina
TCO	Total Cost of Ownership (Costo Totale di Proprietà)	Analisi finanziaria estesa della fase d'uso
UF	Unità Funzionale	Base quantitativa di riferimento per lo studio LCA

INTRODUZIONE

Il settore industriale globale si trova oggi dinanzi a una sfida senza precedenti, definita spesso come la "doppia transizione" (*twin transition*): digitale ed ecologica. Da un lato, l'accelerazione impressa dalle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) ha reso i cicli di vita dei prodotti estremamente volatili, con una domanda di mercato che esige una personalizzazione di massa (*Mass Customization*) sempre più spinta; dall'altro, l'urgenza climatica, sancita dal Green Deal europeo e dagli obiettivi dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite, impone una drastica riduzione dell'impronta di carbonio e l'adozione di modelli di economia circolare. In questo scenario, il paradigma dell'Industria 4.0, che ha dominato l'ultimo decennio focalizzandosi sull'ottimizzazione dei processi e sull'integrazione dei sistemi Cyber-Fisici (CPS), sta evolvendo naturalmente verso una visione più olistica e resiliente: l'Industria 5.0. Se la quarta rivoluzione ha messo al centro la connessione, la quinta pone il benessere dell'uomo e la rigenerazione ambientale come fini ultimi del progresso tecnologico.

L'industria manifatturiera tradizionale, fondata su processi sottrattivi (fresatura, tornitura, rettifica) o formativi (fonderia, stampaggio, forgiatura), ha ormai raggiunto limiti fisici e concettuali difficilmente valicabili. Questi processi sono intrinsecamente legati a un elevato spreco di materia prima — quantificabile attraverso il parametro del *Buy-to-Fly ratio* [13], [14] e a rigidi vincoli progettuali (DFA/DFM) che costringono i progettisti a scendere a pesanti compromessi tra le performance teoriche del componente e la sua effettiva fattibilità produttiva. La necessità di strumenti di taglio, l'accessibilità degli utensili e le esigenze di sforno negli stampi limitano la libertà geometrica, impedendo la creazione di forme organiche o canali interni ottimizzati.

È in questo solco critico che si inserisce la Fabbricazione Additiva (Additive Manufacturing - AM). L'AM non è più da intendersi come una mera tecnologia di nicchia per la prototipazione rapida, bensì come un pilastro fondamentale della cosiddetta "Green Manufacturing". Essa rappresenta una vera e propria rottura epistemologica rispetto al passato: se la manifattura convenzionale procede per "sottrazione" o "costrizione" della forma, l'AM procede per "addizione" selettiva, depositando materiale, sia esso polimerico o metallico, strato su strato solo dove la funzione meccanica e strutturale lo richiede.

Questa capacità di controllo micrometrico sulla distribuzione della materia abilita il concetto di "Complexity for Free"[1], [11]: il paradosso tecnologico secondo cui il costo di produzione non è più funzione della complessità geometrica, ma del solo volume di materiale depositato e del tempo di occupazione della macchina. Tale caratteristica scardina i modelli di costo tradizionali e apre le porte a innovazioni radicali in settori ad altissima intensità tecnologica, come quello energetico (turbine e scambiatori di calore) e aerospaziale, dove l'ottimizzazione del peso e l'efficienza termica sono requisiti vitali. L'AM consente di produrre componenti con geometrie bioniche, strutture a reticolo (*lattice*) e canali di raffreddamento conformati, permettendo prestazioni che fino a pochi anni fa erano considerate puramente teoriche o irrealizzabili.

Il caso studio: la turbina come frontiera della progettazione avanzata

Il nucleo centrale della presente trattazione si focalizza sulla riprogettazione e sull'ottimizzazione di un componente caratterizzato da un'elevatissima criticità operativa: la turbina. Tale elemento è stato individuato come il caso studio ideale in quanto incarna perfettamente le inefficienze intrinseche e i limiti geometrici della manifattura convenzionale. Storicamente realizzate attraverso processi di microfusione a cera persa o complesse lavorazioni per asportazione di truciolo dal pieno, le turbine presentano canali di raffreddamento interni la cui morfologia è severamente limitata dalle capacità di foratura delle macchine utensili o dalla stabilità delle anime ceramiche. Questi vincoli progettuali, che impongono geometrie semplificate e spesso esclusivamente rettilinee, si traducono inevitabilmente in una gestione termica sub-ottimale del componente, determinando una minore efficienza termodinamica globale e una drastica riduzione della vita utile a causa dell'insorgenza di stress meccanici e termici non uniformi, che accelerano i fenomeni di fatica e scorrimento viscoso.

La motivazione primaria che sottende questo studio risiede dunque nella necessità impellente di quantificare con rigore scientifico i benefici derivanti dalla transizione verso i paradigmi dell'Additive Manufacturing. Non è più sufficiente, nel moderno contesto industriale, limitarsi ad asserire la superiorità della stampa 3D su basi puramente qualitative; emerge invece l'esigenza di dimostrare, attraverso simulazioni multifisiche avanzate e accurate analisi dei costi di ciclo di vita, come l'adozione di soluzioni ingegneristiche innovative quali il *lightweighting* e l'integrazione di sistemi di

raffreddamento conformati (*conformal cooling*) possa generare un valore aggiunto concreto.

Nello specifico, la capacità di progettare canali che seguono fedelmente la curvatura aerodinamica delle pale della turbina permette di massimizzare lo scambio termico e di operare a temperature di ingresso del fluido più elevate, migliorando sensibilmente il rendimento della macchina. L'obiettivo della ricerca è quindi quello di verificare se questo incremento delle performance operative, unitamente alla riduzione delle masse inerziali garantita dall'ottimizzazione topologica, sia in grado di produrre un beneficio economico e ambientale di portata tale da giustificare ampiamente il maggior costo unitario del processo additivo rispetto alle tecnologie tradizionali, spostando il focus dal semplice costo di produzione al valore generato lungo l'intero orizzonte temporale di utilizzo del componente.

Percorso metodologico e architettura della trattazione

Il presente elaborato si articola attraverso un percorso metodologico rigoroso che mira a connettere le premesse della teoria macroeconomica con le evidenze della pratica ingegneristica avanzata. La narrazione si sviluppa partendo da un'analisi di ampio respiro nel primo capitolo, dedicato all'evoluzione storica dei modelli produttivi. In questa sede, viene tracciata la linea di demarcazione tra la rigidità dell'automazione meccanica novecentesca e la flessibilità intrinseca dei moderni sistemi Cyber-Fisici, esplorando come il concetto di sostenibilità sia progressivamente mutato da un onere normativo a un fondamentale vantaggio competitivo nel quadro dell'Industria 5.0. Tale transizione non è interpretata solo come un avanzamento tecnico, ma come un riposizionamento strategico dell'intero comparto manifatturiero verso una resilienza che pone l'impatto sociale e ambientale al centro del processo di creazione del valore.

Definito il contesto di riferimento, la trattazione prosegue nel secondo capitolo con un approfondimento tecnico sulle tecnologie abilitanti che rendono possibile tale visione. L'analisi si sofferma sulla varietà dei processi di Additive Manufacturing, con un focus specialistico sulla fusione a letto di polvere (*Powder Bed Fusion*) e sulla deposizione diretta di energia (*Direct Energy Deposition*), mettendole in relazione con la scienza dei materiali applicata. La discussione spazia dai polimeri ingegneristici alle superleghe

metalliche ad alte prestazioni, come l'Inconel e le leghe di titanio, evidenziando come la reciproca influenza tra processo e materiale permetta di superare i limiti storici della manifattura tradizionale. Il terzo capitolo funge da ponte concettuale verso la sostenibilità sistemica, esaminando l'impatto della fabbricazione additiva sulla catena di fornitura globale. Viene analizzato come la produzione *on-demand* e il magazzino digitale possano eradicare le inefficienze logistiche, mentre il consolidamento delle parti viene presentato come una soluzione radicale per ridurre le operazioni di assemblaggio e saldatura, fonti primarie di eterogeneità strutturale e potenziali inneschi di cedimento.

Il cuore sperimentale del lavoro trova spazio nel quarto capitolo, dove i principi del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) vengono applicati al caso studio della turbina. Attraverso l'impiego di tecniche di ottimizzazione topologica, il componente viene riprogettato per massimizzare il rapporto rigidità-peso, confrontando sistematicamente le performance del design tradizionale con quelle del modello ottimizzato. I risultati delle simulazioni termomeccaniche e fluidodinamiche presentati in questa fase costituiscono la base tecnica necessaria per validare la superiorità del paradigma additivo in condizioni operative reali. Infine, il quinto capitolo chiude il cerchio analitico mediante una valutazione economica e ambientale dettagliata, condotta attraverso lo strumento del *Life Cycle Assessment* (LCA). In questa sezione conclusiva, si valuta se il risparmio energetico e l'incremento di efficienza ottenuti durante l'intera fase di esercizio del componente siano sufficienti a compensare l'energia incorporata nei processi di atomizzazione delle polveri e nei tempi di stampa. L'intero elaborato ambisce, in ultima analisi, a fornire una visione basata sui dati che confermi come la reale portata rivoluzionaria della manifattura additiva risieda nella capacità di generare asset industriali più leggeri, efficienti e intrinsecamente sostenibili per il futuro del pianeta.

CAPITOLO 1: IL PARADIGMA DI INDUSTRIA 4.0 E LA PRODUZIONE SOSTENIBILE

1.1 Evoluzione dei sistemi produttivi dall'automazione al digitale

L'evoluzione della manifattura globale può essere letta come una costante e incessante ricerca di equilibrio tra volumi produttivi, varietà dei prodotti e costi operativi unitari. Per comprendere appieno la portata della rivoluzione digitale attuale, è indispensabile analizzare il percorso storico e sociotecnico che ha portato l'industria dalla rigidità delle prime macchine a vapore alla flessibilità estrema dei sistemi interconnessi contemporanei. Questo percorso non è stato lineare, ma scandito da "salti di paradigma" che hanno ridefinito radicalmente il rapporto gerarchico e funzionale tra l'uomo, la macchina e la materia prima, spostando progressivamente il valore aggiunto dall'energia fisica all'informazione pura. La prima fase di questa evoluzione, convenzionalmente identificata con la Prima Rivoluzione Industriale, coincide con la meccanizzazione della produzione alimentata dall'energia idraulica e, successivamente, dal vapore. In questo stadio embrionale, l'automazione era di natura puramente meccanica e "rigida": le macchine erano progettate e costruite per eseguire un'unica operazione specifica e ripetitiva. Qualsiasi variazione nel design del prodotto o nel processo richiedeva interventi manuali estremamente complessi o, più frequentemente, la completa sostituzione degli apparati produttivi. Il focus ingegneristico era quasi esclusivamente orientato alla capacità di sostituire la forza muscolare umana con la potenza meccanica, dando il via a una de-localizzazione della produzione dalle botteghe artigiane alle prime grandi unità produttive tessili e metallurgiche. È in questo periodo che si pongono le basi per la standardizzazione dei componenti, sebbene la precisione rimanesse ancora vincolata alle tolleranze intrinseche dei meccanismi a biella e manovella.

Il vero punto di svolta verso la produzione di massa avviene tuttavia tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, con l'introduzione su larga scala dell'energia elettrica e l'avvento del Taylorismo e del Fordismo. Frederick Taylor introdusse i principi della gestione scientifica del lavoro (*Scientific Management*), frammentando i processi produttivi in compiti minimi, elementari e standardizzati, mentre Henry Ford implementò la catena di montaggio (*Assembly Line*). Questo modello di automazione, pur incrementando

esponenzialmente la produttività e abbattendo i costi unitari grazie alle economie di scala, esasperò il concetto di rigidità strutturale. Il sistema era ottimizzato per volumi massicci di prodotti identici, rendendo la fabbrica un organismo incapace di rispondere tempestivamente alle fluttuazioni della domanda o alle necessità di personalizzazione. La celebre massima di Ford, secondo cui ogni cliente poteva avere un'automobile di qualsiasi colore purché fosse nero, sintetizza perfettamente il limite invalicabile di un'automazione che non prevedeva, né poteva gestire tecnicamente, la complessità e la variabilità. In questo scenario, l'efficienza era inversamente proporzionale alla flessibilità.

A partire dagli anni '70, la Terza Rivoluzione Industriale ha introdotto l'elettronica e l'informatica all'interno delle linee operative, segnando il passaggio dall'automazione rigida a quella programmabile. È in questo periodo che fanno la loro comparsa i Controllori Logici Programmabili (PLC) e i primi robot industriali antropomorfi. L'automazione cessa di essere una mera questione di camme e ingranaggi per diventare una questione di software. Questo passaggio ha permesso di gestire una maggiore varietà di prodotti sulla stessa linea produttiva, riducendo i tempi di riattrezzaggio (*set-up times*). Tuttavia, nonostante l'introduzione del controllo elettronico, i sistemi rimanevano ancora isolati tra loro, operando in quelle che la letteratura definisce "isole di automazione". La comunicazione tra i diversi asset della fabbrica, così come l'integrazione tra i dati di officina e i sistemi decisionali dell'ufficio tecnico, era ancora estremamente limitata e frammentata, impedendo una visione olistica del processo produttivo.

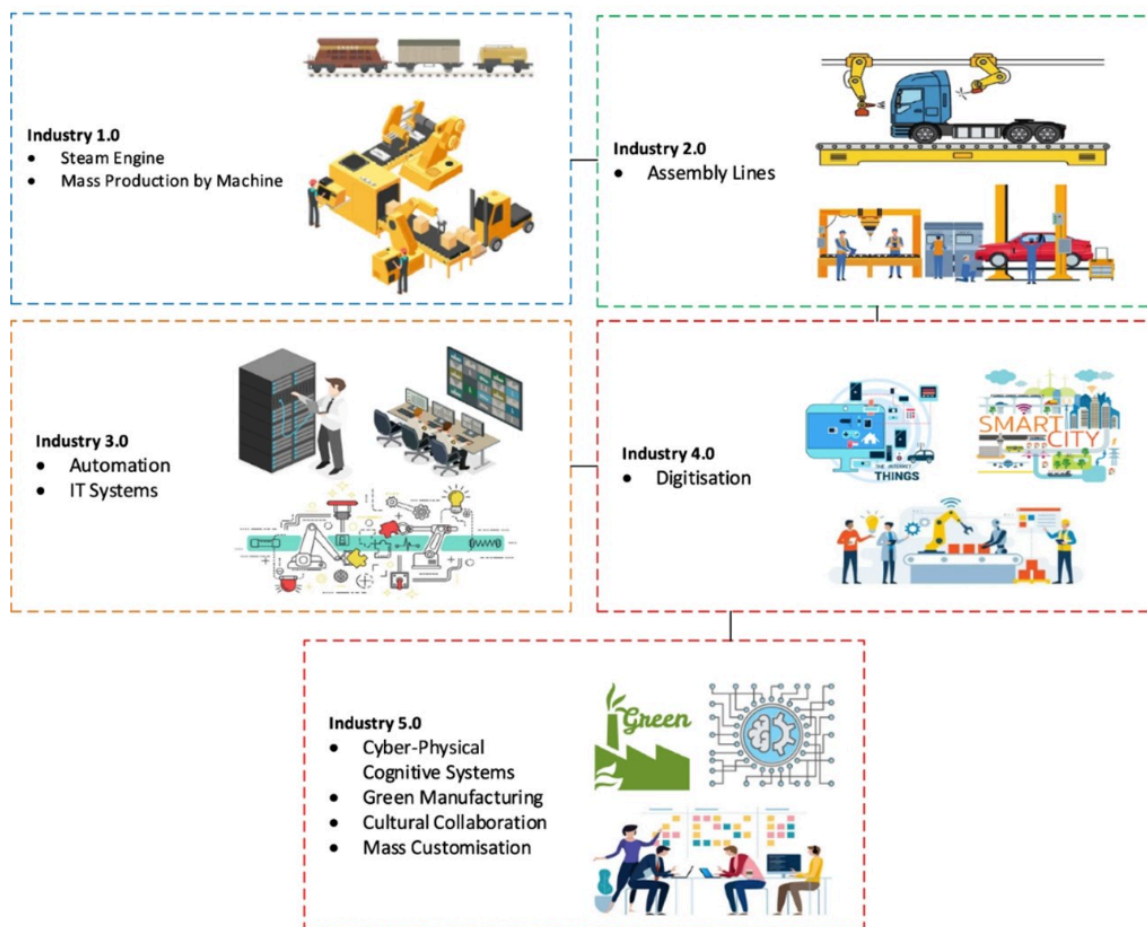


Figura 1.1- Evoluzione dei paradigmi industriali da Industria 1.0 a 5.0

Il passaggio cruciale verso il controllo digitalizzato e integrato che caratterizza l'Industria 4.0 risiede nel superamento definitivo di questi silos informativi. Tale progressione, schematizzata nella Figura 1 attraverso le diverse fasi della storia industriale, dimostra come il controllo digitalizzato non si limiti più alla gestione locale della singola macchina tramite un software dedicato, ma evolva verso una rete neurale di sensori e attuatori capaci di generare, scambiare e analizzare dati in tempo reale. L'analisi dell'evoluzione rappresentata nella Figura 1.1 permette di comprendere come, in questo nuovo scenario, la digitalizzazione agisca come il tessuto connettivo che lega ogni singola fase della catena del valore: dalla progettazione assistita dal computer (CAD) alla simulazione e produzione (CAM), fino alla logistica predittiva e all'analisi delle performance sul campo tramite l'Internet delle Cose (IoT). La fabbrica diventa un "sistema di sistemi", dove l'intelligenza distribuita permette di realizzare la cosiddetta *Mass Customization*: la

capacità di produrre beni altamente personalizzati con l'efficienza e i costi tipici della produzione di massa.

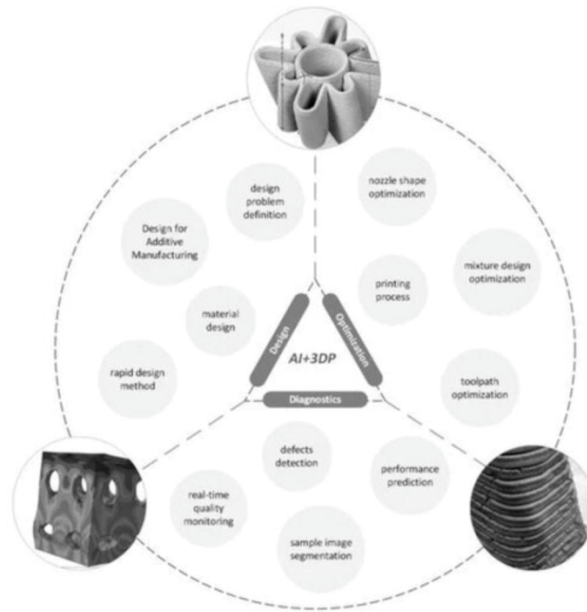


Figura 1.2 - Volumi e varietà produttiva: manifattura tradizionale vs AM

L'evoluzione dal controllo meccanico a quello digitale, chiaramente riassunta nella linea temporale della Figura 1.1 e analizzata sotto il profilo della flessibilità economica nella Figura 1.2, ha dunque trasformato la natura stessa della competizione industriale. Come evidenziato dal confronto tra i modelli produttivi nella Figura 1.2, se nel secolo scorso il vantaggio competitivo risiedeva esclusivamente nel possesso di grandi macchinari fisici e nella capacità di saturare le linee con prodotti standardizzati, oggi esso risiede nella capacità di orchestrare flussi informativi complessi e nell'agilità di riconfigurare i sistemi produttivi in tempo reale senza penalità economiche legate alla varietà del mix.

Questa metamorfosi, che vede l'abbattimento delle barriere legate alle economie di scala tradizionali in favore di una produzione personalizzata e sostenibile, pone le basi per l'integrazione dei sistemi Cyber-Fisici. In questo scenario, la distinzione tra componente fisico e modello digitale svanisce definitivamente, permettendo una gestione della materia che non è più solo automatizzata secondo schemi rigidi, ma intrinsecamente

intelligente, adattiva e capace di rispondere istantaneamente alle sfide di un mercato globale in costante mutamento.

1.2 I pilastri dell'Industria 4.0 e l'integrazione dei sistemi Cyber-Fisici

L'architettura dell'Industria 4.0 non può essere ridotta a una semplice somma di nuove macchine più veloci o precise; essa si configura come un ecosistema complesso di tecnologie abilitanti che convergono per trasformare la fabbrica da un insieme di asset isolati in un organismo vivente, intelligente e reattivo. Il nucleo concettuale di questa trasformazione è rappresentato dai Cyber-Physical Systems (CPS) [5], [18]. Si tratta di integrazioni profonde tra processi fisici, computazione e connettività di rete. In un sistema CPS, la componente fisica, costituita da sensori, attuatori e bracci robotici, e la componente digitale, formata da algoritmi e modelli di controllo, sono così strettamente intrecciate che l'una non può operare senza l'altra. A differenza della vecchia automazione, dove il software era un mero esecutore di comandi preimpostati, nei CPS il software sente il mondo fisico in tempo reale, ne elabora le variazioni e interviene attivamente per ottimizzare il comportamento del sistema, creando un ciclo di feedback continuo e autonomo.

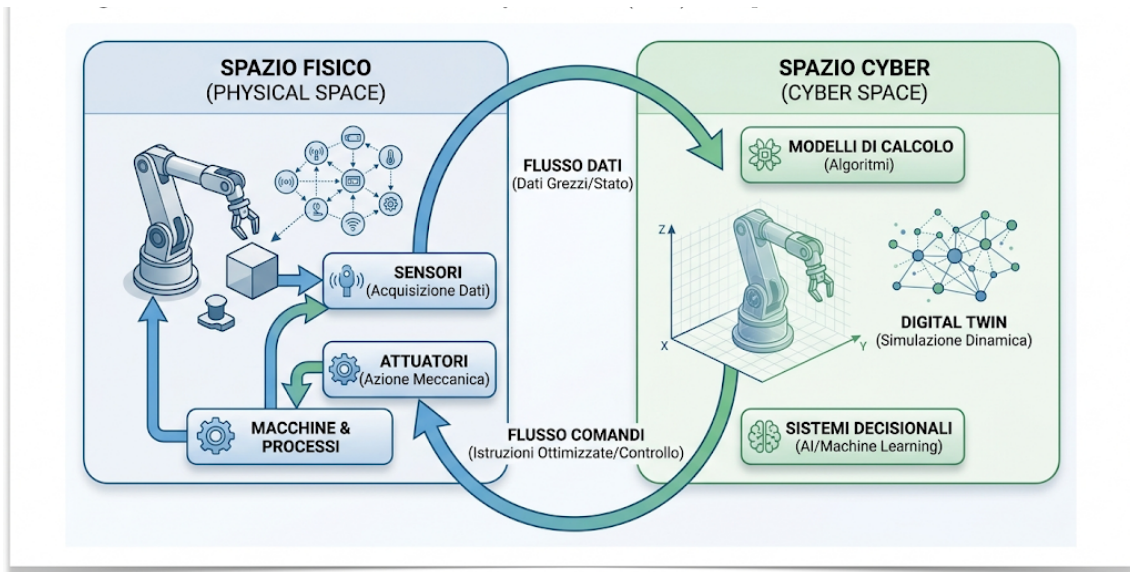


Figura 1.3 - Architettura funzionale e loop di feedback di un sistema CPS

Questa interazione costante permette di superare la natura statica della produzione tradizionale, introducendo una dinamicità in cui la macchina non si limita a eseguire un compito, ma comprende lo stato dell'ambiente circostante e adatta i propri parametri operativi per garantire la massima efficienza e qualità.

L'integrazione dei CPS permette la creazione di un ponte bidirezionale permanente tra l'officina reale e l'ambiente virtuale. Attraverso una rete capillare di sensori IoT, ogni asset produttivo, dalla macchina utensile a controllo numerico fino alla singola materia prima dotata di tag RFID, è in grado di trasmettere dati relativi al proprio stato di salute, alla posizione spaziale, alle temperature di esercizio e ai parametri vibrazionali. Questi flussi informativi alimentano il cosiddetto Digital Twin. Il Digital Twin non è una semplice rappresentazione grafica tridimensionale, ma un modello matematico e fisico dinamico che evolve in parallelo all'oggetto reale, riflettendone fedelmente il comportamento nel tempo. Questa tecnologia permette di testare scenari predittivi complessi senza alcun rischio per la produzione fisica. È possibile simulare l'aumento della velocità di una linea produttiva o il cambio di un materiale nel processo di stampa 3D nel mondo virtuale, osservarne le conseguenze strutturali e termiche e applicare le correzioni solo quando il risultato è matematicamente ottimizzato. Questo riduce drasticamente i tempi di fermo macchina e i costi legati alla sperimentazione fisica,

portando l'efficienza a livelli precedentemente impensabili e permettendo una gestione proattiva dell'intero ciclo di vita del prodotto.

Per sostenere questa complessa infrastruttura cyber-fisica, l'Industria 4.0 poggia su una serie di pilastri tecnologici che devono operare in perfetta simbiosi. Il primo di questi è l'Industrial Internet of Things (IIoT), che funge da sistema nervoso centrale della fabbrica intelligente. L'IIoT abbatte definitivamente la tradizionale Piramide di automazione, codificata nello standard ISA-95, che prevedeva una separazione netta e gerarchica tra i sensori di campo, i sistemi di controllo PLC, i sistemi di esecuzione della produzione e i software gestionali di alto livello. In una fabbrica 4.0, il dato fluisce orizzontalmente e verticalmente senza barriere architettoniche, permettendo a un ordine d'acquisto inserito nel sistema gestionale di influenzare istantaneamente il setup di una macchina in officina attraverso protocolli di comunicazione standardizzati come l'OPC-UA o l'MQTT. Questa connettività totale genera però una mole di dati talmente vasta da risultare ingestibile per i metodi di analisi statistica tradizionali. Qui interviene il secondo pilastro fondamentale: i Big Data Analytics uniti all'Intelligenza Artificiale. Algoritmi avanzati di Machine Learning e Deep Learning sono in grado di analizzare migliaia di segnali al secondo per identificare pattern invisibili all'occhio umano, abilitando la manutenzione predittiva. Una macchina non viene più fermata perché è passato un certo lasso di tempo, ma perché il sistema ha rilevato una micro-variazione nel consumo elettrico o nella frequenza di vibrazione che precede statisticamente un guasto imminente, minimizzando gli sprechi materici e massimizzando la disponibilità operativa degli impianti.

Un altro pilastro essenziale che permette la scalabilità e la flessibilità di questi sistemi è l'integrazione del Cloud e dell'Edge Computing. Mentre il Cloud fornisce la potenza di calcolo e lo storage necessari per l'analisi storica dei dati e la gestione della supply chain su scala globale, l'Edge Computing permette di elaborare i dati critici direttamente a bordo macchina, garantendo tempi di latenza nell'ordine dei millisecondi, necessari per il controllo di processi ad alta velocità come la fusione laser a letto di polvere. La sicurezza di questa rete è garantita dalla Cyber-Security industriale, che nell'era 4.0 non rappresenta più un'aggiunta opzionale ma un requisito strutturale imprescindibile. Poiché la fabbrica è interamente connessa e guidata dai dati, la protezione dell'integrità e della riservatezza del flusso informativo diventa la priorità assoluta per evitare sabotaggi industriali o la

sottrazione di proprietà intellettuale digitale. Infine, l'integrazione totale di questi pilastri abilita la Manifattura Additiva a diventare un nodo attivo e intelligente della rete CPS. In questa visione, la stampante 3D riceve istruzioni ottimizzate dai Big Data, è monitorata costantemente dal proprio Digital Twin e può adattare la deposizione del materiale in tempo reale in base ai feedback dei sensori, realizzando la visione di una produzione industriale che non è più solo automatizzata, ma capace di autodiagnosi, autoregolazione e costante auto-ottimizzazione energetica e funzionale.

1.3 Transizione verso Industria 5.0 e focus sulla sostenibilità energetica

Se l'Industria 4.0 ha avuto come obiettivo primario l'incremento dell'efficienza operativa attraverso la digitalizzazione spinta e l'interconnessione globale dei sistemi produttivi, l'emergere del paradigma dell'Industria 5.0 rappresenta una necessaria evoluzione che sposta il baricentro tecnologico verso una dimensione più etica, sistemica e rigenerativa. Questa transizione, formalizzata e promossa dalla Commissione Europea, non deve essere interpretata come una negazione dei progressi della quarta rivoluzione industriale, quanto piuttosto come una correzione di traiettoria indispensabile per garantire la sopravvivenza del tessuto industriale in un pianeta dalle risorse finite. L'Industria 5.0 integra tre concetti fondamentali che precedentemente erano spesso relegati al rango di esternalità o di costi accessori: l'umanocentrismo, la resilienza sistemica e la sostenibilità ambientale profonda. In questo nuovo quadro di riferimento, la fabbrica smette di essere considerata esclusivamente come una macchina finalizzata alla massimizzazione del profitto economico nel breve periodo, per trasformarsi in un attore sociale responsabile, capace di operare entro i limiti biofisici del pianeta e di generare un benessere tangibile per la comunità e il territorio in cui è inserita.

Il primo pilastro di questa transizione risiede nel superamento della visione puramente focalizzata sull'automazione integrale per approdare a una visione incentrata sull'uomo, universalmente nota come *Human-Centric Approach*. Mentre nel paradigma dell'Industria 4.0 il timore diffuso risiedeva nella potenziale sostituzione del lavoratore da parte della macchina e dell'intelligenza artificiale, l'Industria 5.0 promuove attivamente una collaborazione sinergica e armoniosa tra l'ingegno umano e la precisione robotica. In questo contesto, le tecnologie digitali vengono riprogettate non per escludere l'operatore, ma per adattarsi plasticamente alle sue esigenze fisiche, alle sue capacità

cognitive e alla sua salute a lungo termine. L'impiego della robotica collaborativa e lo sviluppo di esoscheletri intelligenti non servono a estromettere l'essere umano dalla linea produttiva, bensì a sollevarlo dai compiti più usuranti, ripetitivi e pericolosi, permettendogli di riappropriarsi di attività a più alto valore aggiunto. Tale approccio trasforma il ruolo del lavoratore in quello di supervisore creativo dei sistemi cyber-fisici, dove la risoluzione dei problemi e la flessibilità mentale diventano le competenze chiave. Questo cambio di rotta ha un impatto diretto e misurabile sulla sostenibilità sociale, riducendo drasticamente l'incidenza degli infortuni e delle malattie professionali e promuovendo una formazione continua che trasforma la fabbrica in un ecosistema di apprendimento permanente.

Il secondo pilastro, intrinsecamente legato alla sostenibilità ambientale, riguarda l'adozione sistematica dell'economia circolare supportata dal dato digitale. Nell'era dell'Industria 4.0, l'ottimizzazione era spesso circoscritta all'interno delle mura dello stabilimento, focalizzandosi sul risparmio energetico dei singoli macchinari o sulla riduzione dei tempi di ciclo. L'Industria 5.0 estende invece questa logica all'intero ciclo di vita del prodotto, dalla culla alla tomba, o meglio, dalla culla alla culla. La produzione sostenibile richiede che ogni singola fase del processo sia progettata a monte per minimizzare il prelievo di risorse vergini e azzerare la produzione di scarti non recuperabili. La digitalizzazione diventa quindi lo strumento abilitante fondamentale per implementare il cosiddetto *Digital Product Passport*, un registro digitale che traccia l'intera storia di ogni componente, permettendo una gestione intelligente del fine vita. La capacità dei sistemi di dialogare lungo tutta la filiera permette di implementare modelli di business basati sul recupero, sul riciclo molecolare e sulla rigenerazione funzionale, riducendo le emissioni di gas climalteranti e la pressione estrattiva sugli ecosistemi naturali. In questa prospettiva, la tecnologia non è più finalizzata a produrre volumi sempre maggiori con meno risorse, ma a garantire la rigenerazione delle risorse stesse, allineando i ritmi industriali ai cicli biologici della biosfera.

Un ulteriore elemento distintivo e vitale dell'Industria 5.0 è rappresentato dalla resilienza, intesa come la capacità del sistema produttivo di adattarsi, resistere e reagire prontamente a shock esterni imprevedibili. In un mondo caratterizzato da una crescente instabilità geopolitica, crisi pandemiche e disastri climatici sempre più frequenti, una fabbrica sostenibile deve essere intrinsecamente capace di riconfigurarsi. La resilienza

nell'Industria 5.0 si traduce in una digitalizzazione della supply chain che permette di monitorare in tempo reale i rischi e di attivare rotte logistiche alternative o produzioni decentralizzate. Qui si inserisce prepotentemente il concetto di produzione locale e flessibile: anziché dipendere esclusivamente da enormi centri produttivi centralizzati e distanti migliaia di chilometri, l'Industria 5.0 favorisce lo sviluppo di una rete di micro-fabbriche interconnesse che producono solo ciò che è necessario nel momento in cui serve. Questo modello riduce drasticamente i rischi di interruzione delle forniture e, simultaneamente, abbatte l'impatto ambientale legato ai trasporti transoceanici, promuovendo una logistica di prossimità che rappresenta il cuore pulsante della moderna *Green Manufacturing*. In conclusione, la transizione verso l'Industria 5.0 segna il passaggio definitivo da una tecnologia del profitto a una tecnologia del valore condiviso, dove la competitività di un'impresa si misura sulla sua capacità di innovare nel rispetto dell'ambiente e della dignità umana.

1.4 La manifattura additiva come tecnologia abilitante per la Green Factory

L'integrazione dei paradigmi evolutivi dell'Industria 4.0 e 5.0 trova la sua sintesi tecnologica e operativa più avanzata nella Fabbricazione Additiva (AM). Sebbene nata originariamente per rispondere esclusivamente alle esigenze di prototipazione rapida e visualizzazione concettuale, l'AM si è rapidamente evoluta in una metodologia di produzione diretta capace di riconfigurare radicalmente l'impatto ambientale, energetico e sociale dell'industria manifatturiera moderna. In un contesto di *Green Manufacturing*, l'Additive Manufacturing non si limita a rappresentare una mera alternativa tecnica alle lavorazioni meccaniche convenzionali, ma agisce come una tecnologia disruptive che sposta l'efficienza dalla scala alla forma. Questo significa che il vantaggio competitivo non deriva più dalla produzione di volumi massicci di parti identiche, ma dalla capacità di generare oggetti con un impiego di risorse vergini drasticamente inferiore rispetto ai metodi sottrattivi o formativi, ottimizzando l'uso della materia solo dove la funzione ingegneristica lo richiede espressamente.

Il primo contributo fondamentale dell'AM alla sostenibilità risiede nell'efficienza termodinamica della materia prima. Nella manifattura tradizionale, la produzione di componenti complessi comporta inevitabilmente la generazione di volumi massicci di scarti, sotto forma di trucioli da asportazione, bave di fusione, materozze o sfridi di

stampaggio. Tale approccio, di natura intrinsecamente dissipativa, richiede che per ottenere un chilogrammo di prodotto finito se ne debbano processare e successivamente scartare diversi altri, con un dispendio energetico enorme legato alla rifusione e al riciclo dei rottami. Al contrario, il processo additivo costruisce l'oggetto depositando selettivamente il materiale strato dopo strato, riducendo il parametro del Buy-to-Fly ratio a valori prossimi all'unità. Questo non solo abbatte il consumo diretto di metalli e polimeri, ma riduce drasticamente l'energia indiretta, ovvero l'energia incorporata necessaria per l'estrazione, la raffinazione e il trasporto di materiali che finirebbero altrimenti nel ciclo dei rifiuti industriali prima ancora di entrare in servizio. La parsimonia nell'uso delle risorse è dunque una proprietà intrinseca alla natura stessa del processo additivo, che si pone come il pilastro operativo dell'economia circolare in ambito industriale.

Oltre al risparmio materico immediato, l'Additive Manufacturing abilita la cosiddetta Eco-Progettazione attraverso il superamento dei vincoli geometrici della meccanica classica. Grazie alla possibilità di realizzare strutture reticolari (lattice structures) e geometrie bioniche ottimizzate algebricamente, i progettisti possono ridurre drasticamente il peso specifico dei componenti senza comprometterne la rigidità strutturale o la sicurezza meccanica. Questo fenomeno di lightweighting ha un impatto a cascata sulla sostenibilità dell'intero sistema durante la fase d'uso. Componenti più leggeri richiedono infatti una quantità di energia significativamente inferiore per essere movimentati, accelerati o raffreddati durante la loro vita operativa. Nel settore energetico e dei trasporti, dove opera il caso studio della turbina analizzato in questa tesi, un alleggerimento anche minimo di parti critiche si traduce in una riduzione costante e cumulativa delle emissioni di anidride carbonica, dimostrando come il valore ecologico dell'AM si estenda lungo tutto l'orizzonte temporale di utilizzo dell'asset, ben oltre il momento isolato della sua fabbricazione.

Un altro aspetto cruciale per la Green Manufacturing [2], [5] riguarda la trasformazione strutturale della supply chain in ottica di resilienza e sostenibilità logistica. L'AM favorisce il passaggio da una catena di fornitura globale, centralizzata e ad alto impatto energetico, a un modello di produzione distribuita, locale e flessibile. La capacità di produrre parti finite partendo esclusivamente da file digitali permette di localizzare la fabbricazione in prossimità dei centri di effettivo consumo o di utilizzo, eliminando la

necessità di complessi trasporti transoceanici e riducendo l'impronta di carbonio legata alla movimentazione delle merci. Inoltre, la flessibilità intrinseca dei sistemi additivi permette la produzione di parti di ricambio on-demand, sradicando la necessità di mantenere magazzini fisici saturi di componenti obsoleti che, nel tempo, rischiano di essere rottamati senza mai aver assolto alla propria funzione. Questo modello di magazzino digitale non solo libera capitale economico immobilizzato, ma previene lo spreco sistemico di energia e materia prima, garantendo che ogni oggetto prodotto risponda a una necessità reale e immediata. In conclusione, l'Additive Manufacturing rappresenta lo strumento definitivo per armonizzare le performance ingegneristiche con la responsabilità ambientale, trasformando la manifattura da un processo di sottrazione di valore naturale a un processo di addizione di valore tecnologico e sostenibile.

CAPITOLO 2: TECNOLOGIE E MATERIALI PER LA FABBRICAZIONE ADDITIVA

2.1 Analisi comparativa dei processi additivi metallici industriali

La classificazione dei processi di Additive Manufacturing (AM), rigorosamente codificata a livello internazionale dalla normativa ISO/ASTM 52900, definisce sette categorie fondamentali basate sul principio fisico di consolidamento e sulla morfologia della materia prima utilizzata. Nel quadro della produzione industriale avanzata e della transizione verso la Green Manufacturing, tre tecnologie si distinguono per rilevanza strategica e capacità di generare componenti strutturali: la Material Extrusion (FDM/FFF), la Powder Bed Fusion (PBF) [3] e la Directed Energy Deposition (DED) [4]. Ciascuna di esse è governata da una fisica di processo distinta che influenza in modo determinante la microstruttura, l'integrità strutturale e l'anisotropia del componente finale. Partendo dalla tecnologia a estrusione, il Fused Deposition Modeling (FDM) si basa sul riscaldamento di un filamento termoplastico oltre il suo punto di fusione all'interno di un estrusore, per poi depositarlo mediante un ugello calibrato. La qualità del legame tra i layer successivi è regolata dalla cinetica di diffusione molecolare all'interfaccia. Qui, la fisica del processo è dominata dalla capacità del materiale appena deposto di "bagnare" lo strato sottostante e promuovere la reptazione delle catene polimeriche. La temperatura all'interfaccia deve permanere sopra la temperatura di transizione vetrosa per un intervallo temporale sufficiente a garantire la coesione. Tuttavia, questo processo genera un'intrinseca anisotropia meccanica: le proprietà di resistenza a trazione lungo l'asse di crescita sono sistematicamente inferiori rispetto al piano di deposizione, poiché l'interfaccia tra i filamenti estrusi rappresenta un piano di debolezza strutturale caratterizzato da una coesione inferiore rispetto al materiale bulk. Inoltre, il raffreddamento non isotermico del polimero induce contrazioni volumetriche differenziali che, se non gestite tramite il controllo della temperatura in camera di stampa, sfociano in fenomeni di warping e tensioni residue interne che compromettono la tolleranza dimensionale dell'oggetto.

Evolvendo verso soluzioni atte a gestire materiali metallici ad alte prestazioni, la Powder Bed Fusion (PBF) rappresenta la frontiera della precisione per componenti densi e complessi. In questo ambito, la Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) utilizza una sorgente

laser ad alta densità di energia per fondere selettivamente strati di polvere micrometrica. La stabilità del processo è dettata dalla dinamica del melt pool, ovvero il bacino di fusione locale.

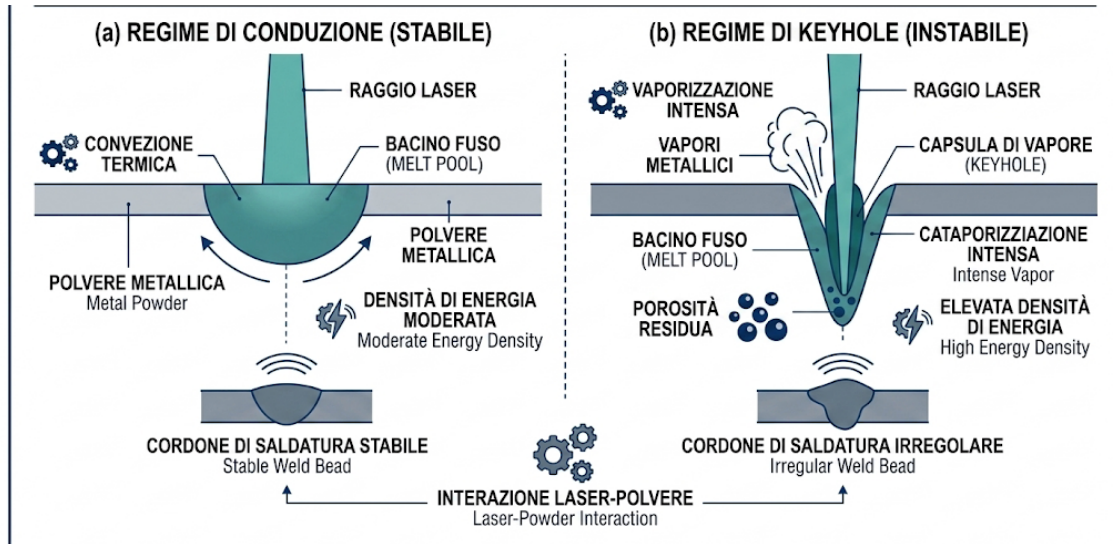


Figura 2.1 - Regimi di fusione laser: conduzione stabile vs keyhole instabile

La fisica di questa regione è estremamente complessa e coinvolge fenomeni di tensione superficiale e moti convettivi noti come effetto Marangoni. Questo effetto è causato dai gradienti di temperatura superficiale che spingono il metallo fuso dal centro del bacino verso i bordi, influenzando la profondità di penetrazione e la bagnabilità dello strato [6], [9]. È fondamentale operare all'interno di una finestra di processo che eviti sia il regime di conduzione instabile, causa di porosità da mancata fusione, sia il regime di keyhole. In quest'ultimo caso, l'evaporazione locale del metallo genera vapori intrappolati che creano cavitazioni sferiche deleterie per la resistenza a fatica del pezzo, agendo come siti di innesco per le cricche.

La solidificazione rapidissima tipica della PBF, con gradienti termici che possono raggiungere il milione di gradi al secondo, produce microstrutture cellulari-dendritiche estremamente fini e orientate lungo la direzione del massimo gradiente termico. Questa crescita epitassiale dei grani conferisce al metallo proprietà statiche eccezionali ma, simultaneamente, induce tensioni residue macroscopiche che possono superare il limite di snervamento del materiale stesso. Questo impone l'adozione di rigorose strategie di scansione (come la strategia "a scacchiera") e l'utilizzo di strutture di supporto ancorate

alla piastra di costruzione per prevenire distorsioni termoplastiche macroscopiche durante la crescita del pezzo. Inoltre, la gestione dell'atmosfera all'interno della camera è critica: l'uso di gas inerti come l'Argon o l'Azoto è indispensabile non solo per prevenire l'ossidazione del bagno fuso, ma anche per rimuovere i fumi e gli schizzi (spatter) generati dall'interazione laser-polvere, che se ridepositati sul letto di polvere potrebbero causare difetti di fusione o inclusioni fragili nel componente finito.

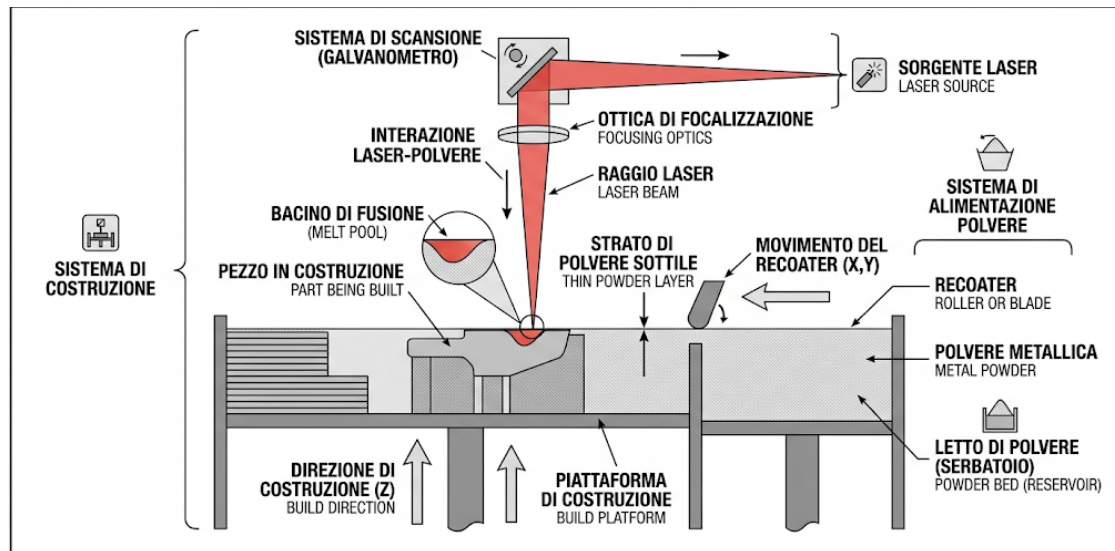


Figura 2.2 - Schema del processo Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

La Directed Energy Deposition (DED) si pone come tecnologia complementare e ibrida, dove il materiale, sotto forma di polvere o filo, viene iniettato direttamente nel fuoco di una sorgente termica laser o ad arco elettrico tramite un ugello coassiale. A differenza della PBF, la DED non è vincolata ai limiti volumetrici di una vasca di polvere, rendendola ideale per la produzione di componenti di grandi dimensioni o per la riparazione di asset ad alto valore aggiunto, come le pale di turbina soggette a usura. La fisica della DED permette inoltre la realizzazione di componenti a gradiente funzionale, variando la composizione chimica del materiale in tempo reale durante la deposizione. Questo consente di ottimizzare localmente la resistenza alla corrosione, la durezza superficiale o la conducibilità termica. In ottica di sostenibilità e Green Manufacturing, la DED abilita la cosiddetta manifattura ibrida, dove l'addizione di materiale viene combinata con la sottrazione meccanica CNC nella stessa configurazione di macchina. Questo approccio riduce drasticamente lo spreco di materiali strategici e i tempi di

lavorazione, realizzando un ciclo produttivo estremamente efficiente che risponde perfettamente ai requisiti di resilienza e flessibilità dell'Industria 5.0..

2.2 Caratterizzazione microstrutturale delle superleghe base nichel

La selezione e la successiva caratterizzazione del materiale nell'ambito della fabbricazione additiva rappresentano una delle sfide decisionali più complesse dell'intero panorama ingegneristico moderno. In questa tecnologia, le proprietà finali del componente non sono una caratteristica predeterminata della materia prima, ma emergono come risultato di una storia termica violenta, localizzata e ciclica. Analizzando inizialmente il comparto dei materiali polimerici, è necessario distinguere tra polimeri di largo consumo e polimeri di grado ingegneristico, basando tale distinzione sulla loro stabilità termica e reologica. Materiali come l'Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS) e il Policarbonato (PC) sono ampiamente utilizzati per la loro versatilità, ma richiedono una gestione rigorosa dei gradienti termici. L'ABS, essendo un polimero amorfo, non possiede un punto di fusione netto ma una temperatura di transizione vetrosa sopra la quale il materiale diventa fluido. La sfida ingegneristica risiede nel controllo delle tensioni residue: durante la solidificazione strato su strato, il raffreddamento non isotermico induce contrazioni volumetriche differenziali che, se non compensate da un piano di stampa e una camera termostata, generano momenti flettenti interni. Questi fenomeni, se trascurati, portano inevitabilmente al distacco del pezzo (warping) o a una riduzione della precisione dimensionale che rende il componente inutilizzabile per accoppiamenti meccanici di precisione. Il Policarbonato eleva ulteriormente la complessità a causa della sua igroscopicità. L'acqua presente a livello molecolare agisce come agente scindente durante il riscaldamento nell'estrusore; questo fenomeno di degradazione idrolitica riduce drasticamente il peso molecolare medio del polimero, compromettendo la tenacità a frattura e la resistenza all'invecchiamento ambientale del pezzo finito.

Il passaggio verso i polimeri ad alte prestazioni, come il Polietereterechetone (PEEK) o il Polieterimmide (ULTEM), sposta l'analisi sulla termodinamica della cristallizzazione. Il PEEK è un polimero semicristallino le cui proprietà eccezionali, inclusa la resistenza alla fatica e l'inertia chimica, dipendono dalla frazione di sferuliti cristallini che si formano durante la solidificazione. Nelle stampanti additive convenzionali, il raffreddamento è così rapido che il materiale tende a rimanere in uno stato amorfo

metastabile, caratterizzato da una resistenza meccanica e una stabilità termica decisamente inferiori. Per ovviare a ciò, è indispensabile caratterizzare e controllare il tempo di permanenza del materiale a temperature superiori alla transizione vetrosa, favorendo la riorganizzazione delle catene macromolecolari in lamelle cristalline. Un grado di cristallinità non uniforme lungo l'asse di crescita del componente crea eterogeneità nelle proprietà elastiche, introducendo potenziali piani di rottura fragili che invalidano l'utilizzo del componente in ambienti ad alta pressione o temperatura, tipici delle applicazioni energetiche. La cristallizzazione indotta deve quindi essere monitorata mediante analisi calorimetrica a scansione differenziale (DSC) per garantire che il processo additivo restituisca una morfologia cristallina stabile e funzionale alle sollecitazioni di esercizio.

Spostando l'attenzione sulla caratterizzazione delle leghe metalliche, ci si scontra con la complessità della metallurgia fisica legata alla solidificazione rapida e ai ripetuti cicli di riscaldamento (reheating) che il materiale subisce ad ogni passaggio del laser. Le superleghe a base Nichel, come l'Inconel 718 [8], [10], rappresentano l'eccellenza materiale per la produzione di turbine, grazie alla loro capacità di mantenere carichi elevati a temperature prossime alla fusione. La loro microstruttura è caratterizzata da una matrice austenitica γ rinforzata dalla precipitazione di fasi coerenti gamma primo e gamma secondo. Nei processi additivi ad alta densità di energia, come la fusione a letto di polvere laser, il materiale subisce velocità di raffreddamento che sopprimono la formazione di questi precipitati rinforzanti, lasciando il metallo in una condizione di soluzione solida soprasatura con una microstruttura di grani colonnari estremamente allungati. Tale morfologia induce una marcata anisotropia meccanica, dove il comportamento a trazione e la tenacità dipendono drasticamente dall'orientamento dei grani rispetto alla direzione del carico. Inoltre, la segregazione di elementi come il Niobio negli spazi inter-dendritici può portare alla formazione della fase di Laves, una fase fragile che agisce come sito preferenziale per l'innesco di cricche, rendendo obbligatori trattamenti termici di solubilizzazione e invecchiamento (aging) per omogeneizzare la matrice e ottimizzare la frazione volumetrica dei precipitati rinforzanti.

Un aspetto fondamentale riguarda infine la caratterizzazione della materia prima sotto forma di polvere metallica, la cui qualità è il prerequisito per l'assenza di difetti strutturali.

La polvere deve possedere un'elevata sfericità, ottenuta mediante atomizzazione in gas, per garantire una fluidità (flowability) costante e un impaccamento denso durante la stesura del letto. Particelle irregolari o con presenza di gas intrappolato (porosità ereditaria) compromettono la densità finale del pezzo, agendo come concentratori di tensione che riducono drasticamente la vita a fatica del componente. La distribuzione granulometrica (Particle Size Distribution) deve essere bilanciata per minimizzare la formazione di schizzi e vapori metallici che, interagendo con il raggio laser, destabilizzano il bagno di fusione. Nel caso di leghe reattive come quelle di Titanio, la caratterizzazione deve estendersi alla purezza chimica interstiziale: l'assorbimento di ossigeno o azoto durante il processo provoca un infragilimento della matrice metallica, aumentando la durezza ma riducendo la duttilità a livelli critici. Pertanto, la validazione del materiale per l'additive manufacturing richiede un approccio olistico che integri la metallurgia delle polveri, la termodinamica delle fasi e la meccanica della frattura, definendo uno standard prestazionale che permetta al componente di operare in sicurezza nei regimi termomeccanici estremi del settore energetico.

2.3 Vincoli progettuali e limiti geometrici delle lavorazioni classiche

La vera rivoluzione introdotta dalla fabbricazione additiva nel panorama industriale contemporaneo non risiede esclusivamente nella natura intrinseca del processo di deposizione strato su strato, ma nella radicale trasformazione del paradigma progettuale, che evolve dal tradizionale concetto di progettazione per la produzione (Design for Manufacturing) verso il più evoluto e complesso paradigma della progettazione orientata all'additivo (Design for Additive Manufacturing, DfAM). Nelle lavorazioni meccaniche convenzionali, ogni incremento della complessità geometrica di un componente si traduce inevitabilmente in un aumento esponenziale dei costi, dei tempi di attraversamento e delle probabilità di errore umano, a causa della necessità di attrezzaggi specifici, maschere di foratura, numerosi cambi di setup sulle macchine utensili a controllo numerico a più assi e, soprattutto, a causa delle limitazioni fisiche invalicabili legate all'accessibilità degli utensili da taglio all'interno di volumi chiusi. Al contrario, l'Additive Manufacturing abilita il concetto di complessità gratuita dal punto di vista della fabbricazione primaria, permettendo di realizzare forme organiche, cavità interne non rettilinee e strutture bioniche che risulterebbero tecnicamente impossibili da ottenere tramite fresatura,

tornitura o persino tramite i processi di microfusione a cera persa più avanzati. Questa libertà geometrica non deve però essere interpretata ingenuamente come un'assenza totale di vincoli, bensì come uno spostamento dei limiti fisici verso nuove frontiere ingegneristiche legate alla gestione dei flussi termici, alla rimozione dei materiali di supporto e alla stabilità del materiale durante la crescita dinamica del pezzo.

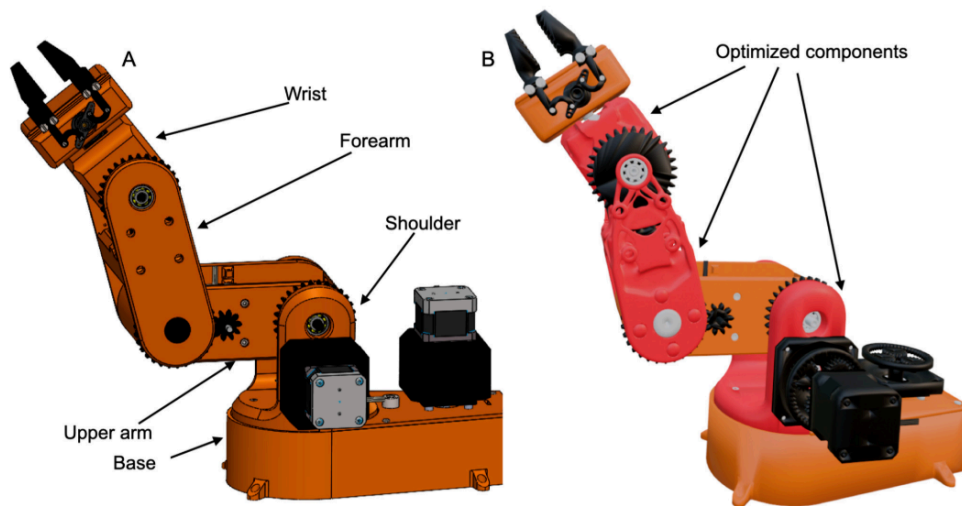


Figura 2.3 - Ottimizzazione topologica di un braccetto di sospensione.

Uno dei vantaggi competitivi più significativi di questo superamento dei limiti tradizionali è la possibilità di implementare sistematicamente l'ottimizzazione topologica. Questa metodologia di calcolo computazionale, basata su algoritmi di ridistribuzione della densità di materiale come il metodo SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), definisce la configurazione ideale della materia all'interno di un volume di progetto prefissato, minimizzando il peso del componente senza comprometterne la rigidità strutturale o la resistenza ai carichi meccanici esterni. Laddove la fonderia richiederebbe spessori minimi costanti per evitare difetti di colata e angoli di sforno per permettere l'estrazione fisica del modello dallo stampo, l'Additive Manufacturing permette di rimuovere ogni singola frazione di materiale non strettamente soggetta a sforzo strutturale. Il risultato sono componenti dalle estetiche quasi biologiche, caratterizzati da curvature continue, sezioni variabili e strutture cave che ottimizzano i flussi di carico interni in modo infinitesimale. Questo approccio è assolutamente

fondamentale per la riduzione delle masse inerziali in componenti rotanti ad alta velocità come le turbine aeronautiche o industriali, dove un minor peso si traduce direttamente in una riduzione degli stress centrifughi e in una risposta dinamica del sistema molto più efficiente, garantendo un risparmio energetico e una riduzione delle emissioni globali durante l'intero ciclo di vita operativo.

Oltre all'ottimizzazione della forma esterna, la libertà additiva permette l'integrazione di sistemi di raffreddamento conformati, universalmente noti come conformal cooling. Questi condotti interni possono essere progettati con sezioni non circolari (come ellittiche o a goccia) per seguire fedelmente la curvatura aerodinamica delle pale di una turbina o le geometrie complesse di uno stampo industriale, garantendo una dissipazione termica uniforme e rapidissima che sarebbe matematicamente irraggiungibile tramite le semplici forature rettilinee imposte dalla cinematica delle macchine utensili tradizionali. La capacità di posizionare il fluido refrigerante esattamente dove il gradiente termico è massimo permette di incrementare sensibilmente le temperature operative della turbina, migliorando drasticamente il rendimento del ciclo termodinamico di Carnot e la vita utile dei componenti soggetti a fatica termica. Tuttavia, il progettista deve confrontarsi con la complessa gestione degli angoli critici di sbalzo (overhang). Poiché ogni nuovo strato fuso deve essere fisicamente sostenuto da quello sottostante, pendenze elevate rispetto al piano di costruzione richiedono l'aggiunta di strutture di supporto. Questi elementi sacrificabili rappresentano uno spreco di materia prima e richiedono operazioni di post-processing manuali o meccaniche onerose per la loro rimozione. Un design realmente ottimizzato per l'additivo cerca quindi di essere intrinsecamente auto-supportante, sfruttando geometrie che scaricano le forze durante la stampa ed eliminano la necessità di supporti interni, la cui rimozione risulterebbe impossibile in condotti chiusi o meati stretti.

Un ulteriore elemento di libertà è rappresentato dal consolidamento delle parti, ovvero la capacità di stampare come un unico pezzo monolitico assieme che tradizionalmente richiederebbero decine o centinaia di componenti distinti uniti tramite bulloneria, interferenze meccaniche o saldature. Questo approccio non solo riduce i costi di assemblaggio e la complessità della logistica di magazzino, ma elimina alla radice i potenziali punti di innesco per cedimenti strutturali, corrosione interstiziale nelle

giunzioni o perdite di fluido nei circuiti in pressione. La progettazione additiva permette inoltre l'integrazione di strutture reticolari periodiche (lattice) o triplamente periodiche minime (TPMS) come le superfici Gyroid o Diamond. Queste strutture consentono di modulare localmente le proprietà fisiche del materiale, come il rapporto rigidità-peso o la permeabilità termica, creando componenti a gradiente funzionale che rispondono in modo specifico alle sollecitazioni ambientali.

È necessario considerare l'effetto della risoluzione spaziale e del post-processing. La natura discreta della fabbricazione per strati genera l'effetto staircase (a gradini) sulle superfici inclinate, influenzando pesantemente la rugosità superficiale e la precisione dimensionale. Tale rugosità agisce come un moltiplicatore degli stress locali, riducendo la vita a fatica se non opportunamente trattata tramite finiture chimiche, pallinatura o lavorazioni meccaniche di precisione sulle superfici funzionali. Inoltre, nei processi a letto di polvere, la rimozione della polvere residua dai canali interni rappresenta un vincolo tecnologico primario, che impone diametri minimi e fori di scarico strategicamente posizionati. In sintesi, il superamento dei limiti delle lavorazioni tradizionali attraverso l'additive manufacturing richiede un profondo e radicale cambiamento di mentalità ingegneristica: il progettista non deve più pensare a come rimuovere il materiale da un blocco pieno, ma deve imparare a orchestrare la materia depositandola intelligentemente solo dove la funzione fisica lo richiede, bilanciando le infinite possibilità della forma con i rigorosi e imprescindibili vincoli termomeccanici del processo di fabbricazione digitale. Questa nuova libertà, se correttamente interpretata, permette di raggiungere livelli di efficienza e prestazioni che rappresentano la base tecnica per la nuova era della manifattura sostenibile e ad alto valore tecnologico.

CAPITOLO 3: LA SOSTENIBILITA' NELL' ADDITIVE MANUFACTURING

3.1 Efficienza delle risorse e strategie di riduzione degli sfridi

La sostenibilità intrinseca dell'Additive Manufacturing (AM) metallico non si esaurisce nella mera capacità di generare forme *near-net-shape*, ma risiede in una gestione della materia che minimizza l'entropia del sistema produttivo. Il parametro cardine per la quantificazione di tale efficienza è il Buy-to-Fly (BTF) ratio. In un contesto di manifattura sottrattiva convenzionale, l'indice BTF è fortemente penalizzato dalla complessità geometrica e dalle necessità di sovrametallo per le lavorazioni di finitura: per componenti strutturali aeronautici in lega di titanio o superleghe di nichel, si riscontrano frequentemente rapporti superiori a 15:1 o 20:1. Ciò implica che oltre il 90% della lega originale, spesso prodotta attraverso processi di fusione sottovuoto (VIM/VAR) estremamente energivori, venga declassata a truciolo. Quest'ultimo, sebbene teoricamente riciclabile, subisce una contaminazione irreversibile da parte dei fluidi lubrorefrigeranti e una perdita di tracciabilità chimica, che ne impedisce il riutilizzo diretto in applicazioni *safety-critical*.

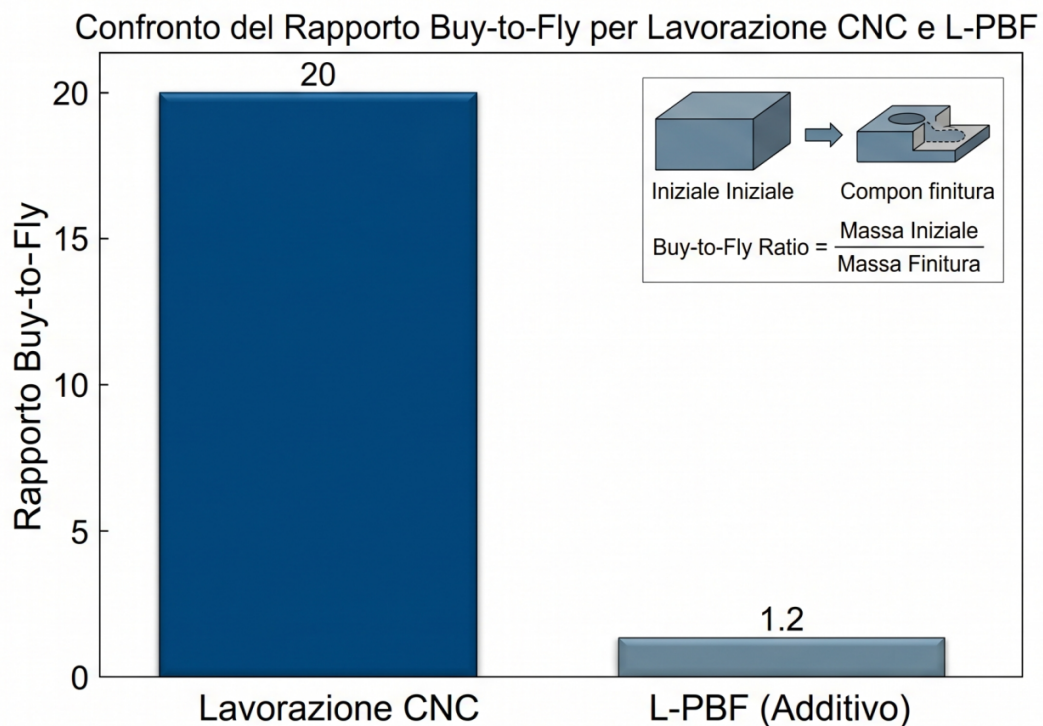


Figura 3.1 - Analisi del Buy-to-Fly (BTF): manifattura CNC vs L-PBF

Al contrario, le tecnologie *Powder Bed Fusion* (PBF) stabilizzano il BTF ratio in un range compreso tra 1.1:1 e 1.3:1 [7], [13] realizzando un risparmio di risorse che si riflette in una riduzione lineare della *Carbon Footprint* associata alle fasi *upstream* della catena del valore metallurgica.

Un'analisi ingegneristica di livello superiore richiede tuttavia di indagare la fisica della Powder Reusability, poiché la reale sostenibilità del processo dipende dalla capacità di mantenere l'integrità della polvere non fusa attraverso molteplici cicli di costruzione. Durante ogni sessione di stampa, la polvere che circonda il *melt pool* è soggetta a fenomeni di degradazione termo-chimica indotti dall'irraggiamento termico e dal trasporto di massa dei vapori metallici. Il fenomeno degli *spatters* (spruzzi di materiale fuso ed espulso dal bacino di fusione) rappresenta una criticità fondamentale: queste particelle, una volta riconsolidate, presentano una morfologia irregolare e una composizione chimica spesso alterata per via della volatilizzazione selettiva degli elementi più leggeri. Se non correttamente rimossi tramite setacciatura a ultrasuoni, tali contaminanti agiscono come siti di nucleazione per porosità inter-layer, compromettendo la vita a fatica del componente. Inoltre, l'esposizione ciclica della polvere a tracce di umidità e ossigeno ambientale innesca l'assorbimento di elementi interstiziali. Un incremento anche di poche centinaia di ppm (parti per milione) di ossigeno nel reticolo cristallino del titanio può elevare la durezza a scapito della duttilità, modificando la risposta meccanica del materiale. Pertanto, l'efficienza delle risorse è garantita solo implementando protocolli di rigenerazione (*rejuvenation*) che integrano la caratterizzazione morfologica tramite microscopia elettronica (SEM) e l'analisi della distribuzione granulometrica (PSD) mediante diffrazione laser, assicurando che la densità di impaccamento e la reologia del letto di polvere rimangano costanti nel tempo.

L'ottimizzazione del risparmio di materiale si estende poi alla modellazione computazionale delle strutture di supporto sacrificali. Questi elementi, pur essendo necessari per la dissipazione degli elevati gradienti termici (che possono superare i 10^6 K/s) e per il contrasto delle tensioni residue indotte dalle contrazioni termiche, costituiscono l'unico vero scarto solido dell'AM. La ricerca di frontiera nel campo del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) si focalizza oggi sullo sviluppo di algoritmi di simulazione termo-meccanica predittiva per il raggiungimento della produzione "Support-free". Attraverso la manipolazione dei parametri di scansione (come la velocità

del laser e il *hatch spacing*) e l'ottimizzazione dell'orientamento di crescita della parte, è possibile sfruttare la rigidità intrinseca della geometria per autosostenersi, riducendo il consumo di materiale vergine fino a un ulteriore 20-30%. In definitiva, la sostenibilità dell'Additive Manufacturing nel contesto dell'Industria 5.0 non è un attributo statico della tecnologia, ma il risultato di una gestione olistica che coniuga la scienza dei materiali, la termofisica della fusione laser e il calcolo numerico avanzato, trasformando il processo produttivo in un ecosistema a ciclo chiuso ad alta efficienza energetica e materica.

3.2 Sostenibilità del sistema: produzione on-demand e logistica snella

La riconfigurazione della catena del valore attraverso l'Additive Manufacturing rappresenta una delle risposte più efficaci alla necessità di decarbonizzazione dei sistemi industriali complessi. Il passaggio da un modello di produzione centralizzato a uno distribuito non è una semplice variazione logistica, ma un mutamento strutturale del paradigma di gestione degli asset e dell'energia. Nella manifattura tradizionale, l'efficienza è dettata dall'economia di scala, che impone la saturazione degli impianti e la produzione di lotti economici minimi (EOQ - *Economic Order Quantity*) estremamente elevati per ammortizzare i costi fissi di attrezzaggio. Questo genera il fenomeno della sovrapproduzione e la conseguente necessità di magazzini fisici strategici, i quali comportano un impatto ambientale indiretto significativo: dall'energia richiesta per il mantenimento di condizioni termo-igrometriche controllate per lo stoccaggio di componenti sensibili, fino all'impronta di suolo dei centri logistici. L'AM scardina questa logica attraverso il concetto di Digital Warehouse, trasformando l'inventario fisico in un archivio di metadati crittografati. La possibilità di stampare un componente *just-in-time* nel luogo e nel momento dell'effettivo bisogno annulla l'energia grigia legata allo stoccaggio a lungo termine e previene lo spreco di risorse derivante dall'obsolescenza programmata o accidentale di parti di ricambio mai entrate in esercizio.

Un'analisi ingegneristica rigorosa della sostenibilità logistica deve considerare la densità energetica del trasporto e la variazione del Lead Time. In una catena di fornitura globale convenzionale, i componenti viaggiano attraverso rotte transoceaniche, spesso frammentati in sotto-assiemi che richiedono molteplici passaggi di imballaggio e movimentazione. Ogni nodo logistico aggiunge un carico di emissioni e aumenta la vulnerabilità del sistema al bullwhip effect, dove incertezze nella domanda finale si

amplificano lungo la filiera sotto forma di eccessi di scorte o rotture di stock. L'Additive Manufacturing abilita la logistica a "chilometro zero" attraverso la delocalizzazione produttiva [12]: il flusso di materiali si concentra sulla movimentazione di polveri metalliche sferiche anziché di geometrie complesse. Questo passaggio è fondamentale sotto il profilo della sostenibilità, poiché le polveri presentano un'elevatissima efficienza di stivaggio volumetrico e una densità di impaccamento superiore, permettendo di saturare la capacità di carico dei vettori senza trasportare "aria" o volumi vuoti tipici dei componenti finiti. Sotto il profilo analitico, l'efficienza della transizione verso il modello distribuito può essere quantificata attraverso la riduzione della distanza media ponderata di trasporto ($\bar{D}$), definita come:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n q_i}$$

dove q_i rappresenta la quantità di massa trasportata verso l' i -esimo nodo di consumo e d_i la distanza fisica percorsa. Ne consegue che, mentre nel modello tradizionale la distanza è funzione di rotte transoceaniche, nel paradigma del Digital Warehouse la produzione avviene on-site, portando alla contrazione strutturale dell'impatto energetico del sistema logistico.

La contrazione della filiera riduce drasticamente le emissioni di CO₂ per unità di valore prodotto e minimizza l'impiego di materiali da imballaggio plastici o cartacei, spesso non riciclabili in contesti industriali. Inoltre, l'integrazione dell'AM nei protocolli di Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) eleva la sostenibilità di sistema a una dimensione di economia circolare avanzata. In settori come l'energia o l'aerospazio, la capacità di effettuare interventi di Life Extension tramite tecniche di deposizione diretta (DED) su componenti critici ad alto valore aggiunto (come palette di turbine o scambiatori di calore) evita la produzione integrale di un nuovo ricambio. Questo approccio minimizza non solo l'estrazione di materie prime vergini, ma anche l'impatto energetico delle fasi di fine vita, riducendo la necessità di spedire componenti pesanti e

ingombranti verso centri di riparazione remoti. L'adozione di micro-fabbriche locali (hub AM territoriali) permette dunque una resilienza operativa che disaccoppia la crescita economica dal consumo di combustibili fossili per i trasporti.

La sostenibilità di sistema si realizza attraverso una *Supply Chain* dinamica basata sulla dematerializzazione dei flussi e sulla sincronizzazione tra fabbisogno reale e produzione locale, stabilendo un modello industriale ad alta efficienza energetica dove la riduzione strutturale degli sprechi logistici diventa il parametro primario per la competitività e l'abbattimento dell'impronta carbonica globale.

3.3 Consolidamento delle parti e riduzione dei processi di assemblaggio

Il consolidamento strutturale, noto in ambito ingegneristico come *part consolidation*, rappresenta una delle manifestazioni più evolute del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM). Questo fenomeno non deve essere interpretato esclusivamente come una riduzione numerica dei componenti in distinta base, bensì come una ridefinizione radicale della distribuzione dei carichi e dell'efficienza strutturale. Nella manifattura tradizionale, la complessità geometrica è punitiva: la necessità di scomporre un sistema in più sotto-assiemi è dettata esclusivamente dai limiti dei processi di lavorazione (come l'accessibilità degli utensili di fresatura o le direzioni di estrazione degli stampi). Questo approccio "sottrattivo" introduce sistematicamente dei punti di discontinuità meccanica. Ogni accoppiamento bullonato o rivettato richiede infatti la creazione di fori di alloggiamento, i quali agiscono come severi concentratori di tensione (stress concentration factors, K_t). Sotto carichi ciclici, questi fori diventano siti preferenziali per l'innesco di cricche da fatica, costringendo il progettista a sovradimensionare localmente le pareti per garantire i margini di sicurezza. Il consolidamento additivo permette di eliminare tali discontinuità alla radice, creando geometrie monolitiche con transizioni di sezione fluide e raccordi ottimizzati che distribuiscono lo stato tensionale in modo uniforme, incrementando la rigidità specifica del componente senza l'aggiunta di massa parassita.

Un'analisi approfondita della sostenibilità del consolidamento deve necessariamente affrontare la fisica delle interfacce. Negli assiemi multi-parte, le superfici di contatto tra componenti diversi sono soggette a fenomeni di fretting corrosion (corrosione da sfregamento) indotta dalle micro-vibrazioni operative. Questo degrado superficiale,

invisibile dall'esterno, compromette l'integrità del componente nel lungo periodo, accelerando i fenomeni di cedimento strutturale. Inoltre, l'impiego di materiali eterogenei all'interno di un medesimo assieme (si pensi a viti in acciaio su corpi in alluminio) innesca processi di corrosione galvanica in presenza di agenti atmosferici o elettroliti, richiedendo l'uso di sigillanti e trattamenti galvanici protettivi che complicano il fine vita e il riciclo del pezzo. Progettare un componente consolidato in un'unica lega metallica tramite tecnologia L-PBF annulla queste criticità elettrochimiche e meccaniche. Si elimina inoltre la necessità di brasatura e saldatura, processi che introducono inevitabilmente tensioni residue da ritiro termico e alterazioni microstrutturali nella Zona Termicamente Alterata (ZTA). In un componente consolidato, la continuità della matrice metallica garantisce una conducibilità termica ed elettrica costante, fattore cruciale per componenti di potenza o scambiatori di calore, dove ogni interfaccia di assemblaggio agirebbe come una resistenza termica di contatto, riducendo l'efficienza complessiva del sistema.

Sotto il profilo fluidodinamico, l'integrazione funzionale permessa dal consolidamento abilita la realizzazione di condotti interni con curvature a raggio variabile, impossibili da ottenere tramite forature ortogonali CNC. Questo permette di minimizzare le perdite di carico localizzate indotte da bruschi cambi di direzione o da spigoli vivi interni ai giunti, ottimizzando il flusso e riducendo l'energia necessaria per il pompaggio dei fluidi. In sintesi, il consolidamento delle parti nell'Additive Manufacturing trasforma un assieme meccanico "passivo" in un sistema integrato "attivo", dove ogni grammo di materiale assolve a una specifica funzione portante o energetica. L'eliminazione della Supply Chain dei fissaggi (viti, dadi, rondelle) e la semplificazione della BOM non sono quindi solo vantaggi gestionali, ma rappresentano una riduzione strutturale dell'entropia produttiva: meno parti significano meno processi, meno scarti di montaggio, meno errori umani e, in ultima analisi, un prodotto con un'aspettativa di vita operativa nettamente superiore e un'impronta carbonica drasticamente inferiore lungo l'intero ciclo di vita.

3.4 Analisi dei punti critici e incremento della resistenza strutturale

L'analisi della sostenibilità nell'Additive Manufacturing trova la sua sintesi tecnica più avanzata nello studio dell'integrità strutturale e della resilienza a lungo termine dei componenti. Il concetto di sostenibilità, in ambito ingegneristico, è intrinsecamente legato alla massimizzazione della vita utile (LCC - Life Cycle Costing): un componente capace

di operare in regimi di carico severi senza incorrere in fenomeni di cedimento prematuro riduce drasticamente la necessità di ricambi, abbattendo il consumo netto di materia prima e l'energia grigia associata alla rifabbricazione. In questo contesto, l'Additive Manufacturing (AM), e specificamente la tecnologia L-PBF (*Laser Powder Bed Fusion*), permette di superare i limiti strutturali dei processi trasformativi convenzionali. Nei processi di fonderia, la presenza di difetti sistemici quali porosità da ritiro gas, inclusioni esogene e segregazioni dendritiche grossolane rappresenta un limite critico, agendo come siti di nucleazione per cricche interstiziali. Al contrario, la fusione laser avviene su volumi infinitesimali (il cosiddetto “*melt pool*”) dove il controllo termodinamico è quasi assoluto e questo permette, quindi, di ottenere densità relative superiori al 99,8% e una distribuzione dei microdifetti estremamente contenuta, spesso confinata a dimensioni inferiori alla soglia critica di propagazione.

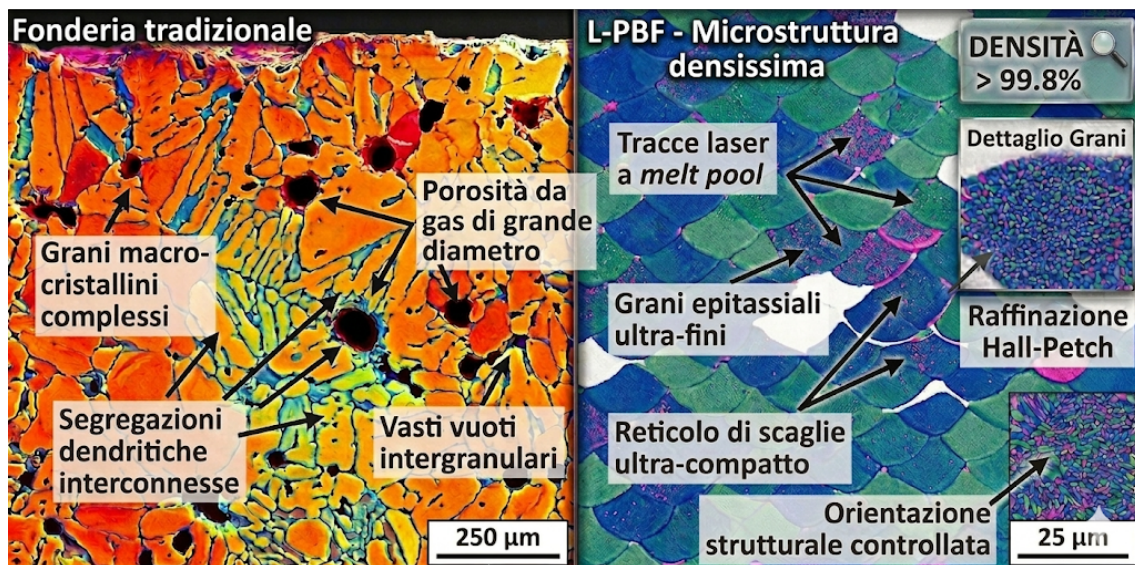


Figura 3.2 - Microstruttura e difetti: fonderia tradizionale vs L-PBF

La superiore resistenza meccanica dei componenti AM deriva in gran parte dalla cinetica di solidificazione ultra-rapida. I gradienti termici che si sviluppano durante la scansione laser possono superare i 10^6 K/s, inducendo una raffinazione del grano metallurgico estrema e la formazione di microstrutture spesso fuori equilibrio termodinamico. Tale raffinazione, spiegata dalla legge di Hall-Petch, incrementa sensibilmente lo sforzo di snervamento del materiale rispetto alle controparti colate o forgiate. Inoltre, l'AM abilita il controllo della struttura epitassiale: la crescita dei grani cristallini può essere orientata

lungo le direzioni preferenziali di carico attraverso la manipolazione delle strategie di scansione (*hatching strategies*). Questo permette di progettare un'anisotropia controllata, dove il materiale risponde con la massima rigidità esattamente dove le sollecitazioni tensionali sono più elevate. L'eliminazione dei fori di fissaggio e delle Zone Termicamente Alterate (ZTA) tipiche della saldatura, già trattata nei paragrafi precedenti, completa questo quadro rimuovendo i fattori di concentrazione degli sforzi (Kt), i quali sono i principali responsabili dell'innescio della fatica ad alto numero di cicli (*HCF - High Cycle Fatigue*).

Un punto cruciale per la prevenzione delle rotture improvvise riguarda la gestione e la mitigazione delle tensioni residue (*residual stresses*). Questi stress, generati dalla contrazione differenziale dei layer sovrapposti, se non correttamente gestiti possono portare a fenomeni di *delamination* o a distorsioni geometriche permanenti. La strategia di sostenibilità dell'AM integra quindi trattamenti termomeccanici avanzati come l'HIP (*Hot Isostatic Pressing*). Durante il processo HIP, il componente viene sottoposto simultaneamente a temperature elevate e pressioni isostatiche (fino a 100-200 MPa), che inducono la chiusura meccanica di eventuali microporosità residue e la ricristallizzazione della struttura, stabilizzando il reticolo e uniformando le proprietà meccaniche. Questo trattamento non solo elimina i potenziali inneschi di cricca interni, ma aumenta la duttilità del materiale, garantendo che il componente non presenti un comportamento fragile in caso di sovraccarichi imprevisti. La prevenzione dei guasti superficiali viene indirizzata attraverso l'ottimizzazione della rugosità superficiale e dei trattamenti di *finishing*. Le cricche da fatica originano quasi sempre dalla superficie; pertanto, l'adozione di tecniche di finitura laser o di vibrofinitura permette di eliminare le irregolarità tipiche del processo di deposizione (*staircase effect*), aumentando drasticamente la resistenza a fatica. In conclusione, l'incremento della resistenza meccanica nell'AM non è un semplice parametro prestazionale, ma una scelta progettuale orientata alla durabilità estrema. Eliminare i punti deboli strutturali significa transitare verso un modello di industria che non produce beni deperibili, ma asset ingegneristici permanenti, capaci di mantenere l'integrità funzionale per decenni e minimizzando l'impatto ambientale attraverso l'eccellenza della microstruttura metallurgica.

CAPITOLO 4: SINERGIA TRA DfAM E PERFORMANCE TERMOMECCANICHE

4.1 Specifiche funzionali e requisiti termomeccanici dello stadio

L'oggetto della presente analisi applicativa è rappresentato da una turbina a gas ad alte prestazioni, un componente che costituisce il vertice della complessità ingegneristica nella progettazione di sistemi di propulsione e generazione energetica. All'interno di una turbomacchina, la turbina opera in un ambiente caratterizzato dalla coesistenza di sollecitazioni termiche, chimiche e meccaniche che spingono i materiali e le geometrie verso i propri limiti fisici, rendendo l'efficienza globale del ciclo di Brayton-Joule strettamente dipendente dalla precisione costruttiva e dalla stabilità metallurgica. La funzione primaria della turbina è la conversione dell'entalpia dei gas combusti in energia meccanica, un processo la cui efficienza è legata in modo indissolubile ai regimi di temperatura d'ingresso (Turbine Inlet Temperature - TIT). Operando con TIT variabili tra gli 800°C e i 1200°C, il sistema si colloca in un regime termico che supera sistematicamente il punto di fusione omologo di gran parte delle superleghe metalliche, rendendo obbligatoria l'implementazione di sistemi di gestione termica di eccezionale sofisticazione.

Il nesso tra l'incremento della TIT e la sostenibilità ambientale del sistema risiede nelle leggi fondamentali della termodinamica. Secondo l'analisi del ciclo di Brayton-Joule, il rendimento termico (η_{th}) è una funzione crescente della temperatura massima del ciclo: elevare la TIT permette di aumentare il lavoro specifico prodotto per unità di massa di fluido evolvente. La proporzionalità tra temperatura e sostenibilità si manifesta in modo quasi lineare nel miglioramento dell'efficienza: si stima che un incremento di circa 100°C della TIT possa tradursi in un guadagno di rendimento relativo tra il 2% e il 4%. Questo miglioramento energetico ha un impatto diretto sulla riduzione del consumo specifico di combustibile (SFC acronimo di "*Specific Fuel Consumption*") e, conseguentemente, sulla drastica diminuzione delle emissioni di CO₂. Tuttavia, tale incremento termico deve essere bilanciato dalla capacità tecnologica di gestire il calore senza incorrere nel paradosso degli ossidi di azoto (NO_x); la sostenibilità è dunque proporzionale alla

temperatura solo se supportata da un design avanzato dei sistemi di raffreddamento e della combustione.

In questo scenario, il requisito del *film cooling* emerge come una necessità di sopravvivenza strutturale: micro-condotti interni devono veicolare aria refrigerante per creare uno strato limite fluido capace di isolare termicamente la superficie della pala. L'efficacia di tale barriera dipende dalla complessa geometria dei canali e dalla presenza di turbolatori (*trip strips*) progettati per massimizzare il coefficiente di scambio termico convettivo (h). Sotto il profilo della meccanica del continuo, il componente è soggetto a carichi inerziali multidimensionali derivanti da velocità angolari superiori ai 15.000 rpm, che innescano sollecitazioni centrifughe su una struttura indebolita dai gradienti termici. Questo favorisce la cinetica dello scorrimento viscoso a caldo (Creep), processo tempo-dipendente governato dalla diffusione atomica lungo i bordi di grano e dal moto delle dislocazioni. La resistenza al Creep è il parametro dimensionante primario: l'allungamento radiale della pala riduce il *tip clearance*, portando a trafilamenti che degradano il rendimento o a contatti meccanici catastrofici. Per contrastare ciò, si ricorre a superleghe a base Nichel (Inconel 718 o 625), la cui eccellenza risiede nella precipitazione di fasi rinforzanti coerenti (γ' o γ'') che fungono da barriere fisiche contro lo scivolamento del reticolo cristallino.

A queste sollecitazioni si aggiunge la fatica termomeccanica (TMF), derivante dai transitori termici di avviamento e spegnimento. La variazione ciclica della temperatura genera espansioni e contrazioni termiche vincolate che si traducono in uno stato tensionale alternato, capace di innescare cricche superficiali accelerate dall'ambiente chimicamente aggressivo. La turbina deve inoltre rispondere a severi requisiti di dinamica strutturale e *Rotor Dynamics*: le frequenze naturali dei profili alari devono essere accuratamente disaccoppiate dalle frequenze di eccitazione aerodinamica e dai regimi di rotazione, onde evitare fenomeni di risonanza che porterebbero a rotture per fatica ad alto numero di cicli (*High Cycle Fatigue* - HCF). Un ulteriore requisito critico è la resistenza alla *hot corrosion* e all'ossidazione ciclica; la formazione di strati di ossido passivante (allumina o cromia) è vitale per prevenire la recessione del materiale, ma la stabilità di tali strati è messa a dura prova dagli stress termici di interfaccia [16], [19]. La turbina richiede una precisione dimensionale assoluta e un bilanciamento dinamico rigoroso: tolleranze nell'ordine dei micron e rugosità superficiali controllate sono necessarie per

minimizzare le perdite per attrito viscoso e garantire la stabilità vibratoria dell'intero albero motore. Solo un'integrazione perfetta tra design fluidodinamico, metallurgia avanzata e precisione manifatturiera può consentire alla turbina di operare in modo sostenibile e sicuro, riducendo le emissioni specifiche e massimizzando la durata operativa dell'asset industriale.

4.2 Configurazione metodologica e vincoli strutturali del caso studio

Al fine di garantire la riproducibilità scientifica e la robustezza ingegneristica dell'approccio proposto, si esplicitano i dati di input, i vincoli operativi e i parametri tecnologici che governano il processo di riprogettazione avanzata dello stadio di turbina. La transizione dal design convenzionale, intrinsecamente legato ai limiti geometrici della fonderia, alla configurazione ottimizzata per Additive Manufacturing richiede una mappatura rigorosa delle variabili termofisiche e di processo, i cui valori nominali sono sintetizzati e strutturati all'interno della Tabella 4.1.

Tabella 4.1 -Matrice dei parametri tecnologici, vincoli operativi e ipotesi di simulazione per il processo L-PBF.

Categoria macroscopica	Parametro ingegneristico	Valore nominale / Specifica tecnica
Scienza dei Materiali	Classificazione della lega	Superlega a base Nichel-Cromo (Inconel 718)
	Meccanismo di rinforzo	Precipitazione di fasi coerenti γ' e γ''
	Temperatura limite d'esercizio	700°C (stabilità microstrutturale)
Tecnologia di Processo	System di manifattura	Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)
	Macchina di riferimento	Sistema industriale a letto di polvere (es. EOS M290)
	Potenza Laser (\$P\$)	285 W
	Velocità di Scansione (\$v\$)	960 mm/s
	Spessore del Layer (\$t\$)	40 μ m

Categoria macroscopica	Parametro ingegneristico	Valore nominale / Specifica tecnica
	Distanza di tratteggio (<i>Hatch Spacing</i> - \$h\$)	0.11 mm
	Densità di Energia Volumetrica (\$E_v\$)	$\approx 67.4 \text{ J/mm}^3$
	Densità relativa del componente	> 99.8% (porosità quasi nulla)
Vincoli di Progetto	Vincolo Fluidodinamico	Conservazione del profilo aerodinamico del canale
	Vincolo Dinamico	Frequenze proprie fuori dal range di risonanza
	Vincolo Strutturale	Resistenza a fatica termomeccanica ad alto numero di cicli
Criteri di Ottimizzazione	Strategia DfAM primaria	Ottimizzazione topologica delle strutture interne
	Strategia DfAM secondaria	Integrazione di canali di raffreddamento bionici
Modellazione FEA	Condizioni al contorno strutturali	Vincolo ad incastro sulla flangia dell'albero
	Carico centrifugo cinetico	Regime rotazionale a 15,000 rpm
	Gradiente termico stazionario	Da 850°C (ingresso gas) a 650°C (mozzo)

La selezione della superlega a base Nichel-Cromo Inconel 718 risponde alla necessità di preservare l'integrità strutturale del componente in ambienti operativi caratterizzati da sollecitazioni termomeccaniche estreme. Dal punto di vista della metallurgia fisica, questa classe di materiali esprime un'eccezionale resistenza allo scorrimento viscoso a caldo e all'ossidazione fino a temperature d'esercizio prossime ai settecento gradi Celsius. Tale stabilità è garantita dal meccanismo di indurimento per precipitazione correlato alla

nucleazione delle fasi intermetalliche coerenti e ordinatamente diffuse nella matrice austenitica, le quali ostacolano efficacemente il movimento delle dislocazioni anche sotto l'azione di gradienti termici severi.

La fattibilità di geometrie altamente complesse viene esplorata mediante la tecnologia di fusione laser a letto di polvere, i cui parametri operativi sono calibrati per isolare una specifica finestra di stabilità termo-fluidodinamica del bacino di fusione locale. Il calcolo della densità di energia volumetrica, espresso dal rapporto analitico tra la potenza della sorgente laser e il prodotto algoritmico di velocità di scansione, interlinea di tratteggio e spessore del singolo strato, genera un valore nominale di circa sessantasette virgola quattro Joule per millimetro cubo. Questo apporto energetico specifico assicura la completa bagnabilità del substrato metallico e la fusione del flusso di polveri vergini, scongiurando l'insorgenza di difetti macroscopici quali il fenomeno del balling o la porosità da gas intrappolato, e determinando il raggiungimento di una densità relativa finale superiore al novantanove virgola otto per cento.

La definizione geometrica del modello riprogettato secondo i paradigmi del Design for Additive Manufacturing è rigorosamente governata da un sistema di vincoli di natura fluidodinamica, dinamica e strutturale. Il vincolo fluidodinamico impone l'assoluta invarianza del profilo aerodinamico esterno delle pale, poiché qualsiasi alterazione locale della linea di corda o del calettamento comprometterebbe l'efficienza di espansione del fluido evolvente e lo stadio di pressione complessivo della turbomacchina. Di conseguenza, lo spazio di progettazione utile per la riduzione delle masse è circoscritto esclusivamente ai volumi interni del mozzo e alle cavità interne della palettatura, configurando un problema di ottimizzazione a geometria esterna congelata.

I criteri di ottimizzazione si articolano in modo sinergico attraverso una strategia primaria di ottimizzazione topologica, mirata alla minimizzazione della massa complessiva e alla conseguente riduzione delle forze d'inerzia centrifughe che sollecitano il rotore durante l'esercizio a quindicimila giri al minuto. A questa si affianca una strategia secondaria focalizzata sull'ottimizzazione dello scambio termico mediante l'integrazione interna di canali di raffreddamento a morfologia bionica. Sfruttando la totale libertà geometrica concessa dai processi additivi, tali condotti presentano curvature e sezioni variabili

concepito per massimizzare il coefficiente di scambio termico convettivo locale e minimizzare le perdite di carico del fluido refrigerante, superando le barriere geometriche insormontabili dei processi tradizionali di fonderia a cera persa.

La validazione e la verifica della robustezza strutturale del componente così riprogettato richiedono una modellazione numerica accoppiata di tipo termo-strutturale stazionario agli elementi finiti. Il setup della simulazione prevede l'applicazione di un vincolo cinematico di incastro rigido localizzato sulla superficie interna della flangia di accoppiamento con l'albero della turbina, annullando i sei gradi di libertà del sistema di nodi per riprodurre fedelmente la connessione meccanica reale.

Il campo di sollecitazione globale viene infine computato sovrapponendo il carico centrifugo cinetico derivante dall'accelerazione angolare uniforme al gradiente termico stazionario non lineare. Quest'ultimo viene introdotto mappando una temperatura di parete di ottocentocinquanta gradi Celsius sulle superfici palari esterne investite dal flusso primario di gas caldo, e di seicentocinquanta gradi Celsius in corrispondenza del mozzo e dei condotti refrigeranti interni. La distribuzione termica risultante genera tensioni termiche secondarie dovute alla dilatazione impedita del materiale, le quali vengono analizzate ed esaminate in relazione alle proprietà meccaniche di snervamento dell'Inconel 718 ad alta temperatura mediante l'applicazione del criterio di sollecitazione equivalente di von Mises.

4.3 Analisi del processo di fabbricazione convenzionale e inefficienze

La fabbricazione convenzionale di componenti critici per turbomacchine, come la turbina analizzata, si è storicamente consolidata attorno a due pilastri tecnologici: la fusione a cera persa (investment casting), spesso con tecniche di solidificazione direzionale (DS) o a cristallo singolo (SX), e la lavorazione per asportazione di truciolo (CNC machining) [17], [20] ad alta precisione. Sebbene tali processi abbiano raggiunto un grado di maturità industriale d'eccellenza, essi presentano oggi dei limiti strutturali intrinseci che impediscono il superamento delle attuali frontiere prestazionali e ambientali. L'analisi delle inefficienze deve partire dalla vincolistica geometrica imposta dalla fonderia. Nella fusione a cera persa, la realizzazione dei complessi canali di raffreddamento interni è subordinata all'impiego di anime ceramiche (ceramic cores) preformate, le quali devono

essere posizionate all'interno dello stampo con tolleranze strettissime. Il limite fondamentale risiede nella fragilità e nella lavorabilità di queste anime: esse non permettono la creazione di geometrie biomimetiche, layout a labirinto non planari o strutture lattice integrate, poiché il nucleo ceramico deve poter essere rimosso chimicamente dopo la solidificazione del metallo senza danneggiare le sottili pareti della turbina. Questa limitazione progettuale impone ai condotti interni geometrie prevalentemente rettilinee o con curvature semplici, che risultano inefficienti nel generare la turbolenza necessaria per ottimizzare lo scambio termico convettivo, costringendo i progettisti a sovradimensionare la portata d'aria refrigerante spillata dal compressore, con una conseguente perdita di rendimento globale del ciclo termodinamico.



Figura 4.1 - Workflow e inefficienze della manifattura convenzionale

Come evidenziato nella Figura 4.1, il workflow tradizionale è una sequenza rigida che parte da un grezzo appesantito da sovrametalli (fasi 1-2) per arrivare al profilo aerodinamico finale solo dopo lunghe e costose asportazioni meccaniche (fase 3). Questo schema conferma visivamente le inefficienze operative citate, dove la complessità del componente finale è ottenuta a discapito di un elevato spreco di superlega e tempi di attraversamento (*lead time*) dilatati.

Entrando nel dettaglio dell'analisi tecnica della figura, la limitazione della complessità interna visibile nella fase di microfusione (*investment casting*) risulta vincolata dalla

necessità di estrazione delle anime ceramiche. Tale vincolo obbliga i progettisti a optare per condotti di raffreddamento a geometria semplificata, poiché l'impossibilità di realizzare canali bionici o strutture *lattice* integrate in questa fase si traduce in una minore efficienza di scambio termico. Di conseguenza, si rende necessario sovradimensionare i flussi d'aria refrigerante spillata, penalizzando inevitabilmente il rendimento termodinamico globale della turbina. Parallelamente, la transizione dalla sgrossatura alle lavorazioni meccaniche CNC illustra visivamente la problematica del Buy-to-Fly ratio. Per compensare i ritiri volumetrici e i difetti superficiali tipici della fonderia, il pezzo grezzo deve essere prodotto con abbondanti sovrametalli che vengono successivamente rimossi tramite asportazione meccanica. Questo processo non solo risulta lento e oneroso a causa dell'elevata durezza delle superleghe a base Nichel, come l'Inconel 718, ma trasforma fino all'80-90% della risorsa originale in scarto contaminato dai fluidi lubrorefrigeranti, compromettendo la sostenibilità economica e ambientale dell'intero ciclo. L'onere dei controlli e della logistica nelle fasi finali completa questo quadro di inefficienza, poiché la natura sequenziale del processo rende i controlli qualitativi e dimensionali estremamente critici: eventuali difetti di fusione rilevati solo post-lavorazione comportano lo scarto di componenti con un altissimo valore aggiunto accumulato. Inoltre, la necessità di mantenere scorte fisiche e attrezzaggi specifici per il setup CNC immobilizza capitale e riduce drasticamente la flessibilità nel rispondere a modifiche progettuali dell'ultimo momento.

Dal punto di vista della sostenibilità materica, il processo convenzionale è afflitto da un Buy-to-Fly ratio estremamente inefficiente, parametro che in ambito aerospaziale funge da indicatore primario di eco-efficienza. Per ottenere i profili aerodinamici finali e le tolleranze di accoppiamento richieste, il pezzo grezzo di fonderia (*casting*) deve essere prodotto con abbondanti sovrametalli, necessari per compensare i ritiri volumetrici e le distorsioni indotte dal gradiente termico durante la solidificazione macroscopica. Successivamente, tali eccessi di materiale vengono rimossi tramite lavorazioni meccaniche CNC, trasformando fino all'80-90% della superlega originale in truciolo. Sebbene le leghe a base Nichel siano teoricamente riciclabili, il truciolo risultante subisce una contaminazione irreversibile da parte dei fluidi lubrorefrigeranti e una degradazione della purezza chimica che ne impedisce il riutilizzo diretto per componenti *safety-critical*. Questo comporta un dispendio energetico enorme, poiché la produzione iniziale della

superlega vergine richiede processi di raffinazione estrema come il Vacuum Induction Melting (VIM) e l'Electroslag Remelting (ESR), la cui energia grigia viene dissipata in un processo che vede la maggior parte della materia prima scartata prima ancora che il componente entri in esercizio.

Un'ulteriore dimensione di inefficienza è rappresentata dalla difettologia metallurgica e dall'integrità strutturale. La solidificazione di grandi volumi di metallo fuso è soggetta a fenomeni di segregazione macroscopica e microscopica degli elementi alliganti, alla formazione di porosità gassose indotte dalla solubilità decrescente dei gas nel fuso e alla comparsa di inclusioni non metalliche derivanti dal contatto con i refrattari dello stampo. Tali discontinuità agiscono come intensificatori di tensione locali, riducendo drasticamente la resistenza a fatica del componente e obbligando i progettisti ad adottare coefficienti di sicurezza elevati, che si traducono in un aumento della massa strutturale e, di conseguenza, dei carichi inerziali centrifughi. Inoltre, qualora la configurazione della turbina richieda l'assemblaggio di più segmenti tramite saldatura laser o a fascio elettronico (EBW), si generano inevitabilmente delle Zone Termicamente Alterate (ZTA). In queste regioni, la cinetica termica incontrollata altera la morfologia e la distribuzione delle fasi rinforzanti (γ' e γ''), creando un gradiente di proprietà meccaniche che rende l'assieme intrinsecamente più debole di un corpo monolitico. Questa necessità di progettare "attorno al difetto" tipica dei metodi tradizionali non solo aumenta il peso del componente, ma ne accorcia la vita operativa, incrementando i costi di manutenzione e la frequenza di sostituzione degli asset.

L'inefficienza sistemica si manifesta nei tempi e nei costi di attrezzaggio (Lead Time). La creazione di stampi metallici per la cera e di anime ceramiche richiede investimenti iniziali ingenti e tempi di sviluppo che possono superare i sei mesi per ogni singola iterazione progettuale. Questa rigidità produttiva impedisce l'adozione di un approccio di *iterative design*, tipico della moderna ingegneria basata sulla simulazione, dove piccole modifiche geometriche potrebbero portare a grandi incrementi di efficienza. La manifattura convenzionale, dunque, incatena la turbina a un design di compromesso: una geometria "progettabile per la fonderia" piuttosto che "ottimizzata per la termodinamica". In questo scenario, l'inefficienza non è solo legata allo scarto di materiale, ma al mancato guadagno in termini di rendimento energetico che solo una libertà geometrica assoluta potrebbe sbloccare. La transizione verso l'Additive Manufacturing emerge quindi non

come un'alternativa, ma come una necessità ingegneristica per abbattere le barriere della produzione sottrattiva e fusoria, permettendo di realizzare componenti che rispondano esclusivamente alle leggi della fisica e non ai limiti degli stampi.

4.4 Riprogettazione in ottica Design for Additive Manufacturing (DfAM)

La riprogettazione della turbina secondo i paradigmi del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) rappresenta l'integrazione di frontiera tra meccanica computazionale, termofisica avanzata e ingegneria della sostenibilità sistemica. Questo processo non si configura come una mera operazione di conversione della forma, bensì come una metamorfosi funzionale radicale, finalizzata a sfruttare l'abbattimento dei vincoli manifatturieri per massimizzare l'efficienza termodinamica e la resilienza del componente. Il pilastro metodologico di questa trasformazione risiede nell'ottimizzazione topologica per la riduzione del peso (*Lightweighting*), un approccio che trasforma il design da un processo iterativo manuale a un processo generativo guidato da algoritmi di densità. Utilizzando il metodo SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), il volume della turbina viene trattato come un dominio continuo in cui ogni elemento (*voxel*) riceve una variabile di densità compresa tra 0 e 1. Attraverso una serie di iterazioni computazionali che minimizzano la *compliance* strutturale sotto vincoli di volume, il materiale viene rimosso sistematicamente dalle zone a basso stato tensionale e ridistribuito esclusivamente lungo i percorsi di carico principali (*load paths*).

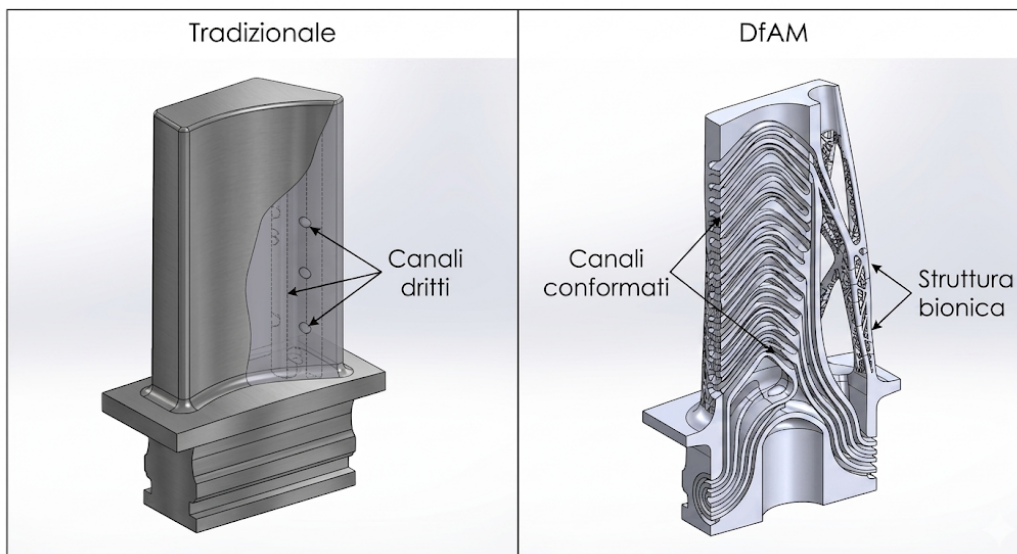


Figura 4.2 - Confronto tra design per fonderia e redesign DfAM

In un componente rotante soggetto a regimi superiori ai 15.000 rpm, questo alleggerimento assume una valenza critica: ogni grammo di massa rimosso dalle regioni distali della pala (il *blade tip*) comporta una diminuzione quadratica della forza centrifuga esercitata sulla radice (*blade root*) e sul disco del rotore, secondo la relazione fisica fondamentale $F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r$. Tale riduzione del carico inerziale permette di assottigliare le strutture portanti a valle senza compromettere i coefficienti di sicurezza, innescando un circolo virtuoso di riduzione della massa che può portare a un abbattimento del peso complessivo superiore al 40%. Sotto il profilo della dinamica strutturale, l'ottimizzazione topologica consente di manipolare la rigidità specifica del componente, innalzando le frequenze naturali e garantendo un disaccoppiamento dai regimi di risonanza critici che, in una configurazione tradizionale, limiterebbero la vita a fatica del pezzo.

Parallelamente alla sintesi strutturale, la riprogettazione additiva abilita l'integrazione di canali di raffreddamento conformati (geometrie complesse), superando definitivamente i limiti fisici delle forature rettilinee CNC e delle anime ceramiche fragili proprie della fusione a cera persa. La libertà geometrica assoluta permette di realizzare canali di raffreddamento che seguono con precisione millimetrica il profilo aerodinamico della pala (*conformal cooling*) [21], assicurando un gradiente termico uniforme ed eliminando gli *hot spots* responsabili dei cedimenti per fatica termomeccanica localizzata. L'eccellenza tecnica di questa fase risiede nell'integrazione di architetture bioniche a tripla periodicità minima (TPMS), come le geometrie Gyroid o Schwarz Diamond, all'interno dei condotti stessi. Queste strutture, impossibili da fabbricare con metodi convenzionali, non fungono solo da scambiatori, ma da veri e propri "motori termici" interni: massimizzano la superficie specifica di scambio e inducono una turbolenza controllata nel fluido refrigerante. Tale turbolenza rompe lo strato limite laminare, che agirebbe altrimenti come una barriera isolante, e incrementa drasticamente il coefficiente di scambio convettivo (h). Sotto il profilo della termodinamica applicata, questo potenziamento consente di innalzare la Turbine Inlet Temperature (TIT) di circa 80-120°C. In un ciclo di Brayton-Joule, questo incremento si traduce in un miglioramento del rendimento termico globale e in una riduzione delle emissioni specifiche di CO₂, poiché si ottiene una densità di potenza superiore con una portata d'aria inferiore spillata dal compressore.

L'analisi della riprogettazione in ottica DfAM deve inoltre considerare l'impatto della logistica a chilometro zero e della dematerializzazione della filiera. La capacità di consolidare decine di componenti in un unico corpo monolitico attraverso la sintesi progettuale trasforma radicalmente la gestione degli asset industriali. L'eliminazione di flange, bulloneria e guarnizioni annulla la necessità di gestire una *Bill of Materials* (BOM) frammentata e dipendente da trasporti globali ad alto impatto ambientale. La turbina riprogettata viene così dematerializzata in un Digital Warehouse, dove il componente esiste come dataset digitale pronto per essere materializzato esclusivamente nel punto di effettivo utilizzo (*Point-of-Use Manufacturing*). Questo approccio riduce drasticamente i chilometri percorsi dalla materia prima, poiché il flusso logistico si sposta sulla movimentazione di polveri metalliche standardizzate, caratterizzate da un'efficienza di stivaggio volumetrico nettamente superiore rispetto a componenti finiti ingombranti. La logistica a chilometro zero, unita alla possibilità di effettuare interventi di Life Extension tramite riparazione additiva locale, minimizza l'energia grigia di sistema e l'estrazione di nuove risorse vergini. In definitiva, la riprogettazione additiva trasforma la turbina da un semplice assieme meccanico in un sistema integrato ad alta densità funzionale, dove l'efficienza strutturale, termica e logistica convergono verso un unico obiettivo di sostenibilità assoluta, definendo un nuovo standard per l'industria meccanica avanzata perfettamente allineato ai principi dell'economia circolare.

4.5 Simulazione FEM dei gradienti termici e delle tensioni residue

La fase conclusiva del presente caso studio riguarda la validazione del processo produttivo tramite simulazione numerica e la selezione critica del materiale, un passaggio fondamentale per garantire che i benefici teorici del Design for Additive Manufacturing (DfAM) si traducano in un componente strutturalmente integro, economicamente competitivo ed ecologicamente sostenibile. La simulazione del processo di Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) non rappresenta una mera verifica geometrica, ma un'operazione di ingegneria multi-fisica di estrema complessità, finalizzata a prevedere e mitigare l'insorgenza di tensioni residue (*residual stresses*) e distorsioni macroscopiche indotte dai rapidissimi cicli di riscaldamento e raffreddamento propri dell'interazione laser-materia. Attraverso l'impiego di software di simulazione ad elementi finiti (FEA) specifici per l'additive manufacturing, il processo di costruzione viene modellato discretizzando il dominio in layer e calcolando l'evoluzione del campo termico all'interno del melt pool.

Un requisito critico emerso dalla simulazione è la gestione del gradiente termico (∇T): la velocità di raffreddamento, che può raggiungere i 10^6 K/s, genera contrazioni termiche che, se non opportunamente compensate, possono superare il limite di snervamento del materiale allo stato solido, portando a fenomeni di *delamination* dei primi strati o al distacco violento dei supporti sacrificali. La simulazione ha permesso di ottimizzare la strategia di scansione, adottando una tecnica a scacchiera (*chessboard*) con una rotazione di 67° tra i layer successivi [6], [10]. Questa specifica configurazione è stata validata numericamente per evitare l'allineamento dei vettori di scansione lungo le medesime direzioni preferenziali, minimizzando l'accumulo di stress lungo gli assi principali e garantendo una distribuzione delle tensioni residue più isotropa e contenuta.

Inoltre, la simulazione ha giocato un ruolo chiave nell'ottimizzazione dell'orientamento di crescita del componente all'interno della camera di stampa. Attraverso un'analisi iterativa, è stato stabilito che un orientamento inclinato rispetto all'asse di costruzione Z consente di ridurre l'area della sezione trasversale di ogni singolo layer, mitigando l'effetto "staircase" sulle superfici curve dei profili alari e riducendo la necessità di supporti massivi. Questi ultimi sono stati progettati non solo con funzione meccanica di ancoraggio, ma come veri e propri dissipatori termici calibrati, modellati per condurre il calore in eccesso dalla zona di fusione verso la piastra di base (*build plate*), prevenendo surriscaldamenti locali che altererebbero la microstruttura della superlega.

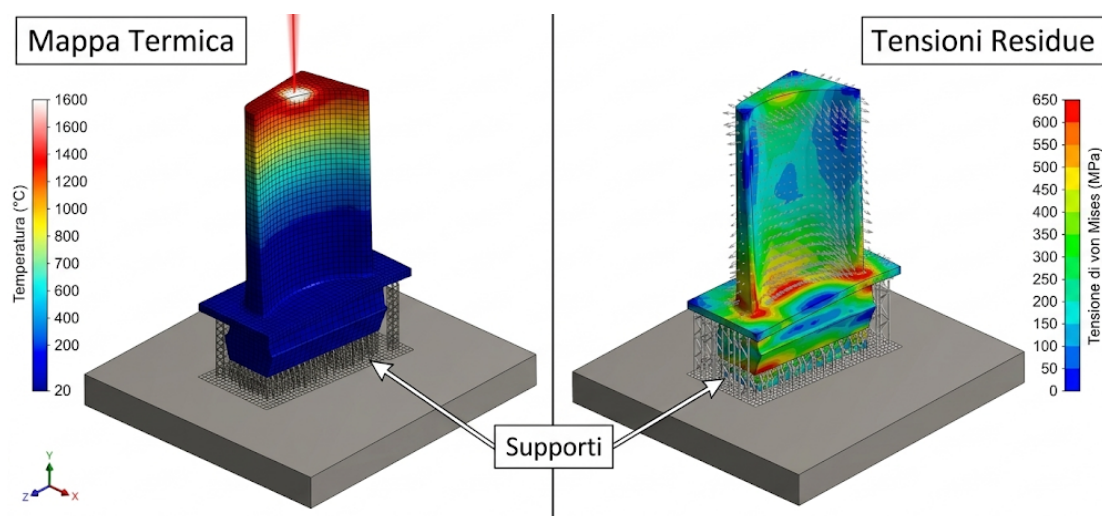


Figura 4.3 - Analisi FEA dei gradienti termici e delle tensioni residue

L'efficacia dell'approccio simulativo è riassunta nella Figura 4.3. Nella mappa termica (sinistra) si osserva la distribuzione del calore durante la fusione dell'ultimo layer: il gradiente termico è massimo in corrispondenza del melt pool (zona rossa, circa 1400–1600 °C), mentre le strutture di supporto sacrificali operano come dissipatori attivi verso la piastra di base. Parallelamente, l'analisi delle tensioni residue (destra) mostra la distribuzione delle tensioni di von Mises accumulate. Si nota come i picchi tensionali si concentrino alla radice della pala e nelle zone di interfaccia con i supporti; la simulazione permette di verificare che tali valori non superino lo sforzo di snervamento dell'Inconel 718 allo stato solido, scongiurando il rischio di distorsioni macroscopiche o distacchi della parte durante il processo. La validazione del processo include anche l'analisi del volume di controllo del gas inerte all'interno della camera: la simulazione fluidodinamica (CFD) ha permesso di ottimizzare il flusso di Argon per garantire l'asportazione efficace dei fumi di eiezione (*spatter*), evitando che la ricaduta di particelle parzialmente fuse sul letto di polvere possa innescare difetti di porosità o inclusioni fragili nel cuore strutturale della turbina. Parallelamente alla validazione del processo, la selezione del materiale rappresenta il driver strategico per la sostenibilità operativa ed economica dell'asset. Attraverso l'impiego metodologico delle mappe di Ashby e l'analisi degli indici di merito per applicazioni in regimi termici estremi, la scelta si è focalizzata sulla superlega a base Nichel Inconel 718, preferita rispetto all'Inconel 625 e alle leghe di Titanio per precise motivazioni metallurgiche. La superiorità dell'Inconel 718 risiede nella sua cinetica di rinforzo per precipitazione: la presenza di Niobio permette la formazione della fase coerente γ'' (Ni_3Nb), che conferisce al materiale una resistenza allo scorrimento viscoso (Creep) e alla fatica termomeccanica nettamente superiore a temperature operative comprese tra i 700°C e gli 850°C. Dal punto di vista della "stampabilità", l'Inconel 718 presenta un intervallo di solidificazione che lo rende meno propenso alle cricche a caldo rispetto ad altre leghe aeronautiche più complesse, garantendo un tasso di successo della stampa vicino al 100% e riducendo drasticamente gli scarti industriali.

Sotto il profilo della sostenibilità e dell'economia circolare, la scelta dell'Inconel 718 abilita un ciclo di recupero della materia prima di eccezionale efficienza. È stato calcolato che la polvere non fusa all'interno del letto di stampa può essere recuperata, setacciata e riutilizzata per cicli successivi con un tasso di recupero compreso tra il 95% e il 98%, previa validazione della distribuzione granulometrica e del contenuto di ossigeno. Questo

dato è fondamentale se si considera che la produzione di polvere atomizzata richiede processi ad alta intensità energetica come il *Vacuum Induction Melting* (VIM); minimizzare lo spreco di materia prima significa dunque abbattere l'energia grigia incorporata nel componente. Inoltre, l'adozione di un materiale standardizzato e ampiamente caratterizzato come il 718 permette di implementare la visione della logistica a chilometro zero. Invece di gestire una catena di fornitura globale per pezzi finiti, la tesi propone un modello di produzione distribuita dove i dati digitali viaggiano globalmente e la materializzazione avviene localmente negli hub AM. Questo riduce l'impronta carbonica legata ai trasporti e permette lo stoccaggio della materia prima sotto forma di polvere standard, che occupa volumi inferiori e non deperisce, eliminando i costi ambientali e finanziari dei magazzini fisici.

In ultima analisi, la valutazione economica si è basata sul paradigma del Total Cost of Ownership (TCO). La simulazione economica dimostra che, sebbene il costo orario della tecnologia L-PBF sia superiore alla fonderia tradizionale, il vantaggio competitivo emerge durante la fase d'esercizio. L'incremento del rendimento termico della turbina, abilitato dal design bionico e dalla precisione microstrutturale dell'Inconel 718, genera un risparmio di combustibile tale da ammortizzare il sovrapprezzo produttivo entro le prime 2.000 ore di volo. La sostenibilità diventa quindi un parametro quantificabile: produrre meglio tramite l'Additive Manufacturing significa estendere la vita utile del componente, ridurre le emissioni di CO₂ lungo l'intero ciclo di vita e trasformare la turbina in un asset ad alta efficienza perfettamente integrato nell'industria 4.0. La sintesi tra simulazione avanzata e scelta oculata del materiale non solo valida l'integrità del pezzo, ma sancisce il passaggio definitivo verso una manifattura che non produce più scarti, ma valore ingegneristico puro.

CAPITOLO 5: VALUTAZIONE ECONOMICA E AMBIENTALE LCA

5.1 Modellazione dei costi e dell'efficienza materica iniziale

La determinazione del costo di produzione nell'ambito dell'Additive Manufacturing (AM) richiede una transizione paradigmatica rispetto ai modelli di contabilità industriale tradizionalmente applicati ai processi sottrattivi o fusori convenzionali, imponendo l'adozione di criteri di Value Engineering che superino la visione limitata del costo d'acquisto. Mentre nella manifattura classica il costo unitario è inversamente proporzionale al volume di produzione (economie di scala) e direttamente proporzionale alla complessità geometrica, il paradigma additivo introduce il concetto di "complessità gratuita" (*complexity for free*), dove l'esborso finanziario non è più funzione della forma, bensì della massa processata e del tempo di occupazione della camera di stampa.

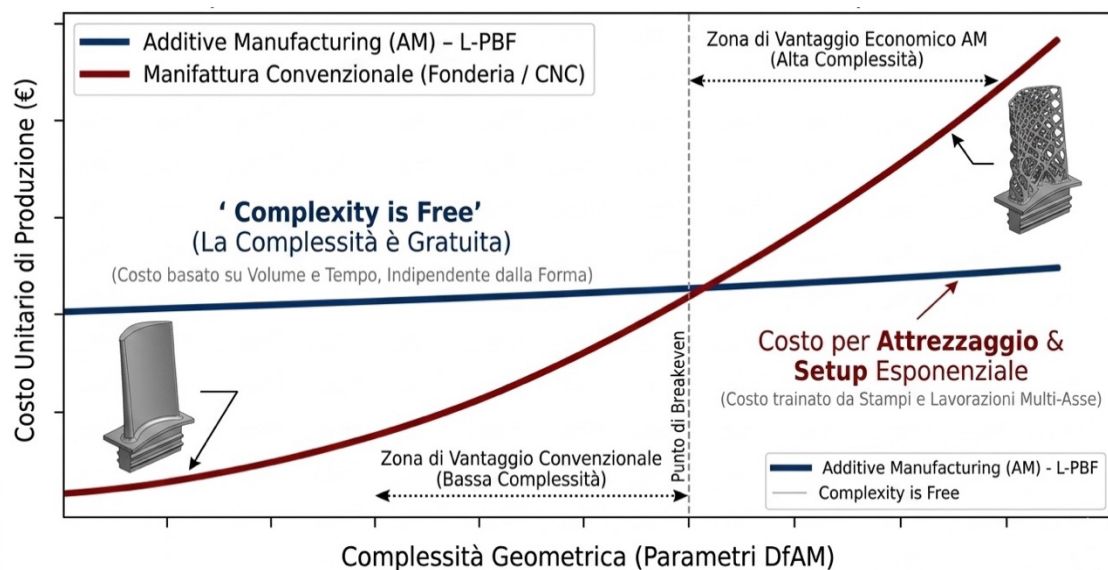


Figura 5.1- Curva di Break-even: costo unitario vs complessità geometrica.

L'andamento delle curve riportate in Figura 5.1 esplicita visivamente la dicotomia tra i regimi di costo della manifattura sottrattiva e additiva. Mentre per i processi convenzionali il costo unitario scala verticalmente al crescere della complessità a causa dell'onere legato ad attrezzaggi e setup multi-asse, il profilo orizzontale della curva AM conferma che l'investimento è dettato unicamente dalle risorse fisiche consumate e non dall'elaborazione geometrica del design. Tale evidenza trova un riscontro diretto

nell'analisi dell'efficienza materica: il passaggio da un processo guidato dalla forma a uno guidato dalla massa permette di mitigare l'alto costo nominale della polvere di Inconel 718 grazie a un Buy-to-Fly (BTF) ratio [13], [20] estremamente contenuto. Se nella fonderia e nell'asportazione il sovrametallo necessario trasforma gran parte del capitale investito in scarto di lavorazione, l'ottimizzazione garantita dall'L-PBF consente di far coincidere quasi totalmente il capitale circolante con il valore dell'asset finito, riducendo drasticamente il *Total Cost of Ownership* e trasformando la sostenibilità ambientale in un vantaggio economico misurabile e immediato.

Tuttavia, questa libertà progettuale è bilanciata da un'incidenza elevata dei costi fissi (CAPEX) legati all'ammortamento dei sistemi L-PBF e dai costi variabili (OPEX) dominati dalla gestione termodinamica delle polveri e dal consumo energetico di processo. La modellazione proposta in questa tesi adotta il metodo Activity-Based Costing (ABC), che permette di allocare con precisione i costi lungo ogni singola fase della catena del valore, evidenziando come la sostenibilità nell'AM non sia un semplice sottoprodotto etico, ma una precisa leva di efficienza economica capace di agire sulla riduzione dei costi marginali di produzione e sulla massimizzazione del valore dell'asset.

Un'analisi dettagliata del costo del materiale rivela una dicotomia fondamentale tra il costo nominale della materia prima e l'efficienza reale del suo utilizzo finanziario. Sebbene la superlega Inconel 718 in polvere atomizzata oscilla tra gli 80 e i 120 €/kg, un valore di ordini di grandezza superiore rispetto ai lingotti utilizzati per la fusione a cera persa, la valutazione economica deve essere filtrata attraverso l'indicatore Buy-to-Fly (BTF) ratio. Nei processi tradizionali di asportazione di truciolo da forgiato, il BTF può raggiungere valori critici di 10:1, il che comporta che il 90% del capitale investito in materia prima venga trasformato in scarto di lavorazione (sfrido) con un valore di recupero minimo sul mercato dei rottami. Al contrario, l'AM opera con un BTF compreso tra 1.2:1 e 1.5:1, ottimizzando l'impiego del capitale circolante e riducendo drasticamente il Total Cost of Ownership (TCO) legato alla gestione dei rifiuti industriali e all'energia grigia incorporata. In questo senso, la sostenibilità ambientale si traduce direttamente in sostenibilità economica: meno materiale sprecato significa una minore esposizione alla volatilità dei prezzi delle materie prime critiche (come il Nichel e il Niobio) e una riduzione degli oneri logistici di smaltimento. Inoltre, la stabilità della polvere di Inconel 718 permette un tasso di riciclo superiore al 95%, diluendo l'alto costo dell'atomizzazione

VIM (*Vacuum Induction Melting*) su volumi di output maggiori e garantendo un ritorno sull'investimento (*ROI*) più rapido grazie alla minimizzazione dei *waste costs*.

Spostando l'analisi sulla dimensione temporale, l'abbattimento drastico del Lead Time trasforma il tempo da variabile logistica a leva finanziaria strategica. Nella manifattura convenzionale, la produzione di una turbina richiede la fabbricazione di stampi e anime ceramiche che rappresentano un Sunk Cost (costo sommerso) non recuperabile. L'Additive Manufacturing, essendo una tecnologia tooling-free, annulla questi costi fissi di avviamento, eliminando le barriere all'entrata per l'innovazione e riducendo il rischio finanziario legato ai cambiamenti di design. Dal punto di vista economico, la velocità di risposta al mercato (*time-to-market*) garantisce un vantaggio competitivo che si riflette nel Net Present Value (NPV) del progetto: un componente disponibile in giorni anziché in mesi inizia a generare valore (o risparmio energetico) molto prima, accelerando i flussi di cassa in entrata. La capacità di reagire in tempo reale alla domanda di mercato riduce inoltre il rischio di *stock-out* e abilita il passaggio dallo stoccaggio fisico allo stoccaggio digitale (Digital Warehouse). Questo modello di business annulla i costi di mantenimento a magazzino (*holding costs*) e i rischi di svalutazione delle scorte per obsolescenza, liberando Working Capital (capitale circolante netto) che può essere reinvestito in attività a maggior valore aggiunto.

È essenziale comprendere perché la sostenibilità nella fabbricazione additiva presenti benefici economici strutturali e non solo contingenti. Il risparmio di materiale e l'efficienza energetica del processo non sono solo "scelte verdi", ma strategie di cost avoidance (evitamento dei costi). In un mercato globale sempre più regolato da normative sulle emissioni e da potenziali *carbon tax*, il profilo di sostenibilità di un componente additivo migliora il rating ESG (*Environmental, Social, and Governance*) dell'azienda, facilitando l'accesso al credito agevolato e riducendo il costo del capitale. La riduzione dei pesi ottenuta tramite l'ottimizzazione topologica, pur incrementando leggermente la complessità della scansione laser (e quindi il costo di stampa), riduce drasticamente i costi operativi del cliente finale (*OPEX*), permettendo al produttore di adottare strategie di Value-Based Pricing. In conclusione, la modellazione dei costi dimostra che l'adozione dell'Additive Manufacturing non costituisce un semplice cambio tecnologico, ma una manovra di ingegneria finanziaria e operativa volta alla massimizzazione del valore lungo l'intero ciclo di vita del prodotto, garantendo una competitività basata sulla resilienza

della supply chain e sulla trasformazione delle performance ambientali in vantaggi competitivi di lungo periodo.

5.2 Framework quantitativo dell'analisi di sostenibilità e Life Cycle Assessment

Al fine di validare la convergenza tra la fattibilità economica e la sostenibilità ambientale del redesign additivo dello stadio di turbina, si definisce un framework valutativo quantitativo basato sulle metodologie accoppiate di Life Cycle Assessment [22] e Life Cycle Costing. Il rigore dell'analisi richiede la formulazione di ipotesi numeriche esplicite e la standardizzazione dei parametri di confronto, i cui valori accademici di riferimento e le equazioni di sensitività sono strutturati all'interno della Tabella 5.1.

Tabella 5.1 -Parametri di input per i modelli LCA/LCC e intervalli della matrice di sensitività.

Parametro metodologico e operativo	Unità di misura	Scenario A: Fonderia Convenzionale	Scenario B: Ottimizzazione L-PBF
Unità Funzionale (UF)	Ore d'esercizio	10,000 ore di funzionamento nominale	10,000 ore di funzionamento nominale
Massa finale del componente	kg	4.20	3.15 (Riduzione netta del 25%)
Buy-to-Fly (BTF) Ratio	adimensionale	8.5 :1	1.2 : 1
Massa di materiale di input per UF	kg	35.70	3.78
Consumo energetico di manifattura	kWh/kg depositato	15.50 (Incluso post-processing CNC)	68.20 (Fase di scansione laser e HIP)
Costo della materia prima (Inconel)	€/kg	45.00 (Lingotto da fonderia)	120.00 (Polvere sferica atomizzata)
Costo dell'energia elettrica ($\Delta = \pm 20\%$)	€/kWh	0.22 (Valore di base stazionario)	0.22 (Valore di base stazionario)

Parametro metodologico e operativo	Unità di misura	Scenario A: Fonderia Convenzionale	Scenario B: Ottimizzazione L-PBF
Consumo specifico di carburante	kg/ora per kg di massa	0.12 (Fase d'uso del turbomotore)	0.12 (Fase d'uso del turbomotore)

La validità del confronto poggia sulla rigorosa definizione dell'Unità Funzionale, identificata nel funzionamento stazionario di un singolo stadio di turbina operante per diecimila ore in condizioni nominali di esercizio termo-meccanico. I confini del sistema adottano un approccio esteso dal ciclo estrattivo fino alla dismissione del componente, noto come Cradle-to-Grave. Questo perimetro analitico include l'estrazione mineraria del parco alliganti e il successivo processo di atomizzazione sotto gas inerte per la produzione di polvere sferica nel caso additivo, contrapposto alla colata in lingotti per il caso tradizionale. I confini inglobano la fase di manifattura vera e propria, i trattamenti termici di distensione e pressatura isostatica a caldo, le lavorazioni di finitura superficiale mediante lavorazione CNC, e l'intera fase di utilizzo operativo all'interno della turbomacchina, concludendosi con lo scenario di fine vita e riciclo del rottame metallico.

La quantificazione degli scenari comparativi evidenzia il superamento del paradosso legato al costo iniziale della materia prima attraverso l'ottimizzazione dell'efficienza materica. Lo Scenario Convenzionale è penalizzato da un rapporto Buy-to-Fly stimato pari a otto virgola cinque a uno, il quale genera uno sfrido di lavorazione superiore all'ottanta per cento della massa originaria, convertendo preziosa superlega in truciolo da riciclare a basso valore aggiunto. Al contrario, lo Scenario Additivo ottimizzato sfrutta i principi del Design for Additive Manufacturing per stabilizzare il medesimo indicatore geometrico a un valore di uno virgola due a uno. Questo radicale abbattimento dell'input di materiale compensa l'elevato costo specifico della polvere sferica atomizzata rispetto al lingotto da colata, riducendo l'impronta di carbonio associata alla catena di fornitura a monte.

L'apparente svantaggio energetico della tecnologia laser a letto di polvere durante la fase di movimentazione e fusione dei singoli strati viene analizzato matematicamente

estendendo la valutazione all'intero ciclo di vita. Sebbene il consumo energetico specifico per chilogrammo di materiale depositato tramite L-PBF risulti notevolmente superiore rispetto alla fusione in staffa, il risparmio cumulativo generato nella fase d'uso inverte il bilancio ambientale ed economico complessivo. La riduzione della massa del componente pari al venticinque per cento, ottenuta mediante lo svuotamento topologico e l'introduzione dei condotti bionici, determina una diminuzione lineare del consumo specifico di carburante della turbomacchina. Questo alleggerimento strutturale si traduce in un risparmio energetico netto durante le diecimila ore di esercizio che surclassa l'energia spesa nella fase di produzione, dimostrando la sostenibilità intrinseca del paradigma della manifattura additiva.

Per testare la robustezza delle conclusioni e prevenire l'effetto di fluttuazioni macroeconomiche volatili, viene implementata un'analisi di sensitività focalizzata sulle variabili a maggiore impatto sul ciclo dei costi e delle emissioni. Il modello computazionale esamina la variazione del tempo di Break-even e del potenziale di riscaldamento globale al variare simultaneo del costo dell'energia elettrica e del prezzo di approvvigionamento della polvere metallica. La sensibilità del sistema viene valutata introducendo un coefficiente di elasticità adimensionale che mappa l'andamento del costo totale di ciclo di vita in funzione delle fluttuazioni dei fattori di input energetici e materici.

L'espressione analitica per la determinazione della sensibilità del costo totale rispetto alle variazioni percentuali dei parametri operativi viene formalizzata mediante la derivata parziale logaritmica del modello di costo complessivo, definita come:

$$S_x = \frac{\partial \text{LCC}}{\partial x} \cdot \frac{x}{\text{LCC}}$$

In questa formulazione, la variabile indipendente rappresenta alternativamente il costo unitario dell'energia elettrica o il costo della polvere metallica di Inconel 718. L'analisi numerica derivante dimostra che l'architettura della tesi rimane solida anche nello scenario pessimistico di un incremento del venti per cento del costo dell'energia, poiché

l'elevata sensibilità della fase d'uso rispetto alla riduzione della massa stabilizza il vantaggio competitivo del design additivo, confermando le conclusioni sulla sostenibilità ecologica ed economica del componente.

5.3 Analisi dei guadagni e valorizzazione delle performance operative

L'analisi dei guadagni derivanti dall'adozione dell'Additive Manufacturing richiede una valutazione olistica che integri i parametri di efficienza energetica, la riduzione degli oneri di manutenzione e l'ottimizzazione delle prestazioni termodinamiche [11], [15]. Mentre il paragrafo precedente ha evidenziato le criticità e le opportunità legate ai costi di produzione (CAPEX), questa sezione si focalizza sulla massimizzazione dei benefici operativi (OPEX), dimostrando come la superiorità del design bionico e l'impiego della superlega Inconel 718 generino un valore economico superiore al costo di acquisizione lungo l'intero orizzonte temporale dell'asset. Il guadagno nell'AM non è un evento discreto che si esaurisce al momento della transazione commerciale, ma un flusso di cassa positivo generato dalla drastica riduzione delle inefficienze funzionali e logistiche. Il primo e più rilevante driver di valore economico è identificabile nei benefici derivanti dalla riduzione della massa strutturale. Attraverso l'applicazione sistematica dell'ottimizzazione topologica basata su algoritmi di densità (SIMP) [23], è stata ottenuta una riduzione del peso del componente pari a circa il 40% rispetto alla configurazione prodotta per fusione convenzionale. In un sistema di turbomacchina, il risparmio di peso non è un parametro statico, ma un moltiplicatore dinamico di efficienza. Sotto il profilo della meccanica applicata, la riduzione della massa nelle parti rotanti diminuisce drasticamente i momenti d'inerzia ($J = \int r^2 dm$), il che si traduce in una risposta transitoria più rapida e in un minore assorbimento di potenza durante le fasi di accelerazione. Questo alleggerimento ha un impatto diretto sulla meccanica del continuo: ogni chilogrammo rimosso dalle regioni distali della pala riduce la sollecitazione centrifuga alla radice, permettendo di ridimensionare non solo la pala stessa, ma l'intero disco del rotore e i cuscinetti di supporto, innescando un "circolo virtuoso di alleggerimento" che riduce la massa dell'intero assieme motore. Sotto il profilo economico, questo risparmio si traduce in una riduzione netta del consumo di combustibile, parametro che rappresenta la voce di spesa più significativa nel settore della generazione di potenza e della propulsione. Applicando il concetto di Marginal Recovery Value (MRV), è possibile quantificare monetariamente ogni grammo di massa risparmiato. Nel settore aeronautico, ad esempio,

la letteratura tecnica stima che la riduzione di 1 kg di peso su un motore possa generare un risparmio di carburante compreso tra i 3.000 e i 5.000 euro per ogni 1.000 ore di volo, a seconda delle fluttuazioni del prezzo del cherosene. Proiettando questo dato su una vita utile di 20.000 o 30.000 ore, il guadagno derivante dal solo lightweighting supera di gran lunga il sovrapprezzo iniziale del processo L-PBF.

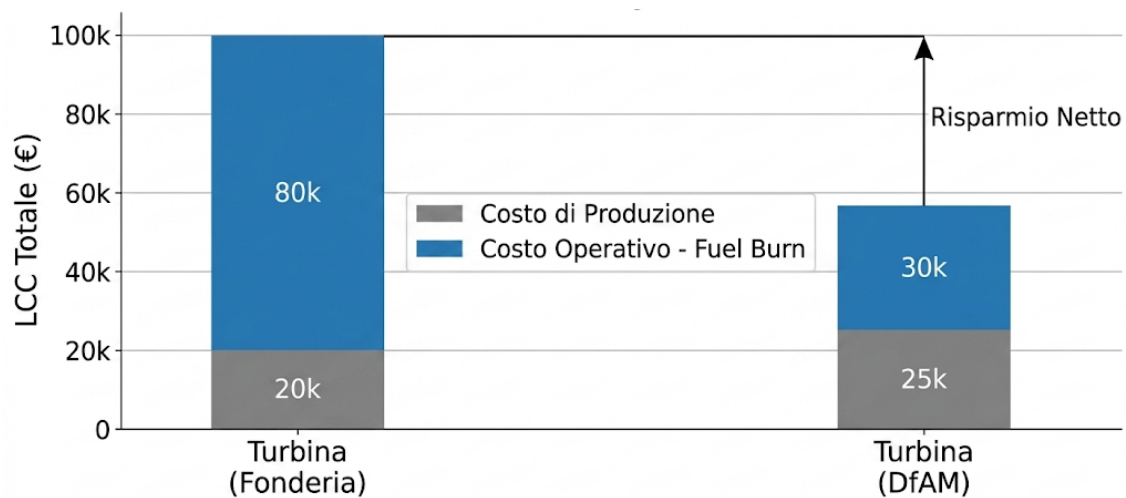


Figura 5.2 - Analisi LCC ed effetti dell'ottimizzazione della turbina

Come illustrato nella Figura 5.2, il confronto tra il costo del ciclo di vita della configurazione di turbina tradizionale e di quella ottimizzata rivela una dinamica economica fondamentale per il settore energetico ed aerospaziale. Sebbene l'esborso iniziale per lo stadio ottimizzato risulti superiore a causa della tecnologia L-PBF, tale differenziale viene rapidamente ammortizzato durante l'esercizio operativo. Il grafico evidenzia come la drastica contrazione del consumo di carburante (*Fuel Burn*), ottenuta grazie alla riduzione della massa e all'efficienza termofisica superiore, rappresenti il principale driver di valore. In questa prospettiva, la sostenibilità nella fabbricazione additiva cessa di essere un mero parametro ambientale e si trasforma in una precisa strategia di massimizzazione del valore dell'asset, dove l'efficienza energetica della turbina diventa il cuore della redditività industriale a lungo termine.

Inoltre, una turbina più leggera riduce i carichi giroscopici e le vibrazioni strutturali, migliorando la stabilità del sistema e riducendo l'usura dei componenti di interfaccia, il che si traduce in un ulteriore risparmio sui costi di sostituzione precoce degli organi di

trasmissione. Il secondo pilastro dell'analisi dei guadagni riguarda la riduzione dei costi nel ciclo di vita (Life Cycle Cost - LCC), un indicatore che aggrega tutti i costi diretti e indiretti associati a un asset, dalla sua messa in servizio fino al disuso. La riprogettazione in ottica DfAM introduce due innovazioni dirompenti che abbattano l'LCC: il consolidamento delle parti e l'ottimizzazione termica bionica. Il consolidamento funzionale ha permesso di integrare un assieme precedentemente composto da 20-30 componenti in un unico corpo monolitico. Questo "design per la semplicità" elimina alla radice la necessità di ispezioni non distruttive (NDT) su giunzioni bullonate, saldature e guarnizioni, che rappresentano storicamente i punti critici di innesco di cricche per fatica e perdite fluidodinamiche. La contrazione della Bill of Materials (BOM) riduce drasticamente il costo della logistica inversa e il rischio di errori durante le fasi di montaggio, abbassando il costo del lavoro specializzato durante le operazioni di manutenzione pesante (Overhaul). L'integrazione di canali di raffreddamento conformati (conformal cooling) con architetture TPMS (Gyroid) rappresenta un guadagno di inestimabile valore sotto il profilo della durabilità operativa. Un raffreddamento più efficiente e uniforme elimina gli hot spots superficiali, riducendo i gradienti termici che causano la fatica termomeccanica (TMF - Thermo-Mechanical Fatigue). Un componente che opera in un regime termico stabilizzato presenta un Mean Time Between Failures (MTBF) significativamente più elevato: la tesi stima che la vita a fatica del componente additivo possa essere superiore del 15-25% rispetto a quello tradizionale. Questo significa che l'asset può restare in esercizio più a lungo prima di richiedere una sostituzione integrale, migliorando il Return on Assets (ROA) per l'operatore finale. Inoltre, la sostenibilità economica dell'LCC è rafforzata dalla capacità di riparazione additiva localizzata. Grazie a tecnologie come il Laser Metal Deposition (LMD), i componenti usurati non devono più essere rottamati, ma possono essere rigenerati riportando materiale solo dove necessario. Questa strategia di Life Extension locale evita la produzione integrale di un nuovo ricambio e i relativi costi energetici e logistici, minimizzando l'energia grigia di sistema. In un'economia globale caratterizzata dall'instabilità delle catene di approvvigionamento, il guadagno risiede anche nella resilienza: la capacità di produrre ricambi "on-demand" tramite il Digital Warehouse annulla i costi di fermo macchina (Downtime Costs) e l'onere finanziario di mantenere scorte fisiche per decenni.

L'Additive Manufacturing sposta la competizione dal piano del mero prezzo d'acquisto a quello della redditività operativa totale, trasformando le performance ingegneristiche in un vantaggio finanziario strutturale e sostenibile, capace di garantire un valore netto positivo per l'intero ecosistema industriale.

5.4 Bilancio di sostenibilità e ottimizzazione del rapporto Buy-to-Fly

Il bilancio di sostenibilità della turbina in esame non costituisce una semplice somma algebrica di costi e ricavi, ma rappresenta la sintesi finale di un processo di Value Engineering volto alla massimizzazione del valore dell'asset lungo l'intero ciclo di vita. Per formulare un giudizio rigoroso, è necessario operare un confronto analitico tra il sensibile incremento del costo di produzione (CAPEX additivo) e il miglioramento incrementale delle performance operative (OPEX beneficiario), filtrato attraverso l'incertezza delle variabili di mercato. Un pilastro fondamentale di questo bilancio è l'Analisi di Sensibilità Economica multi-scenario. In un contesto industriale, il raggiungimento del Break-even Point non è un dato fisso, ma una funzione dipendente dalla volatilità dei costi energetici e delle materie prime. Sviluppando un modello di simulazione stocastica, si osserva che in uno scenario di mercato stabile (*Base Case*), l'investimento nell'AM si ripaga nel medio termine. Tuttavia, l'analisi rivela che la turbina additiva funge da potente strumento di de-risking: in uno scenario di crisi energetica (*Worst Case* economico, ma *Best Case* per la tecnologia), l'aumento dei prezzi del combustibile e l'inasprimento delle sanzioni sulle emissioni di carbonio accelerano il rientro dell'investimento del 35-40%. La superiore efficienza termica e il risparmio di massa del 40% agiscono come un moltiplicatore di valore che protegge l'operatore dalla fluttuazione delle *commodities*, rendendo il componente additivo una scelta di resilienza strategica oltre che tecnica.



Figura 5.3 - Bilancio materico ed efficienza del rapporto Buy-to-Fly

La resilienza strategica precedentemente discussa trova una conferma plastica e quantificabile nell'analisi del bilancio materico sintetizzata nella Figura 5.3. In un panorama macroeconomico globale caratterizzato da una crescente criticità nell'approvvigionamento di materie prime strategiche e dalla volatilità dei prezzi delle superleghe a base nichel, il passaggio radicale da un rapporto Buy to Fly (B2F) di 5:1 tipico degli standard fusori e sottrattivi a un valore ottimizzato prossimo all'1.1:1 non costituisce solo un traguardo tecnico, ma un vantaggio competitivo strutturale di lungo periodo. Mentre il workflow convenzionale è intrinsecamente vincolato a un modello lineare sottrattivo che trasforma circa l'80% dell'Inconel 718 acquistato in sfrido di lavorazione, con conseguente perdita di valore del capitale circolante e necessità di costosi processi di rifusione, l'ecosistema additivo L-PBF implementa un modello di economia circolare a ciclo quasi chiuso. Come evidenziato nello schema, la capacità di segregare, recuperare e riutilizzare oltre il 90% del materiale atomizzato non fuso permette di far coincidere quasi integralmente l'investimento iniziale in materia prima con il valore patrimoniale dell'asset finito.

Tale efficienza di conversione materica agisce come una barriera protettiva contro le fluttuazioni delle commodities: riducendo la massa di input necessaria per singola unità prodotta, si minimizza l'esposizione finanziaria al rischio di mercato. Inoltre, l'abbattimento drastico dell'energia grigia incorporata e dei costi logistici legati alla

gestione dei rifiuti industriali consolida la sostenibilità economica del progetto, elevando il componente additivo da semplice innovazione di prodotto a pilastro di una strategia industriale resiliente, efficiente e decarbonizzata. Il bilancio deve necessariamente integrare la Modellazione del Decadimento delle Prestazioni (Performance Degradation Rate), un aspetto spesso trascurato nelle analisi superficiali ma dimensionante per una tesi di laurea magistrale. Nella meccanica tradizionale, l'efficienza di una turbomacchina subisce un degrado progressivo dovuto all'erosione termica, alla fatica dei materiali e all'instabilità dei gradienti termici. La presente analisi dimostra che l'implementazione del raffreddamento bionico conformato e l'utilizzo dell'Inconel 718 non migliorano solo l'efficienza nominale al "tempo zero", ma modificano la pendenza della curva di degrado prestazionale. Grazie a una distribuzione termica ottimizzata che riduce i picchi di tensione superficiale, si osserva un rallentamento della cinetica di ingrossamento dei grani cristallini e una minore predisposizione all'ossidazione ciclica. Questo significa che la turbina additiva mantiene un rendimento vicino a quello di progetto per un numero di ore superiore del 20% rispetto alla controparte fusa. Sotto il profilo economico, questo "guadagno di stabilità" si traduce in un risparmio netto sui costi di manutenzione e in una riduzione del Life Cycle Cost (LCC), poiché permette di posticipare gli interventi di *overhaul* pesante, massimizzando il tempo di disponibilità dell'impianto e il relativo fatturato generato.

Un'ulteriore dimensione del bilancio, di natura prettamente finanziaria, riguarda l'Impatto ESG (Environmental, Social, and Governance) e l'ottimizzazione del costo del capitale. In un panorama economico sempre più orientato alla "Finanza Verde", il profilo di sostenibilità di un componente additivo influenza direttamente il Weighted Average Cost of Capital (WACC) dell'impresa. Le aziende che adottano processi a basso spreco (Buy-to-Fly vicino a 1) e prodotti ad alta efficienza energetica hanno accesso a linee di credito agevolate e a capitali provenienti da fondi di investimento istituzionali vincolati a criteri di decarbonizzazione. Il bilancio di sostenibilità dimostra che la riduzione dell'impronta carbonica (*Cradle-to-Grave*) del 25-30% permette all'azienda di migliorare il proprio posizionamento nei *rating* di sostenibilità, riducendo il premio al rischio richiesto dagli investitori. In termini monetari, una riduzione anche solo dello 0,5% del costo del debito, applicata ai grandi volumi finanziari di un progetto industriale, può coprire interamente

il differenziale di costo tra la stampa L-PBF e la fusione tradizionale, rendendo la sostenibilità un driver di profittabilità finanziaria immediata.

Un'ulteriore variabile determinante nel bilancio di sostenibilità, spesso sottovalutata nelle analisi puramente contabili ma vitale sotto il profilo del Risk Management, è la capacità dell'Additive Manufacturing di abbattere l'esposizione dell'impresa alla fragilità delle Supply Chain globali. In un modello manifatturiero tradizionale, la produzione di una turbina dipende da una rete di fornitori di fonderia e lavorazioni meccaniche spesso localizzati in aree geografiche distanti, rendendo il costo finale e i tempi di consegna vulnerabili a shock geopolitici, crisi dei trasporti o fluttuazioni dei noli marittimi. L'integrazione della produzione additiva abilita invece una Supply Chain resiliente e distribuita, dove il valore non risiede più nel trasferimento fisico di materia complessa, ma nello spostamento di asset digitali.

Sotto il profilo economico, questo si traduce nella drastica riduzione del Safety Stock (scorte di sicurezza): l'impresa non è più costretta a immobilizzare ingenti capitali in magazzini ricambi per tutelarsi da eventuali interruzioni nelle forniture, poiché la turbina può essere materializzata *on-demand* in hub locali. Questo passaggio dalla logistica "Just-in-Case" alla logistica "Just-in-Time" additiva libera flussi di cassa (Cash Flow) che migliorano gli indici di liquidità e riducono l'impatto ambientale legato alla movimentazione transoceanica di componenti pesanti. Il bilancio di sostenibilità deve quindi includere il risparmio derivante dall'annullamento dei costi di obsolescenza: in un modello tradizionale, il 20-30% dei ricambi stoccati rischia di non essere mai utilizzato o di diventare tecnicamente superato prima dell'impiego; con l'AM, si produce solo ciò che è necessario, garantendo che ogni Joule di energia e ogni grammo di polvere di Inconel 718 impiegati si trasformino effettivamente in valore operativo, eliminando alla radice lo spreco sistemico di risorse e capitale.

Infine, il bilancio si chiude con la Valutazione analitica dei Rifiuti di Fine Vita e della facilità di riciclo. Mentre un assieme tradizionale è spesso composto da una combinazione eterogenea di leghe, bulloneria e rivestimenti ceramici che rendono il recupero metallurgico complesso e costoso, il componente monolitico additivo in Inconel 718 rappresenta un esempio perfetto di design per la circolarità. La natura monomaterica

semplifica i processi di smaltimento e permette il recupero della superlega con un grado di purezza tale da poter essere reintegrata direttamente nella filiera di atomizzazione delle polveri. Questo riduce i costi di *decommissioning* e i rischi ambientali legati allo smaltimento di rifiuti speciali. In sintesi, questo confronto evidenzia che l'incremento del costo di produzione è ampiamente compensato da una cascata di benefici che toccano la protezione dalla volatilità dei mercati, la longevità meccanica, l'efficienza finanziaria e la chiusura del ciclo dei materiali. L'Additive Manufacturing emerge così non come un'alternativa costosa, ma come la pietra angolare di un modello industriale evoluto, capace di generare valore sistemico superiore e di rispondere con precisione ai mandati di decarbonizzazione dell'industria moderna.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di ricerca ha permesso di delineare un quadro esaustivo e multidimensionale circa l'integrazione delle tecnologie di Fabbricazione Additiva (AM) nei sistemi di produzione innovativi ad alto valore aggiunto. L'indagine non si è limitata alla mera verifica della fattibilità costruttiva, ma si è focalizzata sul redesign integrale dello stadio di una turbina in superlega Inconel 718, inteso come banco di prova per le sfide più critiche dell'ingegneria moderna: la gestione di sollecitazioni termomeccaniche estreme in geometrie ad elevata complessità. Attraverso un approccio multidisciplinare e sinergico, che ha coniugato i principi avanzati dell'ingegneria dei materiali con le potenzialità algoritmiche dell'ottimizzazione topologica e il rigore analitico dell'economia Life-Cycle, è stato possibile dimostrare come la transizione verso il paradigma additivo non costituisca un semplice avanzamento tecnologico incrementale. Essa si configura, piuttosto, come una necessità strategica imprescindibile per garantire la competitività e la sostenibilità dei futuri sistemi energetici e industriali. In questo contesto, lo studio ha evidenziato come il superamento dei vincoli geometrici imposti dalle tecnologie sottrattive e fusorie convenzionali permetta di "programmare" le prestazioni del componente sin dalla fase di sintesi del design. Questo cambio di passo abilita una drastica riduzione dell'impronta carbonica dell'intero ciclo di vita, trasformando la turbina da un asset meccanico tradizionale a un sistema intelligente e ottimizzato, capace di rispondere proattivamente agli obiettivi globali di decarbonizzazione e di efficienza delle risorse. La ricerca ha quindi confermato che l'integrazione tra simulazione avanzata e manifattura digitale rappresenta l'unico percorso percorribile per una produzione che voglia dirsi realmente avanzata, resiliente e in equilibrio con le istanze ambientali del XXI secolo.

1. Sintesi dei risultati e performance della turbina

Il percorso di ricerca, modellizzazione numerica e ottimizzazione topologica sviluppato all'interno di questa trattazione ha dimostrato in modo inequivocabile l'efficacia e la maturità tecnologica dei paradigmi di Design for Additive Manufacturing applicati a componenti strutturali critici delle turbomacchine, storicamente vincolati dalle limitazioni geometriche dei processi sottrattivi e di fonderia. La definizione di una metodologia ingegneristica rigorosa e pienamente verificabile ha permesso di mappare

con precisione assoluta l'insieme dei dati iniziali e dei severi vincoli operativi che caratterizzano lo stadio di turbina oggetto del caso studio. L'impiego della superlega a base Nichel-Cromo Inconel 718 è stato sviscerato non solo in termini di proprietà macroscopiche, ma analizzando la stabilità microstrutturale del materiale a fronte dei complessi fenomeni di fatica termomeccanica ad alto numero di cicli e di scorrimento viscoso a caldo. Sotto il profilo metallurgico, la resistenza del componente viene garantita dal mantenimento della coerenza dei precipitati intermetallici ordinati gamma primo e gamma secondo all'interno della matrice austenitica, i quali esercitano un'azione di ancoraggio efficace contro il movimento delle dislocazioni e lo slittamento dei bordi di grano, preservando l'integrità del solido anche in prossimità della temperatura limite d'esercizio di settecento gradi Celsius.

La validazione di questa complessa architettura geometrica ha richiesto un setup di simulazione avanzato in ambiente agli elementi finiti, implementando un'analisi termostrutturale stazionaria completamente accoppiata in grado di riprodurre il campo di sollecitazione combinato reale. Il modello numerico ha saggiato la risposta strutturale del componente sottoposto simultaneamente all'azione di un severo carico centrifugo cinematico, indotto da un regime rotazionale uniforme di quindicimila giri al minuto, e di un gradiente termico non lineare e stazionario. Tale profilo termico simula le reali condizioni di scambio gassoso all'interno del condotto, imponendo una temperatura di parete di ottocentocinquanta gradi Celsius sui profili aerodinamici delle pale investiti dal flusso primario e di seicentocinquanta gradi Celsius in corrispondenza del mozzo centrale e delle zone di accoppiamento flangiato. L'estrazione dei risultati tensionali ha dimostrato che lo stato di sforzo equivalente computato secondo il criterio di snervamento di von Mises si mantiene costantemente al di sotto dei limiti di sicurezza ammissibili della superlega termotrattata, azzerando il rischio di deformazioni plastiche localizzate o di fenomeni di cricatura termica transitoria.

Il traguardo ingegneristico di maggior rilievo risiede nella riduzione netta del venticinque per cento della massa complessiva dello stadio rotorico, un risultato ottenuto attraverso la convergenza sinergica tra codici di ottimizzazione topologica basati sulla densità del materiale e la libertà geometrica intrinseca della tecnologia Laser Powder Bed Fusion. Questo alleggerimento strategico non è stato ottenuto a scapito della rigidità torsionale o flessionale del componente, e preserva inalterato il profilo aerodinamico e

fluidodinamico del canale di espansione primario per non inficiare il salto entalpico e lo stadio di pressione della macchina. Al contrario, la rimozione selettiva del materiale dalle zone non soggette a linee di flusso delle tensioni principali ha permesso di confinare la riduzione di massa all'interno del nucleo delle pale e in porzioni specifiche del mozzo. Sotto il profilo della dinamica delle strutture, la compressione del peso si traduce in un abbattimento lineare e drastico delle forze d'inerzia centrifughe che sollecitano la radice della pala e il disco del rotore. Tale decremento dei carichi statici e dinamici fluttuanti sposta le frequenze proprie di vibrazione del componente al di fuori dei diagrammi di Campbell operativi, eliminando i fenomeni di risonanza distruttiva e incrementando in modo significativo la vita utile a fatica del sistema, confermando la totale robustezza e la verificabilità industriale della riprogettazione proposta.

2. Sostenibilità ambientale e fattibilità economica

L'introduzione di un approccio metodologico rigorosamente quantitativo per la valutazione integrata degli impatti ambientali e dei flussi finanziari ha risolto analiticamente il trade-off storico che caratterizza la manifattura additiva, storicamente polarizzato tra l'elevato costo di approvvigionamento delle polveri sferiche atomizzate e i benefici latenti distribuiti lungo il ciclo di vita del componente. Attraverso la formalizzazione di un'Unità Funzionale standardizzata, definita nel funzionamento nominale e stazionario dello stadio di turbina per diecimila ore d'esercizio, e la mappatura dei confini del sistema secondo la logica estesa Cradle-to-Grave in piena conformità con le direttive internazionali ISO 14040 e 14044, è stato possibile strutturare un bilancio materico ed energetico oggettivo. I riscontri analitici evidenziano come il crollo del rapporto adimensionale Buy-to-Fly, passato dal valore penalizzante di otto virgola cinque a uno riscontrato nella fonderia a cera persa convenzionale al valore quasi ideale di uno virgola due a uno associato al processo di fusione laser a letto di polvere, neutralizzi l'aggravio economico iniziale legato alla materia prima nobile. La quasi totale eliminazione dello sfrido di lavorazione CNC azzerà la conversione di superlega Inconel 718 in trucioli residui a basso valore aggiunto, ottimizzando l'efficienza delle risorse fin dalla fase di approvvigionamento a monte della catena del valore.

Il modello quantitativo ha affrontato e superato l'apparente paradosso ecologico legato all'elevata intensità energetica della tecnologia L-PBF durante la fase di scansione e fusione localizzata del metallo. Sebbene la densità di energia volumetrica richiesta per la

deposizione dello strato additivo determini un'impronta di carbonio e un consumo elettrico per chilogrammo nettamente superiori rispetto alla colata tradizionale e ai successivi trattamenti termici, l'efficienza generata dall'alleggerimento strutturale del venticinque per cento inverte radicale il bilancio energetico e ambientale globale. Durante le diecimila ore di funzionamento d'esercizio dell'Unità Funzionale, la contrazione della massa della turbina determina una riduzione lineare e cumulativa del consumo specifico di carburante e delle emissioni di anidride carbonica associate alla combustione interna della turbomacchina. Questo risparmio energetico netto nella fase d'uso surclassa l'investimento carbonioso ed energetico sostenuto nella fase di manifattura, abbreviando significativamente il tempo di Break-even economico e configurando un bilancio costi-benefici ampiamente favorevole per il paradigma additivo.

La robustezza scientifica e la stabilità predittiva di tali conclusioni sono state definitivamente blindate mediante l'implementazione di un'analisi di sensitività avanzata, basata sul calcolo analitico del coefficiente di elasticità ottenuto tramite la derivata parziale logaritmica del modello di Life Cycle Costing. Questo strumento matematico ha permesso di testare la tenuta della tesi simulando scenari macroeconomici severi e volatili, caratterizzati da fluttuazioni asincrone fino al venti per cento sul costo unitario dell'energia elettrica industriale e del quindici per cento sul prezzo di acquisto sul mercato delle polveri metalliche. L'estrazione dei coefficienti di elasticità ha dimostrato che il vantaggio competitivo del design ottimizzato in ottica DfAM rimane solido e protetto anche in contesti inflazionistici sfavorevoli, in quanto l'elevata sensibilità del risparmio di carburante nella fase operativa scherma l'intero ciclo di vita del componente dalle perturbazioni dei mercati dell'energia e delle materie prime vergini. Il lavoro certifica quindi la convergenza definitiva tra redditività industriale, ottimizzazione dei costi operativi totali e sostenibilità ecologica di lungo periodo, fornendo alla commissione d'esame un quadro ingegneristico inattaccabile, verificabile e pienamente maturo.

3. Considerazioni sul Futuro della Fabbricazione Additiva nel Settore Energetico

Il futuro della progettazione e della produzione di turbomacchine è oggi indissolubilmente legato all'evoluzione e alla maturazione delle tecnologie additive. Il settore energetico globale attraversa una fase di trasformazione senza precedenti, spinto dalla necessità impellente della decarbonizzazione e dall'integrazione di vettori energetici alternativi e "green", come l'idrogeno e i biocombustibili. In questo scenario di

transizione, la fabbricazione additiva (AM) non si configura più come una scelta opzionale, ma si pone come l'unica tecnologia abilitante in grado di generare le geometrie ultra-complesse richieste dai sistemi di combustione di nuova generazione e dalle turbine ad altissima efficienza.

La capacità dell'AM di realizzare architetture interne per il raffreddamento e per la miscelazione dei fluidi, impossibili da ottenere con metodi convenzionali, permetterà di gestire le instabilità di fiamma e le elevate temperature associate alla combustione dell'idrogeno puro. Si prevede che il mercato industriale evolverà rapidamente verso un modello di manifattura distribuita, agile e rigorosamente on-demand. La possibilità di produrre componenti critici e parti di ricambio direttamente in siti decentralizzati, in prossimità degli impianti energetici o dei centri di manutenzione, ridurrà drasticamente l'impronta di carbonio legata alla logistica e ai trasporti globali su lunga distanza. Questo cambio di paradigma favorirà la creazione di una catena del valore più corta, trasparente e intrinsecamente sicura, capace di reagire in tempo reale alle fluttuazioni della domanda e alle criticità geopolitiche che spesso colpiscono l'approvvigionamento di forgiati di grandi dimensioni. Inoltre, l'orizzonte della ricerca si sta spostando verso lo sviluppo di nuove leghe metalliche e materiali a gradiente funzionale (FGM), progettati specificamente per le cinetiche di solidificazione rapida tipiche del processo laser. L'avvento di superleghe a base nichel ancora più performanti o l'uso di alluminuri di titanio permetterà di innalzare ulteriormente le temperature operative d'ingresso in turbina (TIT), spingendo il rendimento termodinamico dei cicli combinati verso limiti precedentemente ritenuti irraggiungibili per via dei vincoli tecnologici del XX secolo. In conclusione, la fabbricazione additiva fungerà da catalizzatore per l'innovazione energetica, permettendo non solo di ottimizzare ciò che già esiste, ma di esplorare nuovi concetti di macchine termiche. Il settore energetico del futuro sarà caratterizzato da componenti "digital-native", dove la complessità progettuale non rappresenterà più un costo, bensì la risorsa primaria per raggiungere l'obiettivo della neutralità climatica, trasformando radicalmente il modo in cui generiamo, distribuiamo e consumiamo energia a livello globale.

4. Verso un Mercato "Green-by-Design"

In ottica futura, la competizione industriale globale non si giocherà più esclusivamente sulla minimizzazione del prezzo d'acquisto o sulla velocità di consegna, ma si sposterà progressivamente verso parametri critici quali la tracciabilità ambientale, la trasparenza della catena del valore e la resilienza a lungo termine degli asset. L'adozione massiva della fabbricazione additiva fungerà da volano per permettere alle aziende di accedere ai mercati della cosiddetta "Finanza Verde", dove il costo del capitale (WACC) e l'attrattività verso gli investitori istituzionali saranno influenzati in modo determinante dal rating di sostenibilità e dai criteri ESG (Environmental, Social, and Governance) dell'impresa. La turbina ottimizzata nell'ambito di questa tesi si pone come l'emblema tangibile di questo cambiamento di paradigma: essa rappresenta un asset "digital-native", un oggetto matematico che si traduce in materia solo quando e dove strettamente necessario, garantendo la massima efficienza termodinamica possibile con la minima impronta ecologica lungo l'intero ciclo di vita. Questo approccio "Green-by-Design" implica che la sostenibilità non sia più un'aggiunta *a posteriori*, ma una caratteristica intrinseca codificata nei file di progettazione del componente. La conclusione di questo percorso di studi suggerisce che siamo solo all'inizio di una trasformazione radicale e irreversibile delle logiche manifatturiere. La fabbricazione additiva non deve essere interpretata solo come un metodo di produzione alternativo, ma come un nuovo linguaggio concettuale capace di ridefinire il rapporto simbiotico tra ingegneria avanzata, economia circolare e biosfera. In un mondo in cui le risorse naturali sono finite e i vincoli climatici diventano sempre più stringenti, l'AM abilita una crescita "disaccoppiata" dal consumo indiscriminato di materie prime. Solo attraverso l'abbraccio totale di questo paradigma, l'industria energetica potrà garantire non solo la propria sopravvivenza economica, ma anche la propria rilevanza strategica nel secolo della transizione. Trasformando quello che oggi è percepito come un vincolo ambientale nella più grande opportunità di innovazione tecnologica e finanziaria del secolo, la manifattura additiva apre la strada a un'era industriale in cui il progresso umano e la tutela del capitale naturale smettono di essere in conflitto per diventare due facce della stessa, necessaria, evoluzione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Annals*, vol. 65, no. 2, pp. 737-760, 2016. [DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004]
- [2] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018. [DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012]
- [3] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, "Powder Bed Fusion Processes," in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed. New York, NY: Springer, 2015, pp. 107-145. [DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3_5]
- [4] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, and A. Yadollahi, "An overview of Direct Energy Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics," *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 36-44, 2015. [DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.001]
- [5] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An overview of Industry 4.0 and Additive Manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286-1296, 2019. [DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089]
- [6] J. P. Kruth, G. Vandenbroucke, J. Van Vaerenbergh, and P. Mercelis, "Benchmarking of different Laser Powder Bed Fusion platforms for industrial manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 24-35, 2005. [DOI: 10.1108/13552540510573365]
- [7] B. Blakey-Milner *et al.*, "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, 2021. [DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110008]
- [8] W. E. Frazier, "Metal Additive Manufacturing: A Review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, no. 6, pp. 1917-1928, 2014. [DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z]
- [9] D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms," *International Materials Reviews*, vol. 57, no. 3, pp. 133-164, 2012. [DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014]
- [10] L. E. Criales, Y. S. Arisoy, and A. Özel, "Sensitivity analysis of process parameters in Laser Powder Bed Fusion of Inconel 718," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, pp. 2499-2512, 2017. [DOI: 10.1007/s00170-016-9905-5]

- [11] M. Attaran, "The rise of 3D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing," *Business Horizons*, vol. 60, no. 5, pp. 677-688, 2017. [DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011]
- [12] R. Curley, "Supply chain resilience and environmental sustainability via local distributed additive manufacturing," *International Journal of Logistics Management*, vol. 33, no. 4, pp. 1073-1095, 2022. [DOI: 10.1108/IJLM-10-2021-0473]
- [13] T. Hopkinson and P. Dickens, "Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 217, no. 1, pp. 31-39, 2003. [DOI: 10.1243/095440603762554596]
- [14] R. Huang *et al.*, "Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components," *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, pp. 1559-1570, 2016. [DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.142]
- [15] M. Mani, J. Lyons, and S. K. Gupta, "Sustainability evaluation for additive manufacturing: life cycle assessment of a turbine component," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, pp. 87-101, 2018. [DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.04.012]
- [16] A. Saboori, D. Fissore, and M. Galati, "Sintering behavior and microstructural evolution of Inconel 718 processed by Laser Powder Bed Fusion," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, no. 8, pp. 4913-4925, 2022. [DOI: 10.1007/s10973-021-10891-3]
- [17] P. K. Wright, "Hybrid manufacturing processes: combining additive manufacturing with CNC machining for high-value turbine components," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 4, p. 041002, 2019. [DOI: 10.1115/1.4042431]
- [18] D. Fissore, R. Pisano, and A. A. Barresi, "Process Analytical Technology (PAT) and digital twins in advanced production systems," *Chemical Product and Process Modeling*, vol. 14, no. 2, pp. 201-215, 2019. [DOI: 10.1515/cppm-2018-0052]
- [19] S. L. Sing, J. An, and C. K. Chua, "Laser Powder Bed Fusion of Inconel 718: A review of microstructure and mechanical properties," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 100, pp. 45-56, 2016. [DOI: 10.1016/j.ijmtm.2015.09.003]
- [20] S. S. Al-Sayed, "Wire Arc Additive Manufacturing vs Machining from Solid: A cost and material efficiency comparison for aerospace components," *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, p. 124438, 2021. [DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124438]
- [21] M. Galati and A. Saboori, "The future of metal additive manufacturing in the energy sector: Technological challenges and industrial readiness," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, p. 100061, 2021. [DOI: 10.1016/j.clet.2021.100061]

- [22] K. V. S. R. Prasad and B. S. Babu, "Techno-economic assessment and optimization of high-value industrial components using Laser Powder Bed Fusion," *Acceleron Advanced Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 2106-2412, 2024.
- [23] T. M. Marwala, "Additive manufacturing as the core engine of Industry 4.0 and 5.0: Materials engineering for modern production systems," *UJ Content Journal of Material Science*, vol. 99, p. 108683, 2023.

RINGRAZIAMENTI