



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

SVILUPPO E VALIDAZIONE DI UN MODELLO DI
COSTO PER IL PROCESSO WIRE ARC ADDITIVE
MANUFACTURING

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A COST MODEL FOR
WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

MARIO DEL VICARIO

CORRELATORE:

ING. SIMONE GALLOZZI

Magari di corsa, ma mai a cuor leggero.

Ing. Nicola Materazzi

A chi, nonostante tutto, non ha mai smesso di provarci.

I. Sommario

I. Sommario	i
II. Elenco delle figure	iii
III. Elenco delle tabelle	v
1 Introduzione	1
2 Stato dell'arte	3
2.1 Tecnologie additive metalliche	3
2.2 Tecnologia WAAM	4
2.2.1 Sistemi di movimentazione	5
2.2.2 Sorgenti di saldatura	8
2.2.3 Sistemi di alimentazione	8
2.2.4 Sistemi di protezione del bagno fuso	10
2.3 Materiali	10
2.3.1 Acciai al carbonio	11
2.3.2 Acciai inossidabili	11
2.3.3 Titanio	12
2.3.4 Leghe di alluminio	12
2.3.5 Superleghe a base nichel	12
2.4 Parametri di processo	13
2.4.1 Parametri generali	13
2.4.2 Parametri geometrici e di processo	14
2.4.3 Parametri di deposizione	14
2.4.4 Geometria del cordone	16
2.4.5 Parametri gas di protezione	18
2.4.6 Parametri termici	18
2.4.7 Parametri energetici	19
2.4.8 Parametri su tempi di processo	19
2.4.9 Parametri macchina	20
2.4.10 Parametri del substrato	20
2.4.11 Parametri economici	20
2.5 Macchinari	21
2.5.1 RoboWAAM	22
2.5.2 Vallourec	22

2.5.3 OneOffRobotics	23
3 Modello di costo	25
3.1 Struttura e logica generale del modello	25
3.2 Parametri di input e output	26
3.3 Database del modello e sintesi finale	38
4 Caso studio	41
4.1 Introduzione	41
4.2 Confronto dei parametri	43
5 Risultati e discussione	46
6 Conclusioni	50
6.1 Sviluppi futuri	53
7 Bibliografia	55
IV.Ringraziamenti	59

II. Elenco delle figure

Figura 2.1 Robot antropomorfo	6
Figura 2.2 Sistema automazione cartesiano	7
Figura 2.3 Robot antropomorfo equipaggiato con tavola rotante.....	7
Figura 2.4 Sistema di alimentazione MIG/MAG	9
Figura 2.5 Sistema di alimentazione CMT by Fronius	9
Figura 2.6 Suddivisione componente in layer	14
Figura 2.7 Rapporto WFS, TS e larghezza cordone.....	16
Figura 2.8 Geometria del cordone [6]	17
Figura 2.9 Sezione del cordone: (a) WFS=5 m/ min, TS=41 cm/ min; (b) WFS=5.1 m/ min, TS=42 cm/ min; (c) WFS=6.1 m/ min, TS=50 cm/ min; (d) WFS=6.5 m/ min, TS=53.5 cm/ min [31]	18
Figura 2.10 RoboWAAM	22
Figura 2.11 Configurazione Vallourec	22
Figura 2.12 Configurazione OneOffRobotics.....	23
Figura 3.1 Schema logico modello Excel	25
Figura 3.2 Parametri geometrici di input del foglio Designs.....	27
Figura 3.3 Parametri geometrici calcolati nel foglio Designs	27
Figura 3.4 Parametri Process Input in MaterialandManufacturing.....	28
Figura 3.5 Parametri Component in MaterialandManufacturing.....	29
Figura 3.6 Parametri Tool Path in MaterialandManufacturing.....	30
Figura 3.7 Parametri Wire in MaterialandManufacturing	31
Figura 3.8 Parametri Non-Productive in MaterialandManufacturing	31
Figura 3.9 Parametri Manufacture in MaterialandManufacturing	32
Figura 3.10 Parametri Shielding Gas in MaterialandManufacturing	32
Figura 3.11 Parametri Energy in MaterialandManufacturing	33
Figura 3.12 Parametri Substrate in MaterialandManufacturing	34
Figura 3.13 Parametri Machine Parameter in MaterialandManufacturing	35
Figura 3.14 Parametri Processing Time in MaterialandManufacturing.....	35
Figura 3.15 Bead Cost in MaterialandManufacturing	36
Figura 3.16 Ripartizioni voci di costo calcolate dal modello	36

Figura 4.1 Rilevamento quote ruota dentata	41
Figura 4.2 Disegno CAD ruota dentata diametro 96mm	42
Figura 4.3 Disegno CAD ruota dentata scalata con diametro 70mm	42
Figura 5.1 Grafico scostamento parametri di processo	46
Figura 5.2 Grafico risultati di processo.....	47
Figura 5.3 Grafico confronto velocità di processo.....	47
Figura 5.4 Grafico scostamento parametri economici	48
Figura 5.5 Grafico confronto costo finale	49

III. Elenco delle tabelle

Tabella 1 RoboWAAM.....	22
Tabella 2 Vallourec.....	22
Tabella 3 OneOffRobotics.....	23
Tabella 4 Fogli di lavoro presenti nel modello Excel.....	25
Tabella 5 Parametri del database paesi.....	38
Tabella 6 Parametri del database macchine.....	39
Tabella 7 Parametri del database materiali.....	39
Tabella 8 Confronto parametri di processo.....	44
Tabella 9 Confronto parametri economici.....	44
Tabella 10 Confronto risultati di processo.....	45
Tabella 11 Risultati economici inserendo gli input dell'articolo nel modello.....	45

1 Introduzione

Negli ultimi anni la manifattura additiva, intesa come processo di realizzazione di oggetti a partire da file CAD 3D mediante deposizione di materiale strato dopo strato [1], ha assunto un ruolo sempre più rilevante nel panorama industriale. Questo interesse è legato alla possibilità di produrre componenti complessi con elevata riduzione degli sprechi di materiale, classici delle più conosciute tecnologie sottrattive, riducendo i tempi di sviluppo e la necessità di controllare la relazione tra processo, microstruttura e proprietà finali dei componenti metallici [2].

Tra queste tecnologie, la *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) rappresenta una soluzione particolarmente promettente per la produzione di componenti metallici con elevata flessibilità produttiva, il che comporta, in ambito aziendale, una veloce risposta per la prototipia ed elevata duttilità produttiva anche su piccolissime serie, soprattutto quando produttività e costo del materiale sono più rilevanti della precisione tipica dei processi a letto di polvere [3].

Questo processo si basa sull'utilizzo di un arco elettrico come fonte di energia e un filo metallico come materiale d'apporto [4], con il conseguente elevato tasso di deposizione, costi relativamente contenuti a confronto di altre tecnologie additive metalliche e la possibilità di utilizzare svariati materiali.

Come precedentemente riportato, la tecnologia WAAM si basa su processi di saldatura ad arco elettrico [5], in particolare sui procedimenti di *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), comunemente denominati *Metal Inert Gas* (MIG) e *Metal Active Gas* (MAG), dal *Gas Tungsten Arc* (GTAW/TIG) e dal *Plasma Arc Welding* (PAW) [4]. Nelle tecnologie appena illustrate si utilizza un filo di apporto continuo che, fondendo grazie al calore generato dall'arco elettrico, contribuisce alla formazione del bagno di saldatura. Nel processo MIG si impiega principalmente argon come gas di protezione inerte, il quale non reagisce con il bagno di saldatura ed è generalmente utilizzato per la lavorazione di leghe non ferrose; difatti la scelta del gas influenza la stabilità dell'arco, la protezione del bagno fuso e la geometria del cordone [5]. Nel processo MAG, invece, si utilizzano anidride carbonica (CO_2) oppure miscele di Argon e CO_2 ; tali gas favoriscono una maggiore penetrazione e una migliore stabilità dell'arco, risultando particolarmente adatti alla saldatura di acciai al carbonio e basso-legati.

Pur presentando numerosi vantaggi, la diffusione della WAAM in ambito industriale è ancora limitata da alcune criticità quali tensioni residue, distorsioni, accuratezza geometrica classica dei processi ad alto apporto termico [6]. Anche la stima economica risulta complessa a causa dei numerosi parametri, quali ad esempio la *Wire Feed Speed* (WFS), ovvero la velocità di avanzamento del filo, la *Travel Speed* (TS), ovvero la velocità di avanzamento della torcia, il tasso di deposizione, tempi produttivi e non produttivi e molti altri [7], [8].

Numerose pubblicazioni scientifiche riportano diversi approcci alla modellazione dei costi, tuttavia, molti modelli risultano poco parametrizzati e non tengono conto di tutti criteri per una modellazione adeguatamente precisa.

Alla luce di tali considerazioni, la presente tesi si propone di sviluppare un modello di stima del costo per il processo WAAM, considerando la quasi totalità delle variabili presenti, tutti i valori riguardanti le varie fasi di stampa, ma prestando attenzione anche al processo in toto, come ad esempio il consumo energetico, il costo dell'argon ed il compenso dell'operatore suddivisi per stati di produzione, i tempi produttivi ed i tempi morti, la totalità dei materiali saldabili di apporto presenti da poter scegliere e i corrispettivi materiali del substrato.

Il lavoro svolto ha previsto una fase iniziale di analisi di numerose letterature scientifiche relative a processi WAAM e ai modelli di costo sviluppati per tecnologie additive. Successivamente sono stati individuati i parametri di principale importanza per la modellazione del processo. Sulla base di tali elementi è stato sviluppato un modello parametrico di stima del costo, implementato in ambiente computazione, al fine di fornire risultati coerenti indipendentemente dalla geometria e dalla complessità del componente considerato e un agevole inserimento dei parametri di processo.

Il modello è stato poi applicato ad un caso studio rappresentativo [9], al fine di valutare la veridicità, confrontare i risultati ottenuti ed evidenziare i fattori maggiormente influenti sul costo finale, affinché sia possibile ottimizzare l'aspetto tecnico-economico del processo.

Infine, vengono discussi possibili sviluppi futuri, tra cui l'estensione ad un numero ancora maggiore di materiali utilizzabili e configurazioni di processo, nonché la possibilità di evitare seconde lavorazioni e garantire qualità dei prodotti.

2 Stato dell'arte

Il presente capitolo si propone di analizzare lo stato dell'arte relativo al processo di *Wire Arc Additive Manufacturing*, ponendo particolare attenzione ai principi di funzionamento, ai parametri di processo, ai materiali utilizzati, alle applicazioni industriali, nonché ai modelli proposti in letteratura.

Il motivo è quello di evidenziare le principali lacune presenti negli studi esistenti, al fine di contestualizzare e motivare il contenuto sviluppato nella presente tesi.

Nel confronto con la letteratura, il modello sviluppato nella presente tesi si colloca tra i modelli analitici e *Activity Based Costing*, poiché suddivide il costo WAAM in voci direttamente collegate alle attività e ai parametri di processo. In particolare, il riferimento a Cranfield è il modello più vicino alla struttura adottata, perché considera materiale di apporto, substrato, deposizione, setup e tempi non produttivi [10]. Rispetto a tale base, il modello proposto introduce una struttura più operativa e aggiornabile grazie alla piattaforma Excel, introducendo inventari di materiale, macchine, gas, parametri per il paese di produzione, energia e substrato.

2.1 Tecnologie additive metalliche

Nel contesto della produzione additiva metallica possono essere classificate in diverse categorie. Le più diffuse includono *Power Bed Fusion* (PBF), *Direct Energy Deposition* (DED) di cui ne fa parte la WAAM, *Binder Jetting* e *Sheet Lamination*, secondo la classificazione dei processi AM metallici riportata da Donghong Ding in [6]. Questa classificazione è coerente con la distinzione generale tra processi basati su polvere, filo o altri feedstock, scelta che influenza dimensioni producibili, produttività e costo del componente [2].

I processi PBF utilizzano una sorgente energetica, in generale laser o fascio elettronico, per fondere selettivamente strati di polvere metallica situata su di un piano di lavoro [11]. Tali tecnologie consentono di ottenere elevata precisione dimensionale e buona qualità superficiale, ma presentano le principali limitazioni in termini di dimensioni dei componenti producibili a causa delle limitate dimensioni della camera di lavoro e degli elevati costi di materia prima e manutenzione [6].

Al contrario, nei processi appartenenti alla categoria DED, il materiale viene fornito sotto forma di polvere o filo metallico, fuso poi direttamente durante la deposizione. Queste tecnologie sono particolarmente indicate per la realizzazione di componenti di medie e grandi dimensioni, per operazioni di riparazione e per applicazioni in cui è richiesta un'elevata produttività [5]. Tuttavia, la progettazione per additive manufacturing deve tenere conto anche di vincoli tecnologici, economici e di processo, poiché la libertà geometrica non elimina la necessità di valutarne costo, orientamento, supporti, post-processing e qualità finale [12].

In questo contesto, i processi *Direct Energy Deposition* e in particolare il *Wire Arc Additive Manufacturing*, rappresentano una soluzione promettente per superare alcune limitazioni delle tecnologie basate sul letto di polvere, offrendo un ottimo compromesso tra produttività, costo e flessibilità per componenti metallici di media o grande dimensione [13].

Nei paragrafi successivi verrà approfondita la tecnologia WAAM, analizzando nel dettaglio tutti i principali sottosistemi e parametri, considerando anche gli aspetti che la circondano come accuratezza, difetti e tensioni residue [3].

La letteratura mostra che i modelli di costo per AM sono stati sviluppati principalmente per tecnologie a letto di polvere, mentre i modelli specifici per WAAM sono meno numerosi [14]. Questa differenza è importante perché PBF e WAAM hanno fattori di costo diversi: nelle tecnologie a polvere pesano molto macchina, polvere e post-processing, mentre nella WAAM troviamo materiale di apporto, substrato, tempo di deposizione, setup, gas e finitura. Il modello sviluppato si concentra quindi sulla famiglia DED a cui appartiene la WAAM e non si limita ad un confronto generico tra le tecnologie additive, ma traduce le caratteristiche tecniche del processo di saldatura a filo in voci di costo calcolabili. In questo senso si differenzia dai lavori di revisione, che forniscono le tecniche e i metodi di stima, ma non ci forniscono uno strumento parametrico completo applicabile al caso studio della tesi [14].

2.2 Tecnologia WAAM

La Wire Arc Additive Manufacturing è una tecnologia basata sulla Direct Energy Deposition, tramite l'apporto diretto di materiale sottoforma di filo metallico e fuso tramite arco elettrico durante la deposizione [5].

Il processo deriva direttamente dalle tecnologie di saldatura ad arco, come MIG/MAG, TIG e CMT. Quest'ultima è una tecnologia sviluppata da Fronius, la *Cold Metal Transfer* che ha il vantaggio di saldare materiale con un basso apporto di calore dato il moto ciclico del filo di apporto che al contrario delle tecnologie già conosciute, dove ha una sola direzione e velocità, nella CMT il materiale avanza e retrocede lasciando cadere la goccia di materiale fuso e distanziandosi subito dopo [15].

Dal punto di vista impiantistico, la WAAM utilizza già consolidati nella saldatura industriale, quali generatore, torcia, sistema di alimentazione filo, gas di protezione, mentre il moto è fornito da robot antropomorfi o sistemi cartesiani CNC/Granty [16]. I principali sottoinsiemi sono quindi:

- sistemi di movimentazione, generalmente rappresentato da un robot antropomorfo o da un sistema cartesiano gantry;
- sorgente di saldatura;
- sistema di alimentazione filo, comprensivo di torcia di saldatura;
- sistema di protezione del bagno fuso, realizzato mediante gas inerte.

Tuttavia, la complessità del processo aumenta significativamente quando si considerano i parametri operativi e le loro interazioni: corrente, tensione, velocità filo, velocità torcia, distanza torcia pezzo, gas di protezione e strategia di deposizione che l'insieme influenza direttamente la geometria del cordone e sulla quindi corrispettiva resa finale [5], [6], [3]. Tali aspetti saranno poi approfonditi nel capitolo successivo.

Il confronto con i modelli presenti in letteratura conferma che la WAAM deve essere analizzata come una catena di processo e non come una sola fase di deposizione di saldatura. Il modello Cranfield [10] considera infatti deposizione, materiale, substrato, finitura, setup e tempi non produttivi, fornendo quindi la base più coerente con il modello sviluppato in questa tesi. Kokare et al. [9] adottano invece un approccio più esteso, includendo anche progettazione, G-code, ispezione e spedizione. Il modello qui proposto si pone in una posizione intermedia, mantenendo la logica di scomposizione per attività, ma approfondendo in modo più dettagliato i parametri WAAM gestibili tramite Excel.

2.2.1 Sistemi di movimentazione

I sistemi di movimentazione rivestono un ruolo fondamentale, in quanto determinano la traiettoria della torcia di saldatura e, di conseguenza, la geometria del componente realizzato. Per questo la generazione di un corretto tool path è considerato un requisito centrale nei processi [14].

Gli obiettivi principali che il sistema deve garantire sono:

- precisione nel posizionamento e spostamento della torcia;
- ripetibilità del processo;
- flessibilità per la realizzazione di geometrie complesse.

2.2.1.1 Robot antropomorfi

I robot antropomorfi a sei assi (*Figura 2.1*) rappresentano la soluzione più diffusa nella WAAM, dati i loro numerosi vantaggi:

- elevata flessibilità geometrica;

- adattabilità a diverse applicazioni;
- ampia libertà di posizionamento della torcia;
- elevata libertà di movimento con corrispettive traiettorie complesse.

Pur presentando numerosi vantaggi, l'applicabilità si limita a causa di alcuni svantaggi come, ad esempio, la possibilità di realizzare pezzi con dimensioni mediamente contenute, la perdita di precisione a causa della catena cinematica e la gestione accurata della direzione di alimentazione del filo di apporto [14].



Figura 2.1 Robot antropomorfo

2.2.1.2 Sistemi cartesiani

Nei sistemi cartesiani gantry (*Figura 2.2*) o CNC il movimento della torcia avviene lungo gli assi X-Y-Z attraverso viti senza fine o guide lineari. Questo permette di avere un aumento di precisione e ripetibilità data la regolarità delle traiettorie, oltre ad avere un semplice controllo della cinematica e in base alle dimensioni del macchinario la possibilità di lavorare su dimensioni elevate con traiettorie regolari [16].

Questo sistema di automazione presenta però anche degli svantaggi: il principale è la minore libertà di movimento della torcia rispetto ai robot antropomorfi a sei assi; di conseguenza, geometrie complesse possono richiedere strategie di deposizione più articolate o l'integrazione di assi aggiuntivi [17].



Figura 2.2 Sistema automazione cartesiano

2.2.1.3 Sistemi ibridi

I sistemi ibridi riguardano sia i robot antropomorfi che i sistemi cartesiani, implementando questi sistemi di automazione con tavole rotanti o posizionatori (*Figura 2.3*), aumentando gli assi disponibili e migliorando l'accessibilità al componente. La letteratura sui manipolatori per la saldatura evidenzia che i posizionatori consentono la manipolazione multi-asse del pezzo rispetto alla torcia, facilitando il raggiungimento della posizione tecnologicamente più favorevole [4], [17]

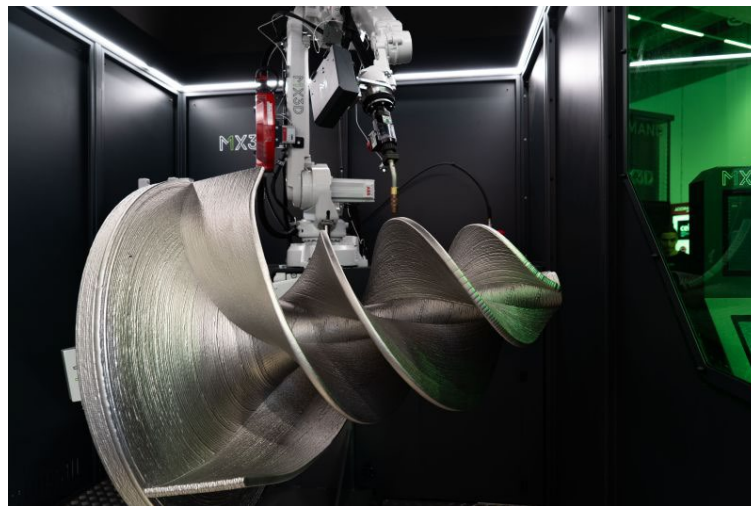


Figura 2.3 Robot antropomorfo equipaggiato con tavola rotante

A differenza dei modelli proposti dalla letteratura i quali assumono un'unica macchina generica, il modello della tesi permette di associare le diverse macchine presenti ai parametri relativi ad esse come il costo macchina, volume di lavoro rendendo più immediato il confronto tra macchine ibride e robot antropomorfi. Rimane invece fuori dal modello, come limite, una valutazione cinematica dettagliata della traiettoria, che nei lavori sperimentali viene spesso gestita da software CAM o simulazione robotica.

2.2.2 Sorgenti di saldatura

Le sorgenti di saldatura rappresentano l'elemento centrale del processo, responsabili della generazione dell'arco elettrico e quindi della rispettiva fusione del materiale di apporto. I sistemi GMAW quindi MIG e MAG sono i maggiormente utilizzati per le maggiori velocità di deposizione [5], mentre il CMT, sviluppato da Fronius permette una deposizione più stabile e a minore apporto termico [5], [15]. Confrontando i modelli presenti, Catalano et al. [8] modellano in modo specifico il processo CMT, separando deposizione, standby e finitura. Chernovol et al. [18] invece non propongono un modello di costo completo, ma confrontano GWAM convenzionale e CMT mostrando che la scelta influenza la geometria del cordone, la produttività e la finitura ottenuta. Nel modello sviluppato la sorgente non viene fisicamente simulata, ma viene rappresentata tramite parametri inseribile dall'utente, come potenza, WFS, velocità di avanzamento, costo macchina e gas. Ciò rende il modello più semplice da utilizzare, pur mantenendo il collegamento tra scelta tecnologica e costo finale.

2.2.3 Sistemi di alimentazione

I sistemi di alimentazione del filo, comprensivi di torcia di saldatura, sono il sottosistema che gestisce il trasporto, la fusione e la deposizione del materiale. Sono tra gli elementi più critici data la diretta influenza su stabilità dell'arco, qualità del cordone, tasso di deposizione e, quindi, sulla sua geometria [5], [18].

Nei sistemi tradizionali derivati dai processi MIG/MAG, l'alimentazione avviene tramite rulli motorizzati, che spingono il filo lungo una guaina fino alla torcia visionabile in *Figura 2.4*. Questa configurazione, detta PUSH, risulta adeguata in molte applicazioni, ma può presentare limitazioni dato l'elevato rischio di aggrovigliamento del filo, in particolare se si utilizzano piccoli diametri o materiali particolarmente duttili.



Figura 2.4 Sistema di alimentazione MIG/MAG

Per superare tali criticità, nei sistemi più avanzati, si utilizza la tecnologia *Cold Metal Transfer CMT* presente in *Figura 2.5*, adottando quindi una configurazione PUSH-PULL. Ciò avviene tramite i due sistemi di azionamento, uno posizionato nel feeder principale che spinge il filo (PUSH), e uno integrato nella torcia, che lo tira (PULL). Questa doppia azione consente di mantenere il filo in una condizione di trazione controllata, riducendo di molto il rischio di aggrovigliamento [18], [15].



Figura 2.5 Sistema di alimentazione CMT by Fronius

Nel modello Cranfield il tempo di saldatura è calcolato principalmente a partire dal diametro del filo, WFS e volume depositato [10]. Catalano et al. [8] collegano invece WFS alla potenza, all'energia per unità di lunghezza e al tempo di raffreddamento, evidenziando così che l'aumento di produttività non sempre riduce il costo totale. Il modello sviluppato considera WFS, costo del filo, massa del filo e cambio bobina, ampliando quindi la parte economica legata all'alimentazione rispetto a modelli più sintetici, ma non include ancora una legge che colleghi automaticamente WFS alla potenza.

2.2.4 Sistemi di protezione del bagno fuso

Durante la fase di deposizione, il metallo fuso risulta particolarmente sensibile alla contaminazione con i gas presenti nell'atmosfera, quali ossigeno, azoto e umidità, che possono causare fenomeni di ossidazione, formazione di porosità e degrado delle proprietà meccaniche. Per questo motivo, vengono adottati diversi sistemi di protezione, basati principalmente sull'utilizzo di gas inerti o debolmente attivi [5], [10].

Il sistema più semplice e diffuso è quello basato sull'erogazione del gas direttamente dalla torcia di saldatura. In questa configurazione, il gas di protezione, tipicamente Argon o miscele (ad esempio Argon e CO_2), viene convogliato direttamente attraverso l'ugello della torcia, creando una zona localizzata di atmosfera controllata attorno all'arco e al bagno fuso. Questo approccio è sicuramente il più semplice ed il più economico, ma molto sensibile a correnti di aria e non efficace durante il raffreddamento del materiale [19].

Per migliorare la protezione, specialmente con leghe attive, si impiegano sistemi di tipo *trailing shield*. Questi dispositivi consistono in schermi supplementari posizionati posteriormente alla torcia, che erogano gas inerte sul cordone appena solidificato, mantenendo un'atmosfera controllata anche durante il raffreddamento [20].

Il gas di protezione è trattato in modo diverso nei modelli analizzati. In Cranfield [10] ad esempio il costo del gas è una voce autonoma della fase di deposizione, calcolata in funzione della portata, del tempo di deposizione, del costo e del volume della bombola. Nel modello [9] invece il gas è incluso all'interno del costo macchina, assieme ad altre voci operative. Il modello sviluppato nella tesi mantiene la voce del gas separata, rendendo più trasparente l'effetto della portata sul costo finale, risultando utile soprattutto per materiali più sensibili all'ossidazione.

2.3 Materiali

I materiali impiegati nel processo WAAM sono leghe metalliche sotto forma di filo, analogamente ai processi di saldatura ad arco. I filamenti maggiormente utilizzati sono acciai al carbonio, acciai inox, leghe di alluminio, leghe di titanio e superleghe a base nichel [13], [21]. La scelta del materiale influenza in maniera significativa la stabilità di processo, le proprietà finali del componente e i costi di produzione, rappresentando quindi un parametro fondamentale nella modellazione economica del processo [21].

Il materiale rappresenta uno dei principali punti di contatto tra stato dell'arte e modello di costo. Il modello Cranfield [10] limita l'analisi a titanio, alluminio e acciaio, ma mostra chiaramente che la convenienza della WAAM aumenta quando il materiale è costoso e il Buy-to-Fly della lavorazione per asportazione di truciolo è elevato. Anche documenti industriali come [22] sottolineano che la riduzione di spreco di materia prima è uno dei motivi principali della riduzione dei costi nella WAAM. Il modello sviluppato estende questa logica attraverso il Material Inventory, in cui, densità, costo unitario, temperatura, portata gas e tutti i restanti parametri relativi alla deposizione possono essere aggiornati per i diversi materiali. In questo modo la scelta del materiale non resta descrittiva, ma diventa un input che modifica massa del filo, costo del materiale, tempi e consumi.

2.3.1 Acciai al carbonio

Gli acciai al carbonio, solitamente utilizzati nella lega ER70S, sono la soluzione più semplice e tra le più diffuse nel WAAM [13], [10], grazie alla loro elevata saldabilità e ai costi contenuti. Questi materiali consentono una deposizione stabile con ridotto rischio di difetti e cricche. Tuttavia, presentano limitate proprietà meccaniche e una scarsa resistenza alla corrosione, rendendoli quindi più adatti ad applicazioni strutturali o prototipali, pur richiedendo verifiche sulla qualità interna [23].

2.3.2 Acciai inossidabili

Gli acciai inossidabili eccellono nel WAAM, rappresentando una delle famiglie di materiale maggiormente utilizzate soprattutto in quelle austenitiche quali 304L e 316L, grazie alla loro elevata saldabilità, utilità strutturale, ridotta sensibilità ai difetti e buone proprietà meccaniche che consentono la realizzazione anche di grandi componenti con elevati tassi di deposizione [13]. Studi dedicati alla realizzazione di pareti sottili in 316L confermano l'interesse per questa lega in termini di formabilità, produttività e proprietà meccaniche [24]. La letteratura evidenzia però anche anisotropia e variazioni microstrutturali legate alla direzione di deposizione, aspetti rilevanti per la qualificazione strutturale [16].

2.3.3 Titanio

Le leghe di titanio presentano un'altra categoria di materiali molto utilizzati, grazie al loro eccellente rapporto resistenza/peso, alla resistenza alla corrosione e alle proprietà alle alte temperature. La lega maggiormente utilizzata nel WAAM è la Ti6Al4V, data la sua ampia applicabilità in ambito areospace e medicale ma in particolare, come sopra citato, per le elevate proprietà meccaniche [25]. Le proprietà della microstruttura, assieme alla elevata resistenza a fatica e al creep, lo rendono ideale per le strutture portanti o sottoposte ad elevato stress, anche se fortemente legato alla metodologia di svolgimento e temperatura della deposizione [26]. Permangono difficoltà di processo, legate principalmente all'affinità del titanio, insieme agli altri elementi di lega. La lavorazione richiede quindi una protezione efficace dall'atmosfera, poiché la contaminazione da ossigeno, idrogeno e azoto possono portare a infragilimenti e porosità molto dannose a livello strutturale tramite difetti e infragilimenti [13], [20].

2.3.4 Leghe di alluminio

Le leghe di alluminio simboleggiano un altro materiale di apporto comunemente utilizzato nel WAAM grazie specialmente alla loro bassa densità, associata ad una buona resistenza alla corrosione e a un'elevata resistenza specifica. Il difetto principale riguarda la porosità, con l'intrappolamento di idrogeno e la rottura dello strato di ossido durante la deposizione, ovviabili solamente con un processo altamente controllato e l'impiego di un gas di protezione ad elevata purezza. Un'ulteriore criticità è rappresentata dal fenomeno dell'hot cracking, ovvero dalla nucleazione e propagazione di cricche durante la fase di solidificazione, imputabile all'elevato ritiro volumetrico del materiale e ai forti gradienti termici, accentuati dall'elevata conducibilità termica dell'alluminio che favorisce una rapida dissipazione del calore [5]. In particolare, E.M. Ryan et. al. in [27] mostrano che nella lega AA2319 la porosità può essere influenzata anche dalla variabilità del filo e dalla sua finitura superficiale, mentre altri studi confermano, sempre per la stessa lega, la rilevanza di strategia di deposizione e trattamento termico per le proprietà della microstruttura [28].

2.3.5 Superleghe a base nichel

Le superleghe a base di nichel, come Inconel 718 e Inconel 615, conferiscono al WAAM la possibilità di produrre particolari con elevate prestazioni per ambienti ad alte temperature, tipico nei settori areospace e nucleare [5]. Nel caso dell'Inconel 718, la presenza di strutture dendritiche e fasi laves possono richiedere trattamenti termici o lavorazioni termomeccaniche per migliorarne le proprietà finali [5]; inoltre prove su leghe tipo Hastelloy X mostrano che corrente, velocità del filo, velocità torcia e portata del gas influenzano la forma, la rugosità, l'ossidazione e la microstruttura del cordone [29].

2.4 Parametri di processo

In questo capitolo verranno presentati e spiegati alcuni parametri di processo che rappresentano l'insieme delle variabili tecniche, geometriche, termiche, energetiche ed economiche che definiscono il modo in cui viene realizzato un componente mediante WAAM successivamente utilizzati dal modello sviluppato nel prossimo capitolo. Essi non hanno solo una funzione descrittiva, ma influenzano direttamente la quantità di materiale depositato, i tempi di costruzione, la qualità del cordone, il consumo energetico e il costo finale. Per questo motivo, nel modello sviluppato in Excel ogni parametro viene collegato a uno specifico foglio di calcolo o a un database, in modo da trasformare le informazioni di processo in risultati economici confrontabili.

Nel Wire Arc Additive Manufacturing il risultato finale dipende dall'interazione tra sistema di movimentazione, sorgente di saldatura, sistema di alimentazione del filo, gas di protezione, materiale d'apporto, substrato e strategia di deposizione. La corretta definizione dei parametri consente di ottenere un cordone stabile e ripetibile, limitando difetti geometrici, eccessi di materiale, tempi morti e costi non necessari.

2.4.1 Parametri generali

Il WAAM è classificato come un processo di *Direct Energy Deposition*, caratterizzato da cicli ripetuti di fusione, deposizione e raffreddamento [7]. In questo contesto, i parametri generali definiscono il contesto operativo, la quantità del materiale depositato e la ripetibilità del processo:

- dimensioni di massima del componente: indica gli ingombri principali del pezzo, generalmente lungo gli assi X, Y e Z. utile per verificare se il componente rientra nel volume utile di stampa della macchina e stimare lo spazio occupato.
- Volume del componente: rappresenta il volume geometrico finale del componente. Nel modello è di fondamentale importanza perché, assieme alla densità del materiale, consente di calcolare la massa teorica del componente finito.
- Peso del componente: è la massa del pezzo ottenuta dal prodotto tra volume e densità del materiale.
- Materiale del componente: identifica il materiale d'apporto utilizzato per costruire il pezzo.
- Materiale del substrato: indica il materiale della piastra di base sulla quale viene depositato il primo layer.
- Volume del materiale in eccesso per successiva finitura: è la quantità di materiale depositato appositamente oltre il volume del pezzo per garantire un sovrametallo lavorabile.
- Volume dei supporti: rappresenta il materiale aggiuntivo necessario a sostenere parti inclinate, sporgenze o zone geometricamente critiche.

2.4.2 Parametri geometrici e di processo

I parametri geometrici e di processo descrivono la modalità con cui il componente viene realizzato attraverso la sovrapposizione di strati di materiale, chiamati layer. Nel WAAM, la geometria finale non dipende esclusivamente dal modello CAD, ma anche dalla strategia di deposizione e dalla discretizzazione del componente in layer. Difatti un sezionamento non corretto comporta disallineamento, come mostrato in Figura 2.6, data la divisione con uno spessore costante. Questo si verifica quando il modello sezionato con uno spessore costante non corrisponde al modello solido originale, visibile in Figura 2.6b. Per ovviare a tali problemi, Yu Ming Zhang in [30] stipula la strategia di slicing adattivo, ovvero lo spessore dello strato può essere regolato automaticamente entro un certo livello per adattarsi al modello, come mostrato in Figura 2.6c [14].

- Altezza layer: è lo spessore verticale di ogni strato depositato.
- Riempimento: indica la percentuale di riempimento interno del componente.
- Totale volume depositato: è il volume complessivo di materiale che la macchina deve depositare, includendo componente, sovrametallo ed eventuali supporti
- Volume finale del componente: è il volume utile del pezzo dopo la finitura, ovvero con le dimensioni del componente finito come da disegno CAD.

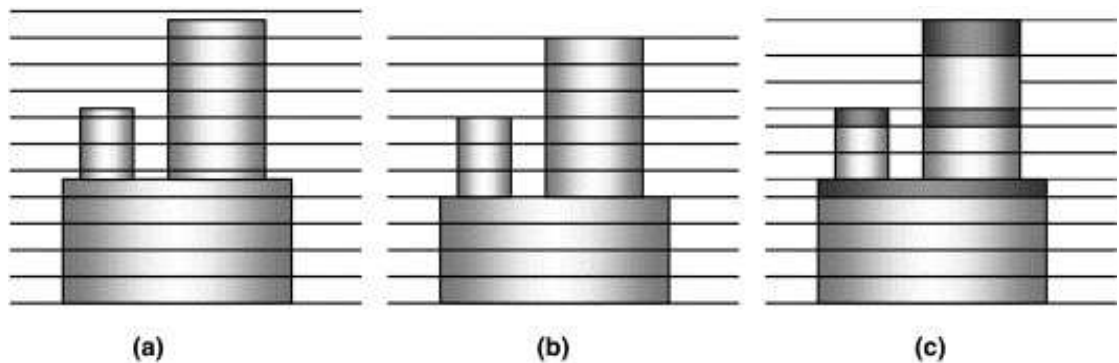


Figura 2.6 Suddivisione componente in layer

2.4.3 Parametri di deposizione

I parametri di deposizione costituiscono il nucleo del processo WAAM, in quanto regolano direttamente l'interazione tra materiale d'apporto e sorgente di calore. Essi determinano il tasso di deposizione, la geometria del cordone influenzando quindi sia la qualità che le proprietà del componente finale. Tra i parametri principali vi sono la velocità di alimentazione del filo (WFS) e la velocità di avanzamento della torcia (TS). Il loro controllo è di fondamentale importanza per garantire qualità fisiche e dimensionali, come successivamente esplicitato nei capitoli seguenti [6].

2.4.3.1 WFS

La *Wire Feed Speed* è la velocità di alimentazione del filo, controlla quindi la quantità di materiale che viene immessa nel bagno fuso.

2.4.3.2 TS

La *Travel Speed* è la velocità di avanzamento della torcia, la quale influisce principalmente sull'apporto termico per unità di lunghezza.

2.4.3.3 Rapporto tra WFS e TS

Dal punto di vista fisico, la WFS definisce la quantità di materiale che viene immessa nel bagno fuso per unità di tempo, mentre la TS determina la velocità con cui tale materiale viene depositato nel substrato. Il loro rapporto può quindi essere interpretato come il volume di materiale depositato per unità di lunghezza. Aumentando questo rapporto, verrà fornito più materiale rispetto alla velocità con cui la torcia si muove, il che comporta un aumento di temperatura e dimensione del cordone. Viceversa, diminuendo il rapporto si otterrà una saldatura più fredda e con un cordone più sottile.

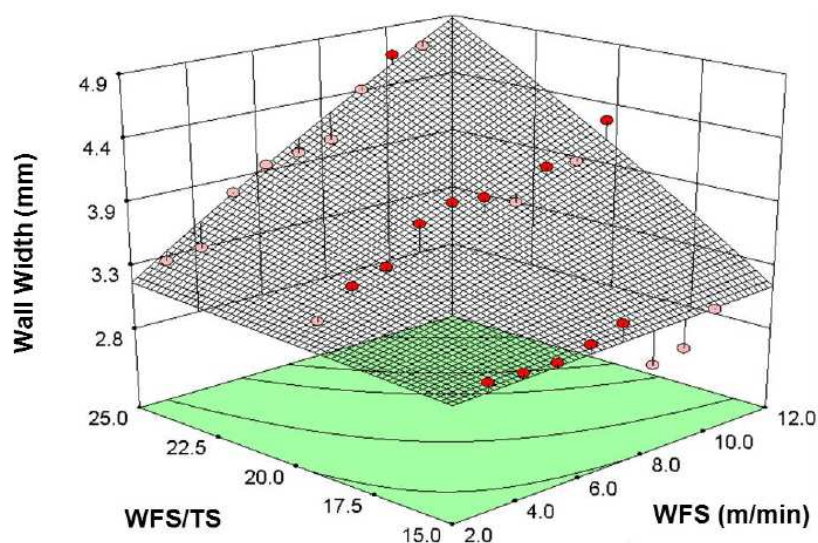


Figura 2.7 Rapporto WFS, TS e larghezza cordone

Questa relazione, come spiegato in [10] e visionabile in *Figura 2.7*, ha un impatto diretto sulla geometria del bagno di fusione, la cui sezione risulta proporzionale al rapporto tra i due parametri. In condizioni operative stabili. Mantenere tale rapporto costante permette di ottenere una deposizione uniforme lungo tutto il percorso, evitando variazioni dimensionali e migliorando quindi la qualità del componente finale. Difatti Zhai nell'articolo dimostra questo rapporto tramite la formula: $\frac{WFS}{TS} = costante$.

2.4.4 Geometria del cordone

Il WAAM è un processo di tipo *Direct Energy Deposition* (DED) basato sulla fusione di un filo metallico tramite arco elettrico, con formazione di un bagno fuso che solidifica gradualmente durante il movimento della torcia [7]. In questo contesto, la geometria del cordone dipende fortemente dai parametri di processi e dalle condizioni termiche. In *Figura 2.8* è rappresentato un cordone di saldatura in sezione con riportate le principali quote da tenere in considerazione e successivamente esplicate nei capitoli a seguire.

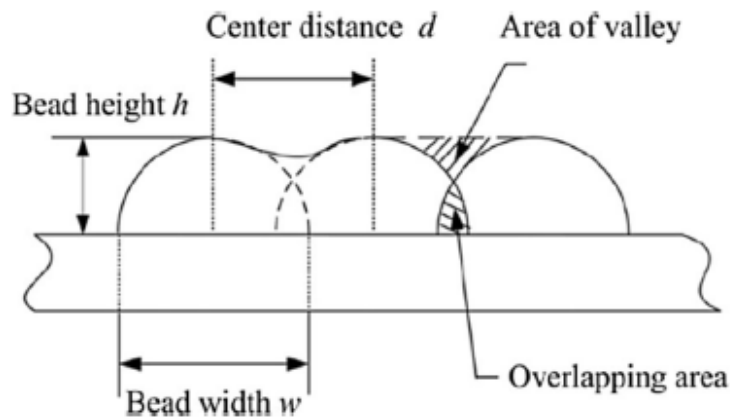


Figura 2.8 Geometria del cordone [6]

2.4.4.1 Larghezza del cordone

La larghezza del cordone rappresenta la dimensione trasversale del materiale depositato ed è dipendente dai parametri di deposizione, in particolare la velocità di alimentazione del filo e la velocità della torcia. Studi sperimentali mostrano che un aumento del materiale depositato comporta un aumento di larghezza, mentre un aumento di velocità tendono a ridurla [31]. Inoltre, un maggiore apporto termico favorisce l'espansione del bagno fuso, aumentando la larghezza, come riportato da [26].

2.4.4.2 Sezione del cordone

La sezione del cordone nel processo WAAM identifica l'area trasversale del materiale depositato ed è strettamente correlata alla quantità di materiale fuso. Un aumento della sezione comporta un aumento della produttività e della velocità di deposizione, ma può ridurre l'accuratezza e peggiorare la finitura superficiale. Al contrario, sezioni troppo ridotte possono compromettere la continuità della deposizione tra layer successivi. La sezione del cordone generalmente ha forma semiellittica come osservabile nell'immagine (Figura 2.9) sottostante con riportati i valori di WFS e TS calcolati da [31].

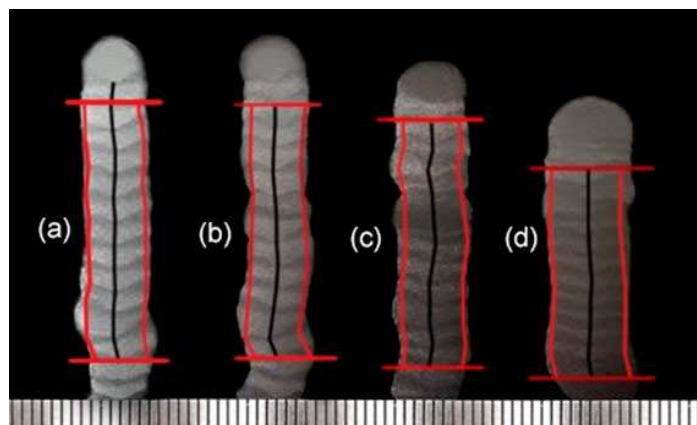


Figura 2.9 Sezione del cordone: (a) WFS=5 m/min, TS=41 cm/min; (b) WFS=5.1 m/min, TS=42 cm/min; (c) WFS=6.1 m/min, TS=50 cm/min; (d) WFS=6.5 m/min, TS=53.5 cm/min [31]

2.4.5 Parametri gas di protezione

Il gas di protezione svolge un ruolo essenziale, garantendo l'isolamento del bagno fuso dall'ambiente esterno e contribuisce alla stabilità dell'arco elettrico, poiché eventuali contaminazioni possono compromettere le proprietà metallurgiche del componente [31]. Studi condotti su processi di saldatura e additive manufacturing dimostrano che una protezione non adeguata può portare a difetti [4].

- Portata: è la quantità di gas erogata nell'unità di tempo, solitamente espressa in L/min o L/h. deve essere sufficiente a proteggere il bagno fuso, ma valori troppi elevati aumentano il consumo e possono disturbare anche la stabilità dell'arco.
- Consumo totale: è il volume complessivo di gas utilizzato durante la lavorazione.
- Costo unitario: è il prezzo del gas riferito all'unità di volume, ad esempio €/L o €/Nm³. Inserito nel modello, permette di trasformare il consumo totale in costo economico.

2.4.6 Parametri termici

Il processo è caratterizzato da una sequenza continua di fusione e raffreddamento che determina la crescita progressiva del componente [7]. Una gestione non ottimale delle condizioni termiche può portare a deformazioni, anisotropia e difetti metallurgici, classici di saldature eseguite con processo non corretto. Secondo [26], il controllo del ciclo termico rappresenta uno dei fattori chiave per la buona riuscita dei componenti prodotti nei processi additivi metallici.

- Warm up: indica la fase iniziale di riscaldamento o preparazione termica della macchina, del sistema di saldatura o del componente. Può comprendere l'avvio dell'impianto e il raggiungimento di condizioni operative stabili.
- Cool down: indica invece la fase di raffreddamento necessaria dopo una deposizione o tra layer successivi. Serve ad evitare temperature eccessive, deformazioni o peggioramenti metallurgici.

2.4.7 Parametri energetici

L'elevata efficienza del processo WAAM risiede, rispetto alle tecnologie sottrattive, nel minore spreco di materiale, il che comporta una maggiore efficienza economica e una componente rilevante sia dal punto di vista economico che ambientale. Tuttavia, la distribuzione dei consumi energetici tra le varie fasi del processo deve essere considerata per una corretta modellazione dei costi. Secondo [32], l'analisi energetica è fondamentale per valutare la bontà dei processi additivi.

- Costo unitario: prezzo dell'energia elettrica, solitamente espresso in €/kWh, permettendo la conversione dei consumi macchina in costo economico.
- Consumo cool down: energia assorbita durante le fasi di raffreddamento, nelle quali la macchina può restare accesa pur non depositando materiale.
- Consumo warm up: energia utilizzata nella fase di avvio e riscaldamento iniziale.
- Consumo durante la fase di stampa: energia assorbita durante la deposizione vera e propria, cioè quando arco, alimentazione filo, movimentazione e sistemi ausiliari sono in funzione.
- Consumo durante i tempi morti: energia utilizzata mentre l'impianto è acceso ma non sta depositando, ad esempio durante le pause, attese, cambio fase o posizionamenti.

2.4.8 Parametri su tempi di processo

Il tempo totale di produzione nel WAAM è composto da diverse fasi operative, considerando quindi oltre alla costruzione, anche i tempi di set-up, raffreddamento e tutte le operazioni sotto elencate. Studi sulla modellazione di costi dimostrano che il controllo dei tempi di processo rappresentano una delle principali leve di ottimizzazione nei processi additivi [7].

- Tempo set-up: tempo necessario per preparare la lavorazione, includendo fissaggio del substrato, impostazioni macchina, controllo del filo, verifica gas e caricamento del programma. Incide sul costo soprattutto in produzioni piccole o piccoli lotti.
- Tempo deposizione: è il tempo effettivo in cui la torcia deposita materiale. Dipende dal percorso, velocità di avanzamento, quantità di materiale e strategia di costruzione.
- Tempo warm up: è il tempo dedicato alla fase iniziale di avvio macchina.
- Tempo cool down: tempo di raffreddamento necessario per mantenere il componente entro limiti termici accettabili.
- Tempi morti: tempi non produttivi nei quali non avviene la deposizione, ad esempio attese, posizionamenti, controlli o spostamenti ma senza deposizione.
- Tempo carico/scarico pezzo: tempo necessario per montare il substrato o il componente in macchina e rimuoverlo a fine lavorazione.

2.4.9 Parametri macchina

I parametri macchina descrivono le caratteristiche tecniche ed economiche del sistema WAAM rappresentando un fattore rilevante nella valutazione del processo, includendo costi di investimento, di manutenzione e ammortamento. Secondo la letteratura, il costo della macchina e il suo utilizzo influenzano la competitività del WAAM rispetto ai processi tradizionali.

- Costo orario: si tratta del costo associato a un'ora di utilizzo della macchina.
- Costo acquisto: è l'investimento iniziale necessario per acquistare l'impianto, comprensivo di robot, generatore di saldatura, sistemi di alimentazione, controlli e accessori principali.
- Costi manutenzione: sono i costi necessari al mantenimento efficiente dell'impianto, includendo interventi periodici, ricambi, usura dei componenti ed assistenza.
- Potenza assorbita: indica la potenza elettrica richiesta dalla macchina nelle varie fasi operative.

2.4.10 Parametri del substrato

La deposizione avviene direttamente su una base plate che consente di supportare il materiale durante i primi layer. La scelta del materiale e del relativo spessore influiscono sui gradienti termici e sulle tensioni residue, rendendo la sua scelta di fondamentale importanza nella progettazione del processo [26].

- Materiale: indica il materiale della piastra di base. In genere deve essere compatibile con il materiale depositato per evitare problemi metallurgici o di adesione, oltre che incidere sul costo.
- Volume: è il volume geometrico del substrato, calcolato per stimare la quantità di materiale utilizzato.
- Massa: ottenuta moltiplicando il volume del substrato per la densità del materiale per permettere poi di ricavare il costo in base al prezzo al chilogrammo.
- Possibilità di riutilizzo: indica se il substrato può essere riutilizzato per altre costruzioni. Se riutilizzabile, il suo costo sarà ripartito su molti più componenti, fornendo così un peso minore al costo unitario del pezzo.

2.4.11 Parametri economici

I parametri economici consentono di tradurre le variabili tecniche di processo in termini di costo, fornendo uno strumento per la valutazione della sostenibilità industriale della tecnologia. Secondo [7], l'analisi dei costi è fondamentale per comprendere la competitività della tecnologia WAAM e ottimizzare il processo produttivo.

- Costo materiale di apporto: è il costo del filo utilizzato per la deposizione, generalmente espresso in €/kg. Moltiplicato poi per la massa del filo necessaria, determina una delle voci principali del costo WAAM.
- Costo substrato: rappresenta il costo della piastra di base utilizzata per la deposizione.
- Costo gas: è il costo associato al gas di protezione.
- Costo energia: è il costo dell'energia consumata durante le diverse fasi del processo, come warm up, cool down, deposizione e tutte le altre fasi che lo compongono.
- Costo tempi non produttivi: è il costo generato dalle fasi in cui la macchina è impegnata ma senza depositare materiale, come attese, pause e controlli.
- Costo set-up: costo associato alla preparazione della lavorazione.
- Costo operatore: rappresenta il costo della manodopera necessaria per preparare, controllare e gestire il macchinario.

2.5 Macchinari

I macchinari per la produzione di oggetti tramite tecnologia WAAM sono comunemente robot antropomorfi abbinati ad isole robotizzate e tavole mobili, come riportato nel capitolo 2.2.1.

Nel modello di costo presentato sono invece presenti macchinari che si basano sempre su piattaforma robot, ma sono acquistabili in determinate configurazioni, in modo tale da avere dei prezzi fissi e replicabili per l'acquisto e utilizzo dei macchinari stessi, e scorporare la complessità di preventivazione di un'isola robotizzata ipotizzando l'acquisto di ogni singolo componente separato.

2.5.1 RoboWAAM



Figura 2.10 RoboWAAM

Tabella 1 RoboWAAM

PARAMETRO	VALORE	UNITÀ
PLATE WIDTH	2000	mm
PLATE LENGTH	2000	mm
BUILDING HEIGHT	2000	mm
PRICE	900000	€

2.5.2 Vallourec

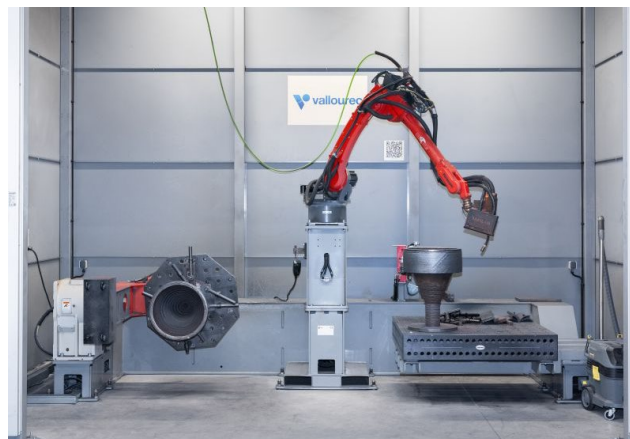


Figura 2.11 Configurazione Vallourec

Tabella 2 Vallourec

PARAMETRO	VALORE	UNITÀ
PLATE WIDTH	1000	mm
PLATE LENGTH	1000	mm
BUILDING HEIGHT	1000	mm
PRICE	500000	€

2.5.3 OneOffRobotics

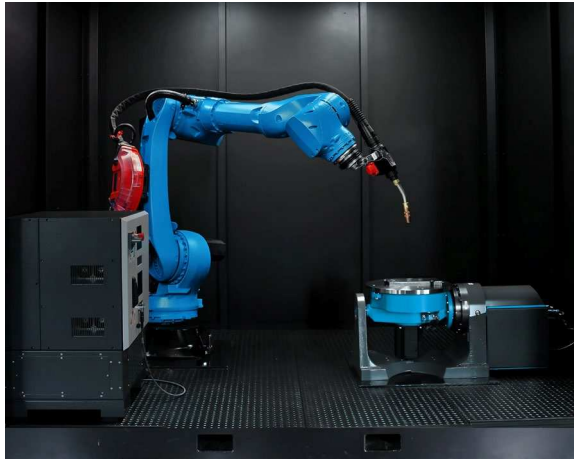


Figura 2.12 Configurazione OneOffRobotics

Tabella 3 OneOffRobotics

PARAMETRO	VALORE	UNITÀ
PLATE WIDTH	1000	mm
PLATE LENGTH	1000	mm
BUILDING HEIGHT	1000	mm
PRICE	300000	€

In conclusione dall'analisi dello stato dell'arte emerge che i modelli di costo applicati all'*Additive Manufacturing* e al *Wire Arc Additive Manufacturing* si basano principalmente sulla scomposizione del costo totale in diverse voci: materiale di apporto, costo macchina, energia, gas di protezione, substrato, tempi di deposizione, tempi non produttivi, set-up e lavorazioni di finitura. Questa impostazione permette di collegare il costo finale del componente sia ai parametri tecnici del processo sia alle attività necessarie per la sua realizzazione.

I principali driver di costo individuati in letteratura sono il volume depositato, la massa del filo, la velocità di alimentazione, la velocità di avanzamento della torcia, il tempo di produzione, il tasso di deposizione e il *Buy-to-Fly ratio*. Tuttavia, molti modelli risultano legati a casi studio specifici, a una determinata macchina o a ipotesi semplificate, rendendo più difficile la loro applicazione a scenari produttivi differenti.

Nel complesso, i modelli analizzati condividono quindi una base comune fondata sulla suddivisione dei costi e sull'utilizzo dei parametri di processo, ma presentano limiti in termini di flessibilità, implementazione e generalizzazione. Da questa analisi emerge l'importanza di disporre di uno strumento parametrico e modificabile, capace di organizzare in modo chiaro le principali voci tecniche ed economiche che influenzano il costo finale di un componente realizzato mediante WAAM.

3 Modello di costo

Il presente capitolo descrive il modello Excel sviluppato per la stima del costo di produzione di componenti realizzati tramite *Wire Arc Additive Manufacturing*. Il modello è stato costruito per collegare in maniera ordinata i dati geometrici del componente, i parametri tecnologici del processo, le caratteristiche della macchina, i database dei materiali e i costi unitari necessari alla valutazione economica finale con uno schema logico illustrato in *Figura 3.1*.

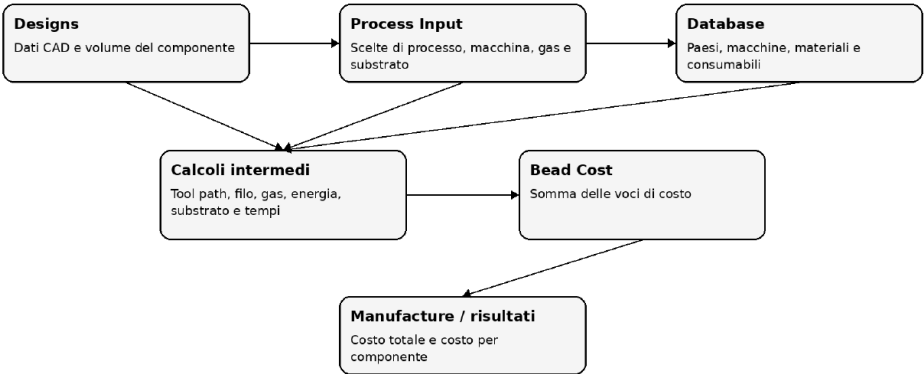


Figura 3.1 Schema logico modello Excel

3.1 Struttura e logica generale del modello

Il file Excel è composto da più fogli di lavoro, ognuno con una funzione specifica (*Tabella 4*). La separazione dei fogli consente di rendere il modello più leggibile e di distinguere in maniera chiara le sezioni di inserimento dati dalle sezioni di calcolo. La logica seguita è di tipo modulare: i dati vengono inseriti o selezionati nei fogli di input, vengono richiamati dai database e successivamente vengono trasformati in risultati tecnici ed economici nel foglio principale *MaterialandManufacturing*.

Tabella 4 Fogli di lavoro presenti nel modello Excel

Foglio	Funzione
Designs	Raccoglie i dati geometrici del componente ottenuti dal modello CAD e calcola alcune grandezze derivate, come massa e bounding box
MaterialandManufacturing	Rappresenta il foglio principale: contiene input di processo, output intermedi, tempi, consumi e costi finali
Country list	Elenco paesi selezionabili per il contesto produttivo

Country parameters inventory	Database dei costi unitari a seconda del paese scelto
Machine list	Elenco delle macchine WAAM selezionabili
Machine inventory	Database tecnico ed economico delle macchine
Material list	Elenco dei materiali di apporto e del substrato
Material inventory	Archivio delle proprietà fisiche, tecniche, economiche e di processo dei materiali

All'interno del modello i dati sono stati organizzati in tre categorie principali. La prima categoria è costituita dai parametri di input, cioè i dati che l'utilizzatore deve inserire o selezionare per definire il caso di studio. La seconda categoria è costituita dai parametri di output, ovvero i risultati calcolati automaticamente dal modello. La terza categoria è rappresentata dai database, che permettono di richiamare in modo automatico valori coerenti con macchina, materiale, gas e paese selezionati.

3.2 Parametri di input e output

I parametri di input sono le grandezze che definiscono il problema produttivo prima dell'esecuzione dei calcoli. Essi descrivono il componente, il materiale, il processo, la macchina, il substrato e le condizioni operative. La loro modifica aggiorna automaticamente gli output del modello, permettendo di simulare scenari produttivi differenti senza modificare la struttura delle formule ed ottenendo facilmente una quotazione.

I parametri di output invece sono le grandezze calcolate automaticamente dal modello a partire dai dati di input inseriti dall'utente e dalle relazioni implementate nei diversi fogli Excel. Essi rappresentano i risultati intermedi e finali della simulazione produttiva, descrivendo quantità di materiale necessaria, tempi di lavorazione, consumi del gas, energia, costi macchina e operatore e costo complessivo del componente. All'interno del capitolo, questi parametri corrispondono ai valori per i quali sono state riportate le formule di calcolo, poiché derivano direttamente dalle equazioni inserite nel modello Excel. La loro funzione è quella di trasformare i parametri tecnici e geometrici del processo in valori economici e produttivi, permettendo di valutare rapidamente l'incidenza delle singole voci di costo.

Il foglio Designs rappresentato in *Figura 3.2* e *Figura 3.3* raccoglie i dati provenienti dal CAD o dalla ricostruzione geometrica del componente. Questi valori rappresentano il punto di partenza del modello perché permettono di stimare volume, massa, ingombro del pezzo e materiale richiesto. Tra i dati principali sono presenti le dimensioni massime lungo X, Y e Z, l'area, il volume del componente finito, il perimetro, il materiale e il paese di produzione.

Parameter	Value	Unit	Description
Standard Inputs			
Size X	70	mm	dimensione massima lungo x
Size Y	70	mm	dimensione massima lungo y
Size Z	17	mm	dimensione massima lungo z (direzione distampa)
Area	4900	mm ²	area
Component Volume (finished)	22863	mm ³	volume effettivo del componente
Perimeter	335.19	mm	perimetro componente da CAD
Material	ER70S-6	-	materiale
Production country	Italy	-	paese di produzione
Detailed Inputs			
Support Volume	0	mm ³	-
Relative density of supports	20.00%	%	-
Support Volume %	0.00%	%	-
Volume to machine	0	mm ³	-

Figura 3.2 Parametri geometrici di input del foglio Designs

I parametri geometrici definiscono l'ingombro del componente, l'area occupata e i volumi derivati dal CAD sono dati di partenza che permettono di verificare la compatibilità con le macchine e di impostare le successive stime di tempo e materiale.

Computed parameters			
Bounding Box Volume	83300	mm ³	volume di massima del componente
Component Density	7850	kg/m ³	densità componente
Supports Density	1570	kg/m ³	densità supporti
Weight	0.17947455	kg	peso
Component Mass (finished)	0.1794745500	kg	massa

Figura 3.3 Parametri geometrici calcolati nel foglio Designs

I parametri calcolati traducono la geometria del componente in grandezze utili al modello economico. Volume di ingombro, densità, massa e supporti collegano il modello CAD alla quantità di materiale considerata.

La sezione *Process Input* (Figura 3.4), del foglio *MaterialandManufacturing* contiene i parametri principali necessari per configurare il processo WAAM. In questa sezione vengono selezionati macchina, materiale del substrato, gas di protezione, numero di componenti, numero di substrati e principali condizioni geometriche della costruzione.

Process Input			
Maximum productivity		1 -	Spuntare per avere il numero massimo di pz. sul piano 1 VERO 0 FALSO
Accuracy		1 -	spuntare per avere la massima precisione 1 VERO 0 FALSO
Machine Typology	OneOffRobotics	-	Macchina
Wire production place	Italy	-	paese di produzione filo
Substrate material	C45	-	materiale substrato
Gas for Manufacturing	Argon	-	gas inerte
Number of Components Input		1 n°	numero di pezzi che si vogliono stampare
Number of substrate Input		1 n°	numero di substrati che si vogliono utilizzare
Wire mass per roll		10 Kg	peso bobina filo
Part Build Efficiency		80.00%	efficienza della parte
Gas cylinder volume		100.00 L	litri di gas per bombola
Wire diameter		1 mm	diametro filo
Distance between component		10 mm	distanza desiderata tra i componenti
Infill		100.00%	riempimento
Layer Height		1 mm	altezza layer
Total volume		28579 mm3	volume pezzo con sovrametallo
Finished volume		22863 mm3	volume pezzo finito
Substrate thickness		15 mm	spessore substrato
Substrates used		1 n°	numero di substrati utilizzati
Substrate reusable		2 n° Job	numero di utilizzi substrato
Substrate X		1000 mm	dimensione X substrato
Substrate Y		1000 mm	dimensione Y substrato

Figura 3.4 Parametri Process Input in MaterialandManufacturing

- Maximum productivity: abilita una logica orientata a massimizzare il numero di componente sul piano di stampa. Serve quando l'obiettivo è ridurre il costo distribuendo i costi fissi su più pezzi.
- Accuracy: abilita una logica orientata alla precisione del singolo componente. Permette di privilegiare controllo geometrico e qualità del componente impostando l'altezza layer pari ad un millimetro.
- Machine typology: identifica la macchina o la configurazione WAAM scelta.
- Wire production place: indica il paese di produzione o approvvigionamento del filo.
- Substrate material: identifica il materiale della piastra base.
- Gas for manufacturing: indica il gas di protezione del bagno fuso utilizzato durante la deposizione.
- Number of component input: rappresenta il numero di componenti che l'utente intende produrre nella build.
- Number of substrate input: indica il numero di substrati previsti per la produzione.
- Wire mass per roll: rappresenta la massa disponibile in una bobina di filo.
- Part build efficiency: esprime l'efficienza con cui il materiale depositato diventa volume utile del componente. Tiene conto di sovrametallo, scarti, irregolarità e materiale rimosso in finitura.
- Gas cylinder volume: indica il volume disponibile nella bombola di gas considerata.
- Wire diameter: indica il diametro del filo di apporto.
- Distance between component: rappresenta la distanza lasciata tra i componenti adiacenti sul piano di stampa.
- Infill: indica la percentuale di volume interno effettivamente riempita di materiale. Nel caso di componenti pieni avremo un riempimento pari al 100%, mentre valori inferiori vengono utilizzati per strutture alleggerite o prove preliminari, riducendo così il materiale utilizzato e il tempo di deposizione.

- Layer height: rappresenta l'altezza del singolo strato depositato.
- Total volume:

$$TotalVolume = \frac{FinishedVolume + SupportVolume + VolumeToMachine}{PartBuildEfficiency}$$

- Finished volume: rappresenta il volume finale del componente dopo la finitura, rispecchiando quindi il volume del modello CAD.
- Substrate thickness: indica lo spessore della piastra base.
- Substrate used: indica il numero di piastre effettivamente utilizzate
- Substrate reusable: specifica se e quante volte il substrato può essere riutilizzato.
- Substrate X: rappresenta la dimensione del substrato lungo la direzione X.
- Substrate Y: rappresenta la dimensione del substrato lungo la direzione Y22.

Questi input definiscono la configurazione generale della produzione, comprendendo macchina, paese, materiale, gas, numero di componenti, substrati e condizioni geometriche. Sono parametri modificabili dall'utente e influenzano tutti i calcoli successivi.

La sezione *Component* in Figura 3.5 è dedicata alla gestione del numero di componenti producibili all'interno del piano corrispettivo alla macchina scelta.

Component			
Component per build	144 n°		numero di pezzi in stampa
Max component along x	12 n°		numero massimo di pezzi lungo x
Max component along y	12 n°		numero massimo di pezzi lungo y
Max component per build	144 n°		numero massimo di pezzi stampabili

Figura 3.5 Parametri Component in MaterialandManufacturing

- Component per build;
- Max component along X:

$$MaxComponentAlongX = \frac{PlateWidth}{SizeX + DistanceBetweenComponent}$$

- Max component along Y:

$$MaxComponentAlongY = \frac{PlateLength}{SizeY + DistanceBetweenComponent}$$

- Max component per build:

$$MaxComponentPerBuild = MaxComponentAlongX \times MaxComponentAlongY$$

I calcoli vengono eseguiti automaticamente considerando le dimensioni del componente rispetto al piano e alla distanza che si vuole lasciare tra di essi. Questa sezione permette di ottimizzare lo spazio disponibile e l'influenza del nesting sul costo unitario.

La porzione *Tool path* (Figura 3.6) contiene i parametri relativi al materiale depositato e alla geometria del percorso utensile.

Tool path			
Deposition Volume	28579 mm3		volume pezzo considerato pieno
Material density	7850 Kg/m3		densità del materiale depositato
Deposition Volume with infill	4115340 mm3		volume depositato considerando il riempimento
Perimeter Volume	26838.66 mm3		volume perimetro esterno

Figura 3.6 Parametri Tool Path in MaterialandManufacturing

- Deposition volume: rappresenta il volume del materiale depositato.
- Material density: riporta dall'inventario la densità del materiale di apporto selezionato.
- Deposition volume with infill:

$$DepositionVolumeWithInfill = [(DepositionVolume - PerimeterVolume) \times Infill] \times ComponentPerBuild$$

- Wire mass:

$$WireMass = DepositionVolume \times 10^{(-9)} \times MaterialDensity$$

- Perimeter volume:

$$PerimeterVolume = BeadArea \times Perimeter \times SizeZ$$

Questa sezione risulta fondamentale per il successivo calcolo dei tempi di deposizione e del costo del materiale.

Su *Wire* in Figura 3.7 vengono raccolti tutti i parametri relativi al filo di apporto utilizzato durante il processo di WAAM.

Wire			
Wire cost	16 €/kg		costo del filo
Wire feed speed WFS	90.0 mm/s		velocità avanzamento filo
WFS conversion	5400.0 mm/min		velocità avanzamento filo in mm/min
Wire change time per roll	0.08 h		tempo cambio filo per bobina
Number of wire change	2	-	numero di bobine utilizzate
Bead Area	4.71 mm ²		area cordone
Wire Area	0.79 mm ²		area filo
Bead width	6 mm		larghezza cordone
Used wire weight	32.3 Kg		peso materiale utilizzato

Figura 3.7 Parametri Wire in MaterialandManufacturing

- Wire cost: indica il costo unitario del filo d'apporto:
- Wire Feed Speed:

$$WireFeedSpeed = \frac{BeadArea \times TravelSpeed}{WireArea}$$

- Wire change time per roll: indica il tempo necessario per sostituire una bobina di filo.
- Number of wire change:

$$NumberOfWireChange = \frac{Weight}{WireMassPerRoll} \times ComponentPerBuild$$

- Bead area:

$$BeadArea = \frac{\pi}{4} \times BeadWidth \times LayerHeight$$

- Wire Area:

$$WireArea = \frac{\pi}{4} \times WireDiameter^2$$

- Bead width: rappresenta la larghezza del cordone depositato.

La sezione *Non productive* in Figura 3.8 è dedicata alla valutazione dei tempi non produttivi del processo includendo attese, pause, movimenti non produttivi e operazioni accessorie; difatti secondo [10] viene calcolata moltiplicando il tempo di deposizione per il *Part Build Efficiency*, ovvero una percentuale che stima la bontà del processo.

Non-productive			
Non-productive time		3.2 h	tempi non produttivi

Figura 3.8 Parametri Non-Productive in MaterialandManufacturing

- Non-productive time:

$$NonProductiveTime = WeldingTime \times (1 - PartBuildEfficiency)$$

L'obiettivo della sezione *Manufacture* in *Figura 3.9* è determinare il tempo effettivo di produzione per poi ricavarne i costi associati alla deposizione del materiale, integrando i dati provenienti dalle sezioni precedenti del foglio.

Manufacture			
Deposition speed		0.03 Kg/min	velocità di deposizione
Welding time		16.18 h	tempo saldatura
Deposition time		12.94 h	tempo effettivo saldatura
Operator hourly rate		32 €/h	costo orario operatore

Figura 3.9 Parametri Manufacture in MaterialandManufacturing

- Deposition speed:

$$DepositionSpeed = (WireArea \times WireFeedSpeed) \times 10^{-9} \times MaterialDensity$$

- Welding time:

$$WeldingTime = \frac{DepositionVolumeWithInfill \times 10^{-9} \times MaterialDensity}{\frac{DepositionSpeed}{60}}$$

- Deposition time:

$$DepositionTime = WeldingTime - NonProductiveTime$$

- Operator hourly rate: riporta il costo orario dell'operatore.

All'interno di *Shielding gas* in *Figura 3.10* si trovano tutti i parametri riguardanti il gas di protezione del bagno fuso.

Shielding GAS			
gas unitary cost		0.0177 €/L	costo unitario gas
gas flow rate		16 L/min	portata gas
gas flow rate hour		960 L/h	consumo orario di gas
gas cylinder quantity		124 n°	quantità bombole consumate
gas used		12426.60 L	totale gas usato

Figura 3.10 Parametri Shielding Gas in MaterialandManufacturing

- Gas unitary cost: indica il costo del gas per unità di volume.
- Gas flow rate: rappresenta la portata del gas durante la deposizione.
- Gas cylinder quantity:

$$GasCylinderQuantity = \frac{GasFlowRatePerHour \times DepositionTime}{GasCylinderVolume}$$

- Gas used:

$$GaseUsed = GasFlowRatePerHour \times DepositionTime$$

I valori di portati vengono direttamente recuperati dal database dei materiali presente nel foglio *Material Inventory*, affinché venga considerato un corretto consumo ed il relativo costo.

La sezione *Energy* in *Figura 3.11* è dedicata alla stima dei consumi energetici durante le diverse fasi del processo.

Energy		
Price Energy	0.18 €/kWh	Costo unitario energia elettrica
Pre-processing energy consumption	4.60 kWh	Consumo energetico della di setup e warmup
Build energy consumption	194.17 kWh	Consumo energetico della fase attiva di stampa
Cooldown energy consumption	0.13 kWh	Consumo energetico della fase di cooldown e unload macchina
Pre-processing energy consumption per component	0.03 kWh	Consumo energetico della di setup e warmup per il singolo componente
Build energy consumption per component	1.35 kWh	Consumo energetico della fase attiva di stampa per il singolo componente
Cooldown energy consumption per component	0.00087 kWh	Consumo energetico della fase di cooldown e unload macchina per il singolo componente

Figura 3.11 Parametri Energy in MaterialandManufacturing

- Price energy: indica il costo unitario dell'energia.
- Pre-processing energy consumption:

$$PreProcessingEnergyConsumption = WarmUpPower \times (WarmUpTime + SetUpTotalTime)$$

- Build energy consumption:

$$BuildEnergyConsumption = BuildPower \times DepositionTime$$

- Cooldown energy consumption:

$$CoolDownEnergyConsumption = CoolDownPower \times CoolDownTime$$

- Relativi consumi energetici per singolo componente.

Il modello suddivide il consumo energetico nelle tre fasi principali:

- Warm-up;
- Build;
- Cooldown.

Questa suddivisione permette una più accurata stima dell'energia consumata per singola fase di lavorazione durante il ciclo produttivo.

All'interno di *Substrate* visionabile in *Figura 3.12* si pensa alla gestione dei parametri relativi al substrato utilizzato durante il processo di deposizione.

Substrate			
Substrate Area	1000000	mm2	area substrato
Substrate volume	15000000	mm3	volumne substrato
Substrate density	7850	Kg/m3	densità materiale substrato
Substrate single mass	117.75	Kg	peso substrato
Substrate material unitary cost	4	€/Kg	costo unitario materiale substrato

Figura 3.12 Parametri Substrate in MaterialandManufacturing

- Substrate area:

$$SubstrateArea = SubstrateX \times SubstrateY$$

- Substrate volume:

$$SubstrateVolume = SubstrateArea \times SubstrateThikness$$

- Substrate density: riporta la densità del materiale del substrato.
- Substrate single mass:

$$SubstrateSingleMass = SubstrateVolume \times 10^{-9} \times SubstrateMaterialDensity$$

- Substrate material unitary cost: indica il costo unitario del materiale del substrato.

I parametri *Machine Parameter* in *Figura 3.13* vengono richiamati automaticamente dal foglio *Machine inventory* a seconda della macchina selezionata in precedenza, riportandoli per facilitare la selezione ove utilizzati per altri calcoli tranne l'area che viene semplicemente calcolata date le dimensioni del piano di stampa.

Machine parameter		
Hourly Cost	60 €/h	costo orario macchina
Plate width	1000 mm	larghezza piano di stampa
Plate length	1000 mm	lunghezza piano di stampa
Building height	1000 mm	altezza piano di stampa
Price	1250000 €	prezzo macchina
Annual maintenance cost	22000 €/year	costo annuale di manutenzione
Building area	30 m ²	dimensioni di ingombro macchina
Warm up power	10 kW	consumo per warmup
Build power	15 kW	consumo in fase di stampa
Cool down power	0.5 kW	consumo in fase di cooldown
WarmupTime	0.08 h	tempo necessario al warmup
CoolDownTime	0.25 h	tempo necessario al cooldown
SetupTime	0.18 h	tempo per il setup
BuildPlateLoadTime	0.2 h	tempo carico piano di stampa
BuildPlateUnloadTime	0.2 h	tempo scarico piano di stampa
Build plate area	1000000 mm ²	area piano di stampa
Travel Speed	15 mm/s	velocità avanzamento macchina

Figura 3.13 Parametri Machine Parameter in MaterialandManufacturing

- Build plate area:

$$BuildPlateArea = PlateWidth \times PlateLength$$

La sezione *Processing time* visionabile in Figura 3.14 contiene i principali parametri da tenere in considerazione per le tempistiche del processo. Difatti questi parametri permettono di estendere la stima oltre il semplice costo del filo. Nel processo WAAM, infatti, il costo finale dipende anche da tutte le fasi in cui la macchina è occupata, dal consumo di gas, dal consumo energetico e dall'utilizzo del substrato. Per questo motivo il modello considera sia i tempi produttivi sia i tempi non produttivi.

Processing time		
Build plate load time	0.20 h	tempo carico piano di stampa
Wire change time	0.16 h	tempo cambio filo
Warmup time	0.08 h	tempo warmup macchina
Cool down time	0.25 h	tempo cool down
Set up total time	0.18 h	tempo setup totale
Plate removal time	0.45 h	tempo rimozione pezzo e piano
Total process time	14.10 h	tempo totale

Figura 3.14 Parametri Processing Time in MaterialandManufacturing

- Build plate load time: indica il tempo necessario a caricare e fissare il substrato.
- Wire change time:

$$WireChangeTime = NumberOfWireChange \times WireChangeTime$$

- Warmup time: indica il tempo della fase di avvio e riscaldamento.
- Cool down time: indica il tempo necessario alla fase di raffreddamento.
- Set up time: rappresenta il tempo richiesto per preparare macchina, programma, materiali e i vari attrezzaggi.
- Plate removal time:

$$PlateRemovalTime = CoolDownMachineTime + BuildPlateMachineUnloadTime$$

Nella parte finale del foglio vi è *Bead cost* in *Figura 3.15* che utilizza tutti i parametri precedentemente calcolati per determinare il costo del componente finale, suddividendo il prezzo secondo in macro-sezioni per avere una idea della partizione dei costi visionabile anche nel grafico in *Figura 3.16*.

BEAD COST			
Deposition material cost	646.11 €	costo materiale depositato	
Substrate cost	235.50 €	costo materiale substrato	
Welding cost	781.78 €	costo saldatura	
Wire change cost	5.12 €	costo cambio filo	
Shielding gas cost	219.95 €	costo gas inerte	
Energy cost total	35.80 €	costo complessivo energia elettrica	
Energy cost warm up	0.83 €	costo energia di warm up	
Energy cost cool down	0.02 €	costo energia di cool down	
Energy build cost	34.95 €	costo energia in fase di lavorazione	
Non-productive cost	297.72 €	costo tempi morti	
Machine set-up cost	10.80 €	costo set-up macchina	
Operator cost	17.28 €	costo operatore	
Total	2244.94 €	costo totale	
Cost per component	15.59 €	costo per componente	

Figura 3.15 Bead Cost in MaterialandManufacturing

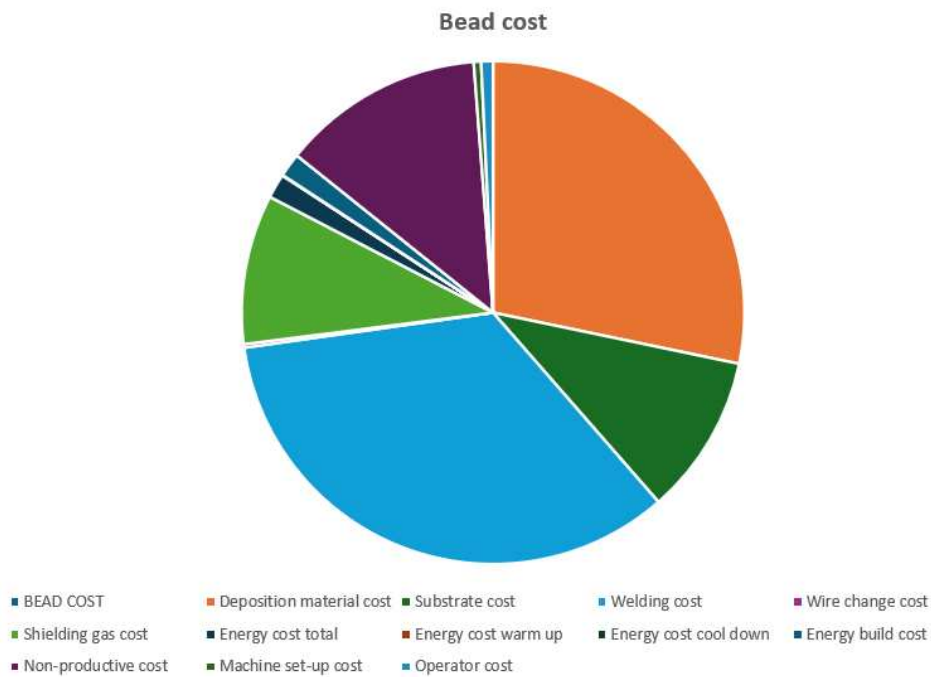


Figura 3.16 Ripartizioni voci di costo calcolate dal modello

- Deposition material cost:

$$DepositionMaterialCost = \frac{UsedWireWeight}{PartBuildEfficiency} \times WireCost$$

- Substrate cost:

$$SubstrateCost = SubstrateUsed \times \frac{SubstrateMaterialUnitaryCost \times SubstrateMass}{SubstrateReusable}$$

- Welding cost:

$$WeldingCost = DepositionTime \times MachineHourlyCost + WireChangeCost$$

- Wire change cost:

$$WireChangeCost = WireChangeTimeTotal \times OperatorHourlyRate$$

- Shielding gas cost:

$$ShieldingGasCost = TotalGasUsed \times GasUnitaryCost$$

- Energy cost total:

$$EnergyCostTotal = (PreProcessingEnergyConsumption + CoolDownEnergyConsumption + BuildEnergyConsumption) \times EnergyPrice$$

- Non-productive cost

$$NonProductiveCost = NonProductiveTime \times (MachineHourlyCost + OperatorHourlyRate)$$

- Machine set-up cost:

$$MachineSetUpCost = SetUpMachineTime \times MachineHourlyCost$$

- Operator cost:

$$OperatorCost = OperatorHourlyRate \times (WireChangeTotalTime + SetUpTotalTime + BuildPlateLoadTime)$$

- Total:

$$Total = DepositionMaterialCost + SubstrateCost + WeldingCost + ShieldingGasCost + EnergyCostTotal + NonProductiveCost + MachineSetUpCost + OperatorCost$$

- Cost per component:

$$CostPerComponent = \frac{TotalCost}{ComponentPerBuild}$$

3.3 Database del modello e sintesi finale

Oltre ai fogli di input e output, il modello contiene una serie di database interni. Questi fogli consentono di richiamare automaticamente valori coerenti con il paese, la macchina, il materiale e il gas selezionati dall'utente. L'utilizzo dei database evita di dover reinserire manualmente gli stessi dati e rende il modello più flessibile per il confronto tra scenari produttivi differenti.

Il foglio *Country List* contiene i paesi selezionabili, mentre il foglio *Country Parameters Inventory* associa a ciascun paese i principali costi unitari utilizzati nelle stime economiche, come il costo dell'energia, il costo dei gas industriali, il costo della manodopera e il costo dei combustibili. Questa struttura consente di effettuare confronti economici tra differenti aree produttive e simulare variazioni di costo legate al contesto geografico. In *Tabella 5* possiamo trovare una illustrazione dei parametri presenti all'interno del modello.

Tabella 5 Parametri del database paesi

Voce	Dato	Spiegazione
Paesi disponibili	Italy, Germany, Spain, France, Great Britain, Poland, Norway, Turkey, Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Russia, Thailand, Taiwan, United States, Global (Average), Custom Energy Mix	Elenco delle aree geografiche selezionabili nel modello.
Parametri disponibili	Argon unitary cost, Nitrogen unitary cost, Energy unitary Cost, Compressed air unitary cost, Engineer, Methane unitary cost, Oxygen unitary cost, Gasoline, Diesel, LPG, Kerosene, Electric	Costi unitari richiamati automaticamente in base al paese selezionato.

Il database macchine chiamato *Machine List* e riportato in *Tabella 6* contiene le configurazioni disponibili per la simulazione. Ogni macchina è descritta da dimensioni utili, costo di acquisto, costo orario, consumi energetici e tempi caratteristici. Quando l'utente seleziona una macchina nel foglio principale, il modello richiama automaticamente i dati necessari dal foglio *Machine Inventory*.

Tabella 6 Parametri del database macchine

Voce	Dato	Spiegazione
Macchine disponibili	Robowaam, OneOffRobotics, Vallourec	Configurazioni WAAM selezionabili dal modello
Parametri macchina	Hourly Cost, Plate width, Plate length, Building height, Price, Annual maintenance cost, Building area, Warm up power, Build power, Cool down power, WarmupTime, CoolDownTime, SetupTime, BuildPlateLoadTime, BuildPlateUnloadTime	Dati tecnici ed economici richiamati dal foglio MaterialandManufacturing

Il database materiali *Material list* visionabile in *Tabella 7* raccoglie sia i materiali d'apporto sia i materiali utilizzabili come substrato. Per ognuno, all'interno del foglio *Material Inventory*, sono presenti proprietà fisiche, termiche, economiche e di processo, come densità, costo unitario, temperatura di riferimento, velocità di deposizione e portata di gas richiesta, successivamente ripresi per i calcoli dal foglio *Material and Manufacturing*.

Tabella 7 Parametri del database materiali

Voce	Dato	Spiegazione
Materiali d'apporto	INCONEL718, AlSi10Mg, 316L, AlSi7Mg0,6, ER70S-6, Ti6Al4V (Gr23), Substrate material list, C45, AISI 304, Ti6Al4V	Materiali selezionabili per la realizzazione del componente.
Materiali substrato	C45, AISI 304, Ti6Al4V	Materiali selezionabili per la piastra di base
Parametri materiali d'apporto	Specific Heat, Density, Temperature, Cost, Tend, k, Tip, TS, Rg	Proprietà richiamate per calcolare massa, tempi, gas, temperatura e costo.
Parametri materiali substrato	Density, Unitary Cost, Unitary cost	Proprietà del materiale del substrato

Il funzionamento complessivo del modello può essere riassunto attraverso una sequenza logica. *In primo luogo*, vengono inseriti i dati geometrici del componente e vengono selezionati materiale, macchina, gas e paese di produzione. Successivamente il modello calcola volume, massa, percorso di deposizione, tempi di produzione, consumo di gas, consumo energetico e costo del substrato. Infine, tutte le voci vengono trasformate in costo e sommate nella sezione Bead Cost.

Questa impostazione consente di aggiornare rapidamente la stima modificando i parametri di input, senza dover ricostruire il calcolo. La suddivisione tra input, output e database rende inoltre il modello più ordinato e facilmente verificabile, poiché ogni risultato finale può essere ricondotto alla voce tecnica o economica che lo genera.

Il modello costituisce quindi uno strumento flessibile per la stima preliminare del costo nel processo WAAM. La presenza di parametri geometrici, tecnologici, energetici ed economici permette di ottenere una valutazione più completa rispetto a modelli basati soltanto sul materiale depositato, offrendo al tempo stesso una base modificabile per future estensioni e validazioni sperimentali.

4 Caso studio

4.1 Introduzione

Per verificare il modello di costo sviluppato e validarne il corretto funzionamento, è stato analizzato un caso studio relativo alla produzione di un componente con geometria assimilabile ad un ingranaggio. Il riferimento è il lavoro svolto da Kokare et al. in *Modelling of wire arc additive manufactured product cost* [9].

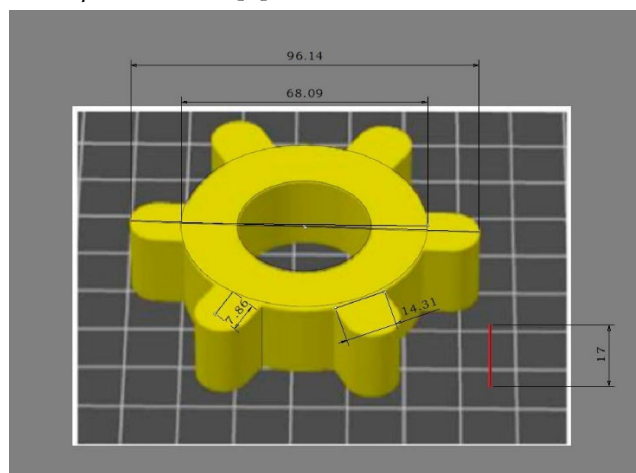


Figura 4.1 Rilevamento quote ruota dentata

Il componente preso come riferimento è stato inizialmente analizzato a partire dalle informazioni geometriche estrapolate dall'articolo. In particolare, sono state rilevate le dimensioni di massima, data l'informazione del diametro e dello spessore del grezzo di partenza, per poi adattare in scala le altre dimensioni. Come visibile in *Figura 4.1* dal rilevamento fatto il diametro è risultato maggiore rispetto a quello indicato nell'articolo, difatti si è realizzato un primo disegno seguendo le quote dei rilevamenti proposto in *Figura 4.2*.

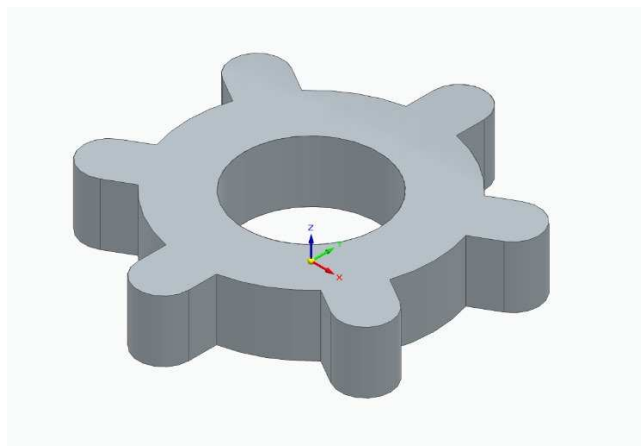


Figura 4.2 Disegno CAD ruota dentata diametro 96mm

Successivamente si è scalato quest'ultimo al fine di avere un modello il più vicino possibile all'oggetto da comparare presente sull'articolo come mostrato in *Figura 4.3*.

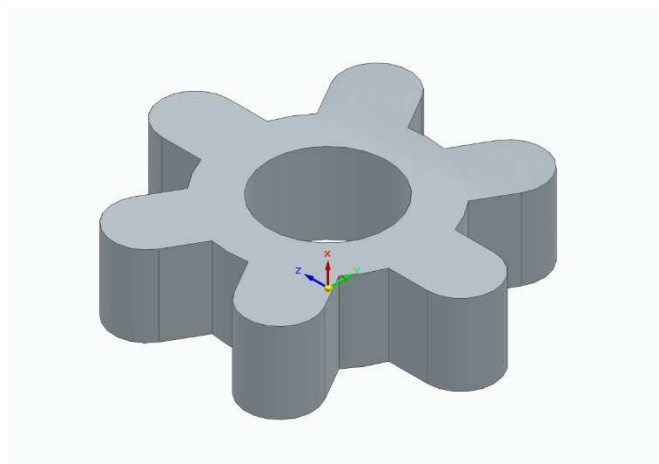


Figura 4.3 Disegno CAD ruota dentata scalata con diametro 70mm

La ricostruzione 3D ha permesso inoltre di rendere il caso studio coerente con la logica del modello, che utilizza dati dimensionali e volumetrici per stimare il materiale impiegato e i tempi di deposizione.

Per verificare il corretto funzionamento del modello di costo sviluppato, è stato effettuato un confronto con i dati presenti nell'articolo di riferimento relativo alla produzione del componente mediante tecnologia WAAM. L'obiettivo del confronto non è solamente quello di verificare la corrispondenza numerica tra i risultati, ma anche quello di valutare se il modello Excel sia in grado di restituire valori coerenti a partire dagli stessi parametri di processo ed economici riportati in letteratura.

La validazione è stata svolta inserendo nel modello i principali dati ricavati dall'articolo [9], distinguendo tra parametri di processo, parametri economici, risultati tecnici e risultati economici. In questo modo è stato possibile confrontare in maniera ordinata i valori dell'articolo con quelli ottenuti dal modello sviluppato su base [10]. I parametri di processo descrivono le condizioni operative della deposizione, come efficienza di costruzione, altezza layer, velocità del filo, velocità della torcia e portata del gas. I parametri economici, invece, definiscono i costi unitari necessari alla valutazione finale, come costo del filo, costo del gas, costo dell'energia, costo orario macchina e costo dell'operatore.

Successivamente, gli stessi input dell'articolo sono stati inseriti all'interno del modello Excel sviluppato, così da ottenere i risultati calcolati tramite le formule implementate nel foglio di calcolo. Questo passaggio permette di verificare come il modello elabori i dati in ingresso e quali differenze emergano rispetto ai risultati riportati nella fonte bibliografica [9]. Le eventuali differenze tra i valori possono essere dovute a diverse ipotesi di calcolo, arrotondamenti, differente suddivisione delle voci di costo o diversa gestione di alcuni contributi, come, ad esempio tempi non produttivi, costo macchina, energia e substrato.

Per rendere il confronto più leggibile, nel capitolo successivo le tabelle sono state raggruppate in quattro sezioni principali: la prima riguarda i parametri di processo, la seconda i parametri economici, la terza i risultati di processo, cioè i calcoli tecnici ottenuti sia dall'articolo sia dal modello, e l'ultima i risultati economici, ottenuti inserendo gli input dell'articolo all'interno del modello di costo sviluppato. Questa organizzazione consente di distinguere chiaramente i dati di partenza dai risultati calcolati e permette di valutare in modo più immediato la coerenza del modello rispetto al caso studio analizzato.

4.2 Confronto dei parametri

Per rendere più chiaro il confronto tra i dati ricavati dall'articolo e quelli utilizzati nel modello sviluppato, sono state organizzate quattro tabelle in porzioni distinte. La prima riguarda i parametri di processo (*Tabella 8*), la seconda i parametri economici (*Tabella 9*), la terza i risultati tecnici di processo (*Tabella 10*) e la quarta i risultati economici ottenuti (*Tabella 11*) inserendo nel modello sviluppato i dati e gli input dell'articolo. Questa suddivisione consente di separare le ipotesi iniziali dai risultati calcolati, rendendo più immediata la lettura della comparazione.

Tabella 8 Confronto parametri di processo

Parametro	Articolo	Cranfield	Unità	Scostamento
Part build efficiency	55,5	80	%	+44,14%
Layer height	1,5	1	mm	-33-33%
Wire Feed Speed	50	90	mm/s	+80%
Travel Speed	6	15	mm/s	+150%
Gas flow rate	16	16	L/min	0%

I parametri di processo visionabili in *Tabella 8* definiscono le condizioni operative principali della deposizione. Essi comprendono l'efficienza di costruzione, l'altezza del layer, la velocità di alimentazione del filo, la velocità di avanzamento della torcia e la portata del gas di protezione del bagno fuso. Il loro confronto è utile perché tali grandezze influenzano direttamente la quantità di materiale depositato, il tempo di lavorazione e la qualità geometrica del cordone.

Tabella 9 Confronto parametri economici

Parametro	Articolo	Cranfield	Unità	Scostamento
Wire cost	16	16	€/kg	0%
Operator hourly rate	15	32	€/h	+113,33%
Gas unitary cost	0,0023	0,0177	€/L	+669,57%
Energy price	0,13	0,18	€/kWh	+38,46%
Substrate material unitary cost	5	4	€/kg	-20%
Machine hourly cost	30	60	€/h	+100%
Machine price	300000	1250000	€	+316,67%

I parametri economici esposti in *Tabella 9* rappresentano i costi unitari e i dati di riferimento necessari per trasformare il processo produttivo in una valutazione economica. In questa sezione vengono confrontati il costo del filo, della manodopera, del gas, dell'energia, del substrato e della macchina. La loro separazione dai parametri di processo permette di distinguere gli effetti legati alla tecnologia da quelli legati al contesto economico scelto.

Tabella 10 Confronto risultati di processo

Parametro	Articolo	Cranfield	Unità	Scostamento
Wire mass	0,302	0,224	Kg	-25,83%
Substrate mass	1,162	0,753	Kg	-35,2%
Total time	0,8	1,07	H	+33,75%

I risultati di processo presenti in *Tabella 10* sono grandezze calcolate e non semplici dati di input. Essi derivano dall'applicazione delle formule del modello ai parametri precedentemente inseriti e descrivono la massa di filo richiesta, la massa del substrato e il tempo complessivo di produzione. Questa tabella consente quindi di confrontare gli output tecnici del modello sviluppato con quelli riportati nell'articolo di riferimento.

Tabella 11 Risultati economici inserendo gli input dell'articolo nel modello

Parametro	Articolo	Cranfield	Unità	Scostamento
Wire cost	16	16	€/kg	0%
Operator hourly rate	15	<u>15</u>	€/h	0%
Gas unitary cost	0,0023	<u>0,0023</u>	€/L	0%
Energy price	0,13	<u>0,13</u>	€/kWh	0%
Substrate material unitary cost	5	<u>5</u>	€/kg	0%
Machine hourly rate	30	<u>30</u>	€/h	0%
Machine price	300000	<u>300000</u>	€	0%
Component	35	21,91	€	-37,4%

I risultati economici riportano la verifica effettuata inserendo nel modello sviluppato gli stessi dati e input utilizzati nell'articolo i quali si possono vedere in *Tabella 11* sottolineati. In questo modo è possibile valutare la coerenza del modello non solo dal punto di vista dei parametri iniziali, ma anche rispetto al costo finale stimato. Il confronto è stato mantenuto su macro-voci economiche, poiché il modello sviluppato scompone il costo in un numero maggiore di contributi rispetto all'articolo, includendo anche substrato, saldatura, gas, energia, tempi non produttivi, setup macchina e operatore.

5 Risultati e discussione

Dalla comparazione tra i parametri dell'articolo [9] e quelli di Cranfield [10] emerge che i due approcci utilizzano valutazioni di processo ed economiche differenti. Le tabelle presenti nel paragrafo precedente permettono di evidenziare quali parametri incidono maggiormente sul costo finale e quali differenze possono spiegare lo scostamento tra i risultati.

Per quanto riguarda i parametri di processo riportati nel grafico in *Figura 5.1*, il modello Cranfield [10] considera una *Part Build Efficiency* pari all'80%, superiore rispetto al 55,5% riportato nell'articolo [9]. Questa differenza indica una maggiore efficienza di costruzione del componente, con una conseguente riduzione di materiale necessario per completare il componente e un minore lavoro di post processing per ottenere il componente finito.

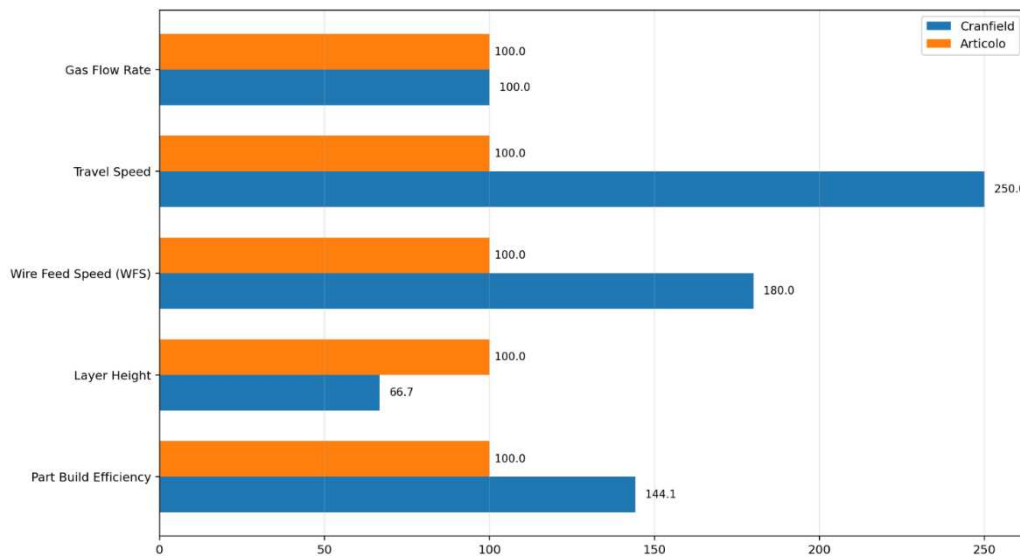


Figura 5.1 Grafico scostamento parametri di processo

Tale aspetto è confermato anche dai risultati di processo presenti in *Figura 5.2*, ovvero dalla massa del filo e del substrato calcolata: nel modello Cranfield la Wire mass è pari a 0,224 kg, mentre nell'articolo è pari a 0,302 kg, con una riduzione quindi del 25,8%.

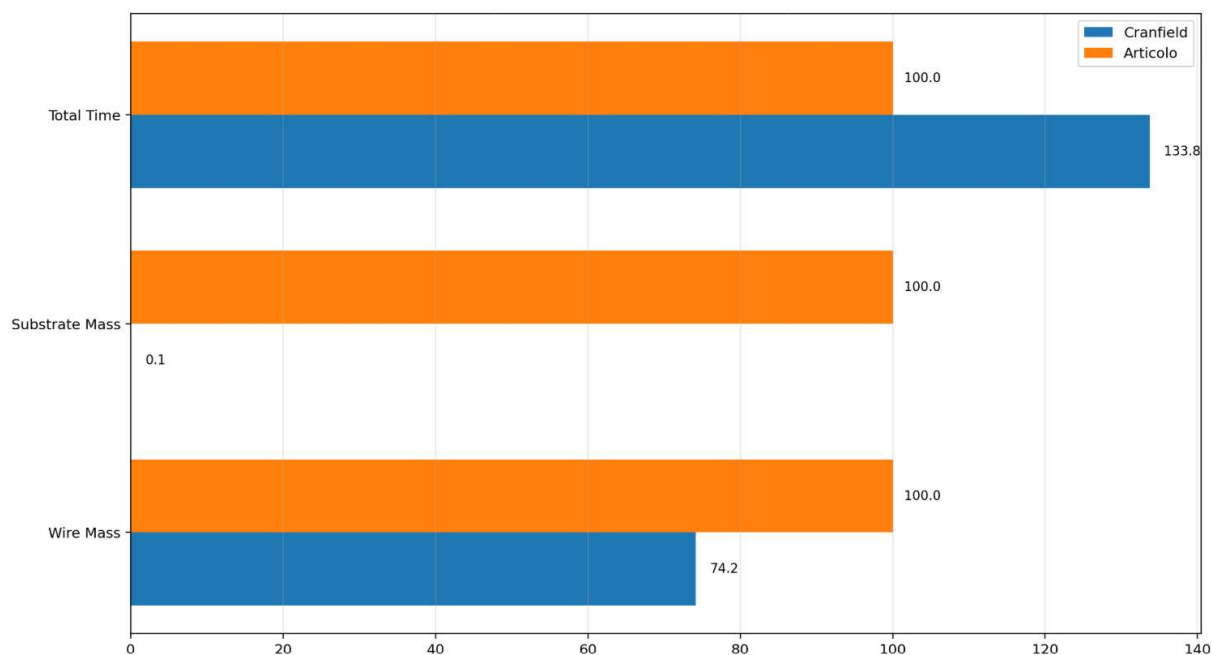


Figura 5.2 Grafico risultati di processo

Un'altra differenza significativa riguarda la velocità di deposizione. La Wire Feed Speed passa da 50 mm/s nell'articolo a 90 mm/s nel modello Cranfield, mentre la travel speed passa da 6 mm/s a 15 mm/s. Questi scostamenti, facilmente individuabili nel grafico presente in Figura 5.3, indicano che il modello Cranfield utilizza parametri di processo più elevati ed ottimizzati. Tuttavia, l'altezza layer è inferiore, pari a 1mm rispetto agli 1,5 dell'articolo. Il che influenza il numero di layer depositati e, di conseguenza, il tempo totale di lavorazione. Infatti, nonostante le velocità superiori, il tempo totale del modello Cranfield è di 1,07 h, rispetto alle 0,8 h riportati nell'articolo.

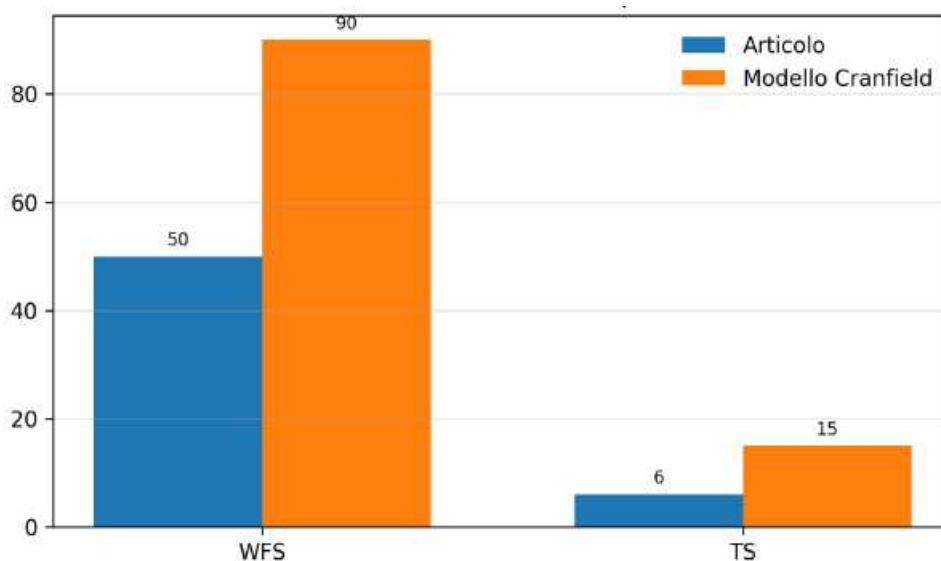


Figura 5.3 Grafico confronto velocità di processo

Dal punto di vista economico, le differenze tra i due approcci sono ancora più marcate come si evince dal grafico in *Figura 5.4*. Il costo macchina nel modello Cranfield è pari a 60 €/h, cioè il doppio rispetto ai 30 €/h dell'articolo. Soprattutto per quanto riguarda l'incidenza delle macchine e della manodopera, Cranfield risulta adottare condizioni economiche più gravose, per più del doppio del valore presente nell'articolo comparato.

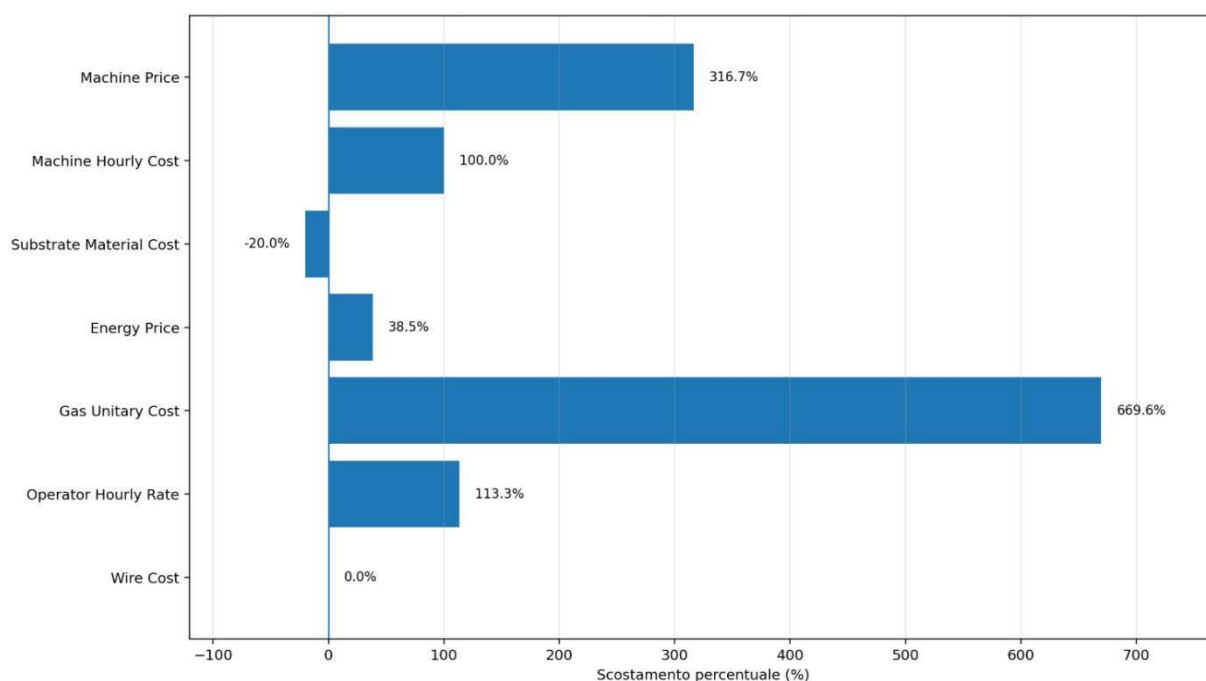


Figura 5.4 Grafico scostamento parametri economici

Nonostante queste differenze, il costo del componente ottenuto con i parametri Cranfield è pari a 38,68 €, mentre il valore dell'articolo è pari a 35 €. Lo scostamento percentuale è quindi pari al +10,5%. Questo importante risultato ci dimostra che, pur utilizzando costi orari e parametri economici più elevati, il modello Cranfield produce un costo finale molto vicino a quello dell'articolo. La differenza viene parzialmente compensata dalla minore quantità di filo utilizzato, dal minore peso del substrato e dai tempi più competitivi.

La verifica infatti è stata effettuata inserendo direttamente nel modello sviluppato i parametri presenti nell'articolo. In questo caso il costo ottenuto è pari a 21,91 €, contro i 35 € riportati come riferimento. Questo risultato presentato graficamente in *Figura 5.5* evidenzia che, anche utilizzando gli stessi valori di input, il modello non restituisce esattamente il costo finale. La causa principale può essere ricondotta alla diversa struttura del modello, al modo in cui organizza, suddivide e assegna le voci di costo.

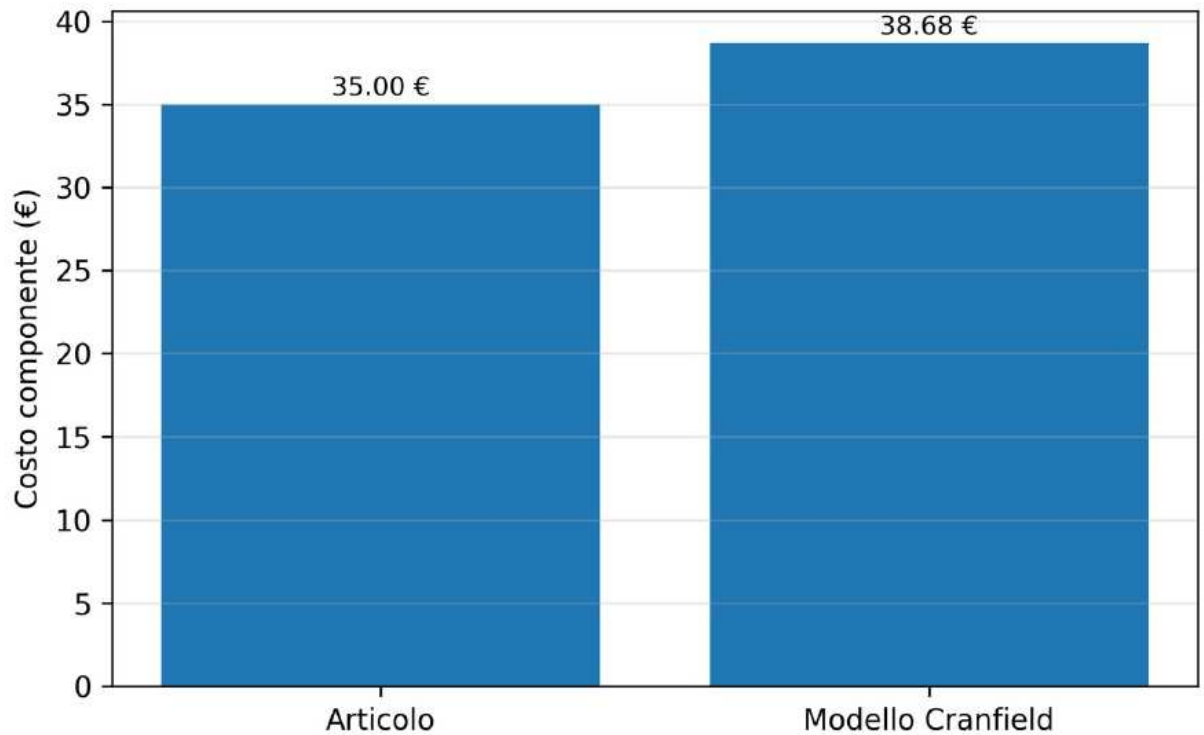


Figura 5.5 Grafico confronto costo finale

Nel modello sviluppato, infatti, il costo viene separato in più categorie specifiche, come costo del materiale depositato, costo del substrato, costo di saldatura, gas di protezione, energia, tempi non produttivi, set-up macchina e costo operatore. Nell'articolo, invece, alcune voci possono essere considerate in modo aggregato oppure inserite diversamente all'interno del costo totale. Per questo motivo, lo scostamento del 37,4% non indica necessariamente un errore del modello, ma evidenzia una diversa logica di calcolo e di attribuzione dei costi.

La suddivisione del costo ottenuto con i parametri dell'articolo mostra che le voci più rilevanti sono il costo operatore, pari a 5,70 €, il costo di set-up macchina, pari a 5,40 €, e il costo del materiale depositato, pari a 4,49 €. Le altre voci, come gas ed energia, hanno invece un'incidenza minore sul totale. Questo conferma che, per componenti di piccole dimensioni, i costi legati ai tempi di preparazione, alla macchina e all'operatore possono incidere in modo rilevante rispetto al costo del solo materiale.

6 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo principale lo sviluppo e la validazione di un modello di costo per il processo di *Wire Arc Additive Manufacturing*, con particolare attenzione alla costruzione di uno strumento di calcolo in grado di stimare il costo di produzione di un componente realizzato mediante tecnologia WAAM. Il lavoro è nato dalla necessità di analizzare non solo gli aspetti tecnologici del processo, ma anche quelli economici, poiché la valutazione dei costi rappresenta un elemento fondamentale per comprendere quando l'impiego della produzione additiva possa risultare realmente conveniente rispetto ai processi tradizionali.

Nella prima parte della tesi è stato analizzato il processo WAAM dal punto di vista generale, descrivendone il principio di funzionamento, i principali vantaggi e le principali criticità. La tecnologia WAAM si basa sulla deposizione di materiale metallico sotto forma di filo, fuso mediante un arco elettrico e depositato strato dopo strato fino alla realizzazione del componente. Rispetto ad altre tecnologie additive, il WAAM si distingue per gli elevati tassi di deposizione, la possibilità di realizzare componenti di grandi dimensioni e il potenziale risparmio di materiale rispetto alle lavorazioni sottrattive. Tuttavia, presenta anche alcuni limiti, come la qualità superficiale non sempre elevata, la probabile necessità di post-processing in superfici in cui è richiesta precisione, la presenza di deformazioni e di tensioni residue.

Successivamente sono stati analizzati i principali parametri che influenzano la produzione WAAM e, di conseguenza, il costo finale del componente. Tra questi rientrano la Wire Feed Speed, la Travel Speed, l'altezza del layer, la portata del gas di protezione, la densità del materiale, il costo del filo, il costo energetico, il costo macchina, il costo dell'operatore e i tempi produttivi e non produttivi. Particolare attenzione è stata dedicata alla relazione tra i parametri di processo e la geometria del cordone, poiché larghezza, altezza e sezione del bead influenzano direttamente la quantità di materiale depositato, il numero di layer, i tempi di lavorazione, la qualità finale dell'oggetto, le proprietà meccaniche e il costo complessivo.

Il cuore della tesi è stato lo sviluppo del modello di costo, realizzato mediante un file Excel strutturato in diversi fogli di calcolo. Il modello è stato organizzato in modo da raccogliere e collegare tra loro le principali informazioni necessarie alla stima economica del componente. Sono stati considerati i dati relativi agli input di processo, al manufacturing, dove si trova il cuore del calcolo, e infine tutti i fogli relativi agli inventari con i rispettivi dati dei paesi di produzione, materiali, materiali del substrato, consumabili e dei macchinari. Questa suddivisione ha permesso di costruire uno strumento flessibile, nel quale ogni sezione contribuisce alla determinazione del costo finale attraverso parametri specifici e modificabili.

Il modello sviluppato consente di stimare diverse voci di costo, tra cui il costo del materiale depositato, il costo del substrato, il costo della saldatura, il costo del gas di protezione, il costo energetico, il costo macchina, il costo operatore, i costi non produttivi e i costi legati alle fasi di preparazione. In questo modo, il costo finale non viene considerato come un valore unico e indistinto, ma come il risultato della somma di più contributi. Questa impostazione permette di individuare quali fattori incidono maggiormente sul costo complessivo e di comprendere come una variazione di alcuni parametri di input possa modificare il risultato finale.

Uno degli obiettivi iniziali era quindi quello di ottenere un modello non solo teorico, ma anche utilizzabile in modo pratico per confrontare scenari produttivi diversi. Tale obiettivo può considerarsi raggiunto, poiché il file realizzato permette di inserire dati relativi a materiali, geometrie, parametri di processo e costi, restituendo una stima economica del componente. Inoltre, la struttura del modello consente di modificare i parametri principali e valutare rapidamente l'effetto di tali modifiche sul costo finale. Questo aspetto è particolarmente importante nel caso del WAAM, dove il costo non dipende soltanto dalla quantità di materiale, ma anche dai tempi di deposizione, dall'efficienza di costruzione, dai tempi ausiliari e dalle condizioni operative adottate.

Per verificare il funzionamento del modello è stato sviluppato un caso studio relativo a un componente assimilabile a un ingranaggio, ricavato da un articolo scientifico di riferimento, visionabile in [9]. A partire dal documento sono state rilevate le dimensioni principali del componente, che è stato successivamente ricostruito mediante modellazione tridimensionale. Il modello 3D ha permesso di ottenere le informazioni geometriche necessarie per l'inserimento del componente nel modello di costo. Questa fase ha rappresentato un passaggio fondamentale, poiché ha consentito di collegare il caso studio bibliografico allo strumento sviluppato nella tesi.

Il caso studio è stato analizzato attraverso due differenti configurazioni di parametri. La prima configurazione ha utilizzato i dati riportati nell'articolo, in modo da verificare la coerenza del modello rispetto al riferimento bibliografico. La seconda configurazione ha utilizzato i parametri Cranfield [10], adottati nel modello sviluppato, in modo da confrontare il comportamento del modello con una diversa impostazione produttiva ed economica. Il confronto tra i due approcci ha permesso di evidenziare differenze significative sia nei parametri di processo sia nei parametri economici.

È stata poi effettuata una verifica inserendo direttamente nel modello sviluppato i parametri presenti nell'articolo per ottenere una diretta comparazione. In questo caso il costo calcolato è risultato pari a 21,91 €, contro i 35,00 € riportati come riferimento, con uno scostamento di circa -37,4%. Tale differenza non deve essere interpretata necessariamente come un errore, ma come il risultato di una diversa logica di calcolo e di suddivisione delle voci di costo. Il modello sviluppato separa infatti in modo dettagliato le diverse componenti, come materiale depositato, substrato, costo di saldatura, gas, energia, tempi non produttivi, set-up e costo operatore. Nell'articolo, invece, alcune voci possono essere state aggregate o allocate in modo differente.

Una delle principali difficoltà incontrate durante lo sviluppo della tesi è stata proprio la raccolta e l'organizzazione dei dati necessari alla costruzione del modello. In letteratura non sempre sono disponibili valori univoci per i parametri di processo WAAM, poiché essi dipendono dal materiale utilizzato, dalla macchina, dalla geometria del componente, dalla strategia di deposizione e dalle condizioni operative. Per superare questa difficoltà, sono stati analizzati diversi riferimenti bibliografici e sono stati selezionati valori coerenti con il tipo di applicazione considerata. Quando non erano disponibili dati certi, sono state adottate ipotesi motivate e modificabili all'interno del modello, in modo da non rendere lo strumento rigido o limitato a un solo caso.

Un'altra difficoltà ha riguardato la definizione dei tempi non produttivi, come setup, riscaldamento, raffreddamento, movimentazione robot ma senza saldatura, caricamento e scaricamento del substrato. Questi tempi incidono in modo significativo sul costo finale, soprattutto per componenti di piccole dimensioni, ma non sono sempre standardizzati. Per questo motivo sono stati trattati come parametri del modello, lasciando la possibilità di modificarli in funzione del caso reale analizzato. Questa scelta ha permesso di rendere il modello più flessibile e adattabile a differenti scenari produttivi.

Ulteriore difficoltà è stata la comparazione tra il modello sviluppato e il modello presente nell'articolo. Anche utilizzando gli stessi dati di input, i risultati possono variare perché le voci di costo non vengono sempre considerate nello stesso modo. Alcuni modelli includono determinate attività all'interno di categorie aggregate, mentre altri le suddividono in maniera più dettagliata. La soluzione adottata è stata quella di confrontare non solo il costo finale, ma anche le singole voci che lo compongono, in modo da comprendere l'origine degli scostamenti e non limitarsi a una semplice differenza numerica.

Nel complesso, gli obiettivi iniziali della tesi possono considerarsi raggiunti. È stato analizzato il processo WAAM, sono stati individuati i principali parametri tecnici ed economici, è stato sviluppato un modello di costo strutturato e modificabile ed è stato realizzato un caso studio per verificarne il funzionamento. Il modello non ha l'obiettivo di fornire un valore assoluto valido in ogni condizione, ma di rappresentare uno strumento di supporto alla valutazione economica, utile per comprendere l'incidenza delle diverse voci di costo e per confrontare scenari produttivi differenti.

I risultati ottenuti confermano che la stima del costo nel processo WAAM è fortemente influenzata dalle ipotesi adottate. In particolare, i parametri più rilevanti risultano essere il costo macchina, il costo operatore, il tempo totale di processo, l'efficienza di costruzione, la quantità di materiale depositato e i tempi non produttivi. Per componenti semplici o di piccole dimensioni, il WAAM può non risultare sempre conveniente rispetto ai processi tradizionali, poiché i costi fissi e i tempi ausiliari incidono in modo significativo. Tuttavia, per componenti di grandi dimensioni, geometrie complesse o casi in cui il risparmio di materiale è elevato in special modo rispetto alle tecnologie sottrattive, il WAAM può rappresentare una soluzione produttiva interessante.

6.1 Sviluppi futuri

Un possibile sviluppo futuro del modello riguarda l'ampliamento del database interno, includendo nuove configurazioni impiantistiche per il processo WAAM. In particolare, potrebbe essere utile inserire diverse tipologie di robot antropomorfi. In questo modo il modello potrebbe diventare più flessibile e adattabile a diversi scenari industriali, permettendo di confrontare configurazioni a basso costo con soluzioni più avanzate e automatizzate spesso con macchinari già presenti in azienda.

Un ulteriore miglioramento potrebbe riguardare l'inserimento nel database di tavole rotanti o posizionatori, elementi molto utili nei sistemi WAAM per migliorare l'accessibilità del pezzo durante la deposizione. L'integrazione di questi dispositivi consentirebbe di simulare configurazioni più realistiche, soprattutto nel caso di componenti con geometrie complesse, dove la sola movimentazione del robot potrebbe non essere sufficiente per garantire una corretta orientazione della torcia. L'aggiunta di tali sistemi permetterebbe inoltre di valutare il loro impatto sui costi complessivi, sui tempi di produzione e sulla qualità del componente realizzato.

Un altro sviluppo importante potrebbe essere l'integrazione di un sensore di temperatura collegato direttamente al modello. Tale sensore consentirebbe di monitorare in tempo reale la temperatura del componente durante la deposizione dei cordoni. In questo modo sarebbe possibile stimare con maggiore precisione i tempi di attesa tra un cordone e il successivo, evitando di procedere con la deposizione quando il pezzo è ancora troppo caldo oppure, al contrario, quando è necessario mantenere una determinata temperatura di interpass.

7 Bibliografia

- [1] W. E. Frazier, «Metal Additive Manufacturing: A Review,» 2014.
- [2] H. W. J. Z. T. M. J. E. J. M. A. B. A. W.-H. A. D. W. Z. T. DebRoy, «Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,» *Elsevier*, 2018.
- [3] R. A. H. Z. a. S. K. Abid Shah, «A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process,» *Manufacturing and Material Processing*, 2023.
- [4] F. M. A. C. A. J. D. G. P. a. P. C. S. W. Williams, «Wire + Arc Additive Manufacturing,» 2015.
- [5] V. D. R. M. T. G. S. a. J. O. Tiago A. Rodrigues, «urrent Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM),» 2019.
- [6] Z. P. D. C. H. L. Donghong Ding, «Wire-feed additive manufacturing of metal component: technologies, developments and future interests,» 2014.
- [7] S. W. F. X. N. K. A. S. V. D. a. S. N. C. R. Cunningham, «Cost modelling and sensitivity analysis of wire arc additive manufacturing,» *Modena*, 2017.
- [8] P. C. P. L. S. Angioletta R. Catalano, «An economic evaluation of hybrid WAAM-subtractive manufacturing in relation to deposition process parameters,» in *31st CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2024)*, Torino, 2024.
- [9] J. P. O. R. G. Samruddha Kokare, «Modelling of Wire Arc Additive Manufactured Product Cost,» in *4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, Portogallo, 2023.
- [10] Y. Zhai, «EARLY COST ESTIMATION FOR ADDITIVE MANUFACTURE,» Cranfield University, 2012.
- [11] T. M. A. R. R. D. Dev Singh, «Powder bed fusion process: A brief review,» *Materials Today: Proceedings*, 2021.

- [12] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja e F. Martina, «Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations and constraints,» *Dipartimento di meccanica* , 2016.
- [13] Y. S. Parankush Koul, «A Review of Wire Arc Additive Manufacturing,» *International Journal of Scientific Research in Modern Science and Technology*, vol. 4, n. 8, 2025.
- [14] Z. (. P. D. C. H. L. Donghong Ding, «A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing,» 2014.
- [15] P. R. Sesana, «La saldatura delle lamiere in ambito automobilistico,» *POLITECNICO DI TORINO*, Torino, 2019.
- [16] P. M. G. G. T. T. Laghi V., «Wire and arc additive manufacturing : a research perspective,» *Università di Bologna*, Bologna, 2024.
- [17] D. G. P. K. A. K. T. S. B. S. Y. K. Paweł Cegielski, «Study of design and research of new welding manipulators on the example of an L-type positioner,» *Welding technology review*, 2019.
- [18] B. L. P. V. R. Nataliia Chernovol, «Development of low-cost production process for prototype components based on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM),» in *20th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM 2020)*, Belgio, 2020.
- [19] N. M. P.K. Palani, «Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding,» *Material Processing Technology*, 2006.
- [20] M. L. A. M. R. F. H. Bohdan Vykharta, «Monitoring and local gas shielding at laser-based welding of titanium alloys,» in *12th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2022]*, Germania, 2022.
- [21] S. J. Rupendra S. Tanwar, «Microstructure and tribological characterization of thin wall of bimetallic austenitic steel fabricated through wire arc additive manufacturing (WAAM),» *Science direct* , 2025.
- [22] W. 3D, «Reducing Component Part Costs Using WAAM,» [Online]. Available: <https://www.waam3d.com/blog-posts/reducing-component-part-costs-using-waam>.

- [23] J. M. M. G. N. K. M. W. Z. Al-Nabulsi, «Mechanical and X ray computed tomography characterisation of a WAAM 3D printed steel plate for structural engineering applications,» *Elsevier*, 2021.
- [24] J. X. L. ., Z. Z. ., Y. H. a. C. D. Wei Wu, «Forming Process, Microstructure, and Mechanical Properties of Thin-Walled 316L Stainless Steel Using Speed-Cold-Welding Additive Manufacturing,» *Metals*, 2019.
- [25] S. J. Rupendra Singh Tanwar, «Ti based alloys for aerospace and biomedical applications fabricated through wire + arc additive manufacturing (WAAM),» *Elsevier*, 2024.
- [26] J. M. S. W. P. C. F. W. F. Martina, «Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V,» *Journal of Materials Processing Technology*, 2012.
- [27] T. S. J. W. M. W. E.M. Ryan, «The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319,» *Journal of Materials Processing Tech*, 2018.
- [28] E. U. I. R. D. A. P. Á. Maider Arana, «Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminium WAAM components,» *Materials & Design*, 2022.
- [29] X. C. J. L. X. H. H. F. Malcolm Dinovitzer, «Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstrutture,» *Additive Manufacturing*, 2019.
- [30] P. L. Y. C. A. T. M. Yu Ming Zhang, «Automated sysrtem for welding-based rapid prototyping,» in *Mechatronics 12*, Kentucky, University of Kentucky, 2002, pp. 37-53.
- [31] L. J. d. S. a. A. S. Yuri Yehorov, «Balancing WAAM Production Costs and Wall Surface Quality through Parameter Selection: A Case Study of an Al-Mg5 Alloy Multilayer-Non-Oscillated Single Pass Wall,» *Manufacturing and Materials Processing*, 2019.
- [32] M. D. S. C. P. D.-S. N. R. P. David Kellena, «Modeling choice paradoxes under risk: From prospect theories to sampling-based accounts,» *Cognitive Psychology*, 2020.

- [33] J. E. P. C. F. M. C. W. R. D. Alessandro Busachi, «A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector,» *Elsevier*, 2017.
- [34] G. Z. H. L. Jun Xiong, «Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013.
- [35] J. C. H. P. M. T. P. Erik R. Denlinger, «Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys,» *Journal of Materials Processing Technology*, 2015.
- [36] S. W. F. N. K. A. V. D. C. R. Cunningham, «Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing and S.T. Newman,» in *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Modena, 2017.

IV. Ringraziamenti

Arrivato alla fine di questo percorso, desidero dedicare qualche riga a tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state vicine e mi hanno sostenuto durante questi anni.

Desidero innanzitutto rivolgere un sincero ringraziamento al mio relatore Ing. Mandolini Marco e al mio correlatore Ing. Gallozzi Simone, che mi hanno seguito con grande disponibilità, gentilezza e competenza durante lo sviluppo del progetto. La loro conoscenza della materia, unita alla capacità di trasmettere indicazioni chiare e preziose, è stata fondamentale per affrontare e sviluppare al meglio questo lavoro.

Il ringraziamento più grande va a mia mamma e a mio babbo, che rappresentano da sempre un punto fermo nella mia vita. A mia mamma, per l'amore immenso che non mi ha mai fatto mancare, per la sua presenza costante e per quella forza che, anche nei momenti più delicati, mi ha ricordato quanto siano preziose le persone che abbiamo accanto. A mio babbo, che forse aspettava questo momento più di me, esempio di dedizione e sacrificio, che mi ha insegnato quanto continuo la costanza, la responsabilità e la voglia di portare a termine ciò che si inizia. Grazie a entrambi per avermi sostenuto, ognuno a modo proprio, e per avermi trasmesso valori fondamentali, che mi hanno accompagnato in questo percorso e che porterò sempre con me.

Ringrazio mia sorella Nicoletta, una persona per me davvero importante, che mi è sempre stata vicina con il suo supporto, il suo aiuto e la sua presenza costante. Grazie per esserci stata nei momenti in cui avevo bisogno di un consiglio, di una parola di conforto o semplicemente di sentirmi sostenuto. Un grazie va anche a mio cognato Andrea, che dopo tutto questo tempo accanto a mia sorella è diventato per me quasi un fratello: grazie per le risate, le figuracce e per tutti quei momenti di leggerezza. Infine, un pensiero speciale va ad Ale e Diego, che con la loro spontaneità e il loro affetto riescono sempre a strapparmi un sorriso. Anche se a volte posso sembrare uno zio un po' severo, spero sappiate quanto siete importanti per me e quanto bene vi voglio.

Un ringraziamento speciale va a Camilla, che mi è stata accanto in ogni momento di questo percorso, condividendo con me le gioie più belle, ma anche le difficoltà più grandi. Grazie per la pazienza, il sostegno, la comprensione e per avermi incoraggiato ogni volta che ne ho avuto bisogno. In tanti momenti sei stata, come dici tu, il mio porto sicuro: una presenza silenziosa ma fondamentale, capace di darmi tranquillità anche quando tutto sembrava più pesante. Con te, è stato tutto più bello.

Ringrazio il mio migliore amico, Gianluca, con cui ho condiviso pensieri, difficoltà, momenti di svago e tante soddisfazioni. Ci conosciamo praticamente da sempre e, nel corso degli anni, ne abbiamo fatte davvero di tutti i colori insieme, costruendo ricordi che porterò sempre con me. Non siamo mai stati soliti dirci apertamente quanto ci vogliamo bene, ma so che per me lui c'è sempre stato, sia fisicamente, quando ho avuto bisogno di un aiuto concreto, sia nei momenti più difficili, con la sua presenza e il suo supporto. Avere accanto una persona sincera, presente e su cui poter contare davvero è un dono grande e per questo gli sarò sempre grato.

Un grazie va anche a mio cugino Marco, con cui ho condiviso tante uscite in moto, risate e momenti che porto con piacere nel cuore. Le giornate passate insieme, tra passione, divertimento e spensieratezza, sono state importanti per alleggerire i periodi più intensi e ritrovare un po' di leggerezza. Sono felice che nell'ultimo periodo ci siamo chiariti e riavvicinati, perché certi legami, anche quando attraversano momenti più difficili, restano importanti. Condividere di nuovo del tempo insieme, coltivando le nostre passioni, ha reso quest'ultima parte del percorso ancora più speciale.

A tutti voi, grazie di cuore.