

**POLITECNICO DI TORINO**

Collegio di Ingegneria Gestionale

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale**

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi della sostenibilità tecnologica e  
ambientale di processi di fabbricazione  
additiva basati su Metal Wire Deposition**



**Relatore**

Prof. Paolo Claudio Priarone

**Correlatore**

Ing. Angioletta Rita Catalano

**Candidato**

Vittorio Gianturco

**ANNO ACCADEMICO 2020/2021**



# Indice

<b>Indice delle Figure .....</b>	<b>III</b>
----------------------------------	------------

<b>Indice delle Tabelle.....</b>	<b>V</b>
----------------------------------	----------

<b>Introduzione .....</b>	<b>VII</b>
---------------------------	------------

## CAPITOLO 1

<b>Additive Manufacturing .....</b>	<b>1</b>
-------------------------------------	----------

1.1 Introduzione .....	1
------------------------	---

1.2 Breve storia della fabbricazione additiva .....	3
---	---

1.3 Tecnologie di Additive Manufacturing .....	4
--	---

1.3.1 Powder bed fusion .....	6
-------------------------------	---

1.3.2 Direct Energy Deposition.....	7
-------------------------------------	---

1.4 Vantaggi e svantaggi dell'AM.....	10
---------------------------------------	----

1.5 Campi di applicazione .....	13
---------------------------------	----

## CAPITOLO 2

<b>Metal Wire Deposition .....</b>	<b>16</b>
------------------------------------	-----------

2.1 EBAM.....	18
---------------	----

2.2 LMWD .....	19
----------------	----

2.3 WAAM .....	24
----------------	----

2.3.1 Filo-sorgente coassiali.....	27
------------------------------------	----

2.3.1.1 GMAW.....	27
2.3.2 Filo-sorgente off-axis .....	32
2.3.2.1 GTAW.....	32
2.3.2.2 PAW.....	34

## **CAPITOLO 3**

### **Analisi comparativa dell'efficienza energetica .....36**

3.1 Parametri di processo.....	36
3.2 Analisi statistica .....	42
3.2.1 Frequenza assoluta dei diametri del filo .....	42
3.2.2 Calcolo dell'indicatore SEI .....	43
3.2.3 Modelli di regressione (SEI Vs WFR) .....	48
3.2.3.1 Processi Laser (LMWD) .....	52
3.2.3.2 Processi ad arco elettrico (WAAM) .....	59

### **Conclusioni.....69**

### **Appendice.....73**

A.1 Letteratura analizzata .....	73
A.2 Dati origine Laser .....	82
A.3 Dati origine WAAM .....	92

### **Bibliografia .....99**

# Indice delle Figure

Figura 1 Ciclo di produzione AM [6] .....	2
Figura 2 Diagramma circolare che classifica tecnologie, materiali, tipo di modello, costi associati e aspetto estetico [5] .....	5
Figura 3 Rappresentazione schematica del processo PBF [9] .....	7
Figura 4 Rappresentazione schematica del processo DED [9] .....	8
Figura 5 Rapporto buy-to-fly tra Conventional Machining e Additive Manufacturing nel caso di una staffa [6] .....	10
Figura 6 Impatto del BTF sul costo del materiale [15].....	12
Figura 7 Andamento dei costi in relazione alla complessità geometrica [6] .....	12
Figura 8 Evoluzione delle applicazioni di AM [6] .....	14
Figura 9 Applicazioni [5].....	15
Figura 10 Altre applicazioni [5].....	15
Figura 11 Principio di funzionamento EBAM [27] .....	18
Figura 12 Principio di funzionamento LMWD [31] .....	20
Figura 13 Creazione di un pannello di una fusoliera di aereo con tecnologia a doppio fascio laser [32].....	20
Figura 14 Principio di deposizione laser assistita da metodo a induzione UHF [33] ..	21
Figura 15 Schema del sistema LHWC [34] .....	21
Figura 16 Setup operativo di un processo verticale con filo e substrato in leghe di alluminio [35] .....	22
Figura 17 Principio di funzionamento di WP-LMD [37] .....	23
Figura 18 Flusso di lavoro di fabbricazione ibrida di un componente esagonale [38] .....	24
Figura 19 Principio di funzionamento WAAM [43] .....	26
Figura 20 Wire-Based Additive-Subtractive Manufacturing [44] .....	26
Figura 21 Traiettoria delle gocce in a) Free flight e b) Short circuiting [46] .....	28
Figura 22 Principio di funzionamento T-GMAW nel caso di una lega Ti-Al [48] ...	29
Figura 23 Principio di funzionamento CMT nel caso di fabbricazione di perni saldati [51].....	30

Figura 24 Andamento della corrente in CMT, CMTP e VP-CMT [18].....	31
Figura 25 L'effetto del VP-CMT sul bagno di fusione [52] .....	32
Figura 26 Configurazione TopTIG [55] .....	33
Figura 27 TIG Vs TopTIG [56].....	33
Figura 28 Vista di sezione del processo di saldatura PTA [57].....	35
Figura 29 Schema del processo compulsively constricted WAAM [58] .....	35
Figura 30 Frequenza diametri filo .....	43
Figura 31 1) unità di controllo robot; 2) sistema di misurazione DAQ; 3) sorgente di alimentazione GMAW; 4) tavolo di saldatura; 5) dispositivo di serraggio; 6) manufatto; 7) estrattore di gas e fumi; 8) torcia di saldatura GMAW; 9) dispositivo di alimentazione del filo; 10) braccio a 6 assi; 11) spola; 12) gas di schermatura; 13 e 14) telecamere [95].....	45
Figura 32 Schema di misurazione della potenza dalla presa a muro nel caso di un processo GMAW [95] .....	47
Figura 33 Principali flussi degli approcci di produzione additivo (WAAM)/sottrattivo e sottrattivo puro [96] .....	48
Figura 34 SEI (MJ/kg) - tutte le prove laser .....	52
Figura 35 SEI (MJ/kg) - Laser – Aluminium .....	54
Figura 36 Output e curva di regressione (Laser - Alluminio) .....	55
Figura 37 SEI (MJ/kg) - Laser – Cobalt.....	55
Figura 38 SEI (MJ/kg) - Laser – Nickel.....	56
Figura 39 SEI (MJ/kg) – Laser – Steel.....	57
Figura 40 Output e curva di regressione (Laser - Acciaio) .....	58
Figura 41 SEI (MJ/kg) - Laser - Titanium.....	58
Figura 42 Output e curva di regressione (Laser - Titanio) .....	59
Figura 43 SEI (MJ/kg) - Tutte le prove ad arco elettrico, per tipo di processo.....	59
Figura 44 Curva di regressione (tutte le prove ad arco elettrico) .....	61
Figura 45 Output di Matlab (tutte le prove ad arco elettrico).....	61
Figura 46 SEI (MJ/kg) - Tutte le prove ad arco elettrico, per tipo di materiale .....	62
Figura 47 SEI (MJ/kg) - Solo CMT - Tutti i materiali .....	63
Figura 48 SEI (MJ/kKg) - Solo CMT - per tipo di materiale .....	64

Figura 49 SEI (MJ/kg) - Processo GMAW (compreso CMT) - Per tipo di Materiale .....	65
Figura 50 Output e curva di regressione (GMAW compreso CMT) .....	66
Figura 51 SEI (MJ/kg) - Processo GTAW - Per tipo di Materiale .....	66
Figura 52 Output e curva di regressione GTAW .....	67
Figura 53 SEI (MJ/kg) - Processo PAW .....	67
Figura 54 Schema di valutazione dell'impatto ambientale di processi basati su Metal Wire Deposition [2] .....	72

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 Tecnologie DED [8].....	9
Tabella 2 Confronto dei costi di materia prima tra polvere e filo per vari tipi di materiale [14].....	16
Tabella 3 Parametri di processo Laser .....	38
Tabella 4 Parametri di processo WAAM.....	39
Tabella 5 Leghe e materiali analizzati .....	40
Tabella 6 Stima dell'errore tra potenza fornita e potenza calcolata.....	41
Tabella 7 Dati origine del grafico in Figura 29 .....	42
Tabella 8 Gas di protezione per specifici materiali [41].....	46
Tabella 9 Letteratura analizzata .....	73
Tabella 10 Laser - Alluminio.....	82
Tabella 11 Laser - Cobalto.....	87
Tabella 12 Laser - Nickel.....	88
Tabella 13 Laser - Acciaio.....	89
Tabella 14 Laser - Titanio.....	90
Tabella 15 CMT.....	92
Tabella 16 GMAW (escluso CMT) .....	93
Tabella 17 GMAW (compreso CMT) .....	95
Tabella 18 GTAW .....	97

Tabella 19 PAW .....	98
----------------------	----

# Introduzione

La tecnologia ha probabilmente influenzato la storia umana più di qualsiasi altro campo. Si tratta di innovazioni (dal vapore al *world wide web*) che hanno migliorato la vita in molti settori e aperto nuove strade e possibilità, impiegando tuttavia decenni affinché le forze dirompenti delle singole tecnologie portino concreti effetti all'interno della struttura socioeconomica. È opinione diffusa che l'*Additive Manufacturing* (AM) o stampa 3D abbia il vasto potenziale per diventare una di queste tecnologie. Lo dimostra la crescita esponenziale che ha caratterizzato l'AM fin dalle prime fasi di ideazione. Queste tecniche di stampaggio, in origine ideate per la sola prototipazione rapida, con il tempo hanno cominciato a essere pensate e utilizzate anche per altri impieghi. Con l'avvento di nuovi materiali e di nuovi processi di fabbricazione, ogni tecnica ha dato il suo contributo per diverse applicazioni [1].

Come si vedrà nel Capitolo 2 e Capitolo 3, nel corso degli anni si sono sviluppate tantissime tecnologie e gli sforzi della comunità scientifica si sono concentrati, in particolar modo, sull'ottimizzazione del processo. Con particolare riferimento ai processi di deposizione di materiale metallico sottoforma di filo, in letteratura sono presenti numerosi studi sul percorso di deposizione, sulle varianti di processo (fabbricazione ibrida e deposizione a doppio filo di materiali diversi) e sulle tensioni residue. Tuttavia, manca una consolidata conoscenza sull'impatto ambientale e sull'efficienza energetica di tali processi, che per loro natura sono ad alta intensità energetica [2]. Normative ambientali sempre più stringenti e l'aumento del costo di fornitura dell'energia elettrica hanno reso il risparmio energetico una delle massime priorità per le industrie manifatturiere. Pertanto, diventa di fondamentale importanza l'identificazione e l'ottimizzazione dei parametri di processo che maggiormente influiscono sull'efficienza energetica [3].

È essenziale effettuare analisi quantitative sul consumo energetico di tali processi per esplorare la loro potenziale sostenibilità sia rispetto alle tecnologie basate su letto di polvere sia rispetto alle lavorazioni per asportazione di materiale. Infatti, se da un lato produrre un componente utilizzando processi basati su polvere metallica non è una

soluzione molto sostenibile (soprattutto dal punto di vista ambientale), le potenzialità dell'arco elettrico stanno cambiando la prospettiva [4].

Pertanto, il presente lavoro di tesi ha l'obiettivo di analizzare i processi *Metal Wire Deposition* (MWD), dal punto di vista della sostenibilità tecnologica e ambientale.

Il Capitolo 1 ha riguardato una panoramica sulle tecnologie di Fabbricazione Additiva, il loro sviluppo negli anni, le applicazioni e i vantaggi/svantaggi che ne conseguono.

Nel Capitolo 2, dopo aver approfondito i processi DED (*Direct Energy Deposition*), ci si è soffermati sulle tecniche di *wire deposition*. Per ogni tecnologia vengono presentate tutte le possibili varianti e le rispettive caratteristiche.

Infine, nel Capitolo 3 si entra nel merito della fase operativa, ovvero l'analisi quantitativa dei consumi energetici per ogni prova individuata in letteratura. Si è proceduto dapprima a classificare e individuare i parametri di processo dalla letteratura internazionale. In seguito, è stato possibile, sulla base del campione di dati selezionati, calcolare l'indicatore SEI (*Specific Energy Input*). Ottenuta una misura puntuale dell'efficienza energetica, si è cercato di dedurre le caratteristiche energetiche della popolazione dall'osservazione di una parte di essa. È stato possibile, in questo modo, effettuare valutazioni critiche partendo da quanto noto in letteratura.





# CAPITOLO 1

## Additive Manufacturing

### 1.1 Introduzione

La normativa ISO (ISO 52900) definisce la Fabbricazione Additiva, conosciuta come *Additive Manufacturing* (AM) o Stampa 3D, come un processo di fabbricazione mediante il quale unità o strati successivi di materiale vengono depositati per formare un modello [5]. Per modello si intende un oggetto di geometria complessa con adeguate prestazioni in termini di tolleranze dimensionali, rugosità superficiali e caratteristiche meccaniche. [6]

Il punto di partenza di ogni processo di stampa 3D è la creazione di un modello digitale, il quale può essere creato usando una varietà di programmi CAD (*Computer-Aided Design*) oppure derivare da acquisizioni di *Reverse Engineering*. La *Reverse engineering* è una tecnica che consiste nel digitalizzare un oggetto fisico, mediante dispositivi a scansione ottici o macchine di misura a coordinate, al fine di ottenerne un modello matematico [6]. Il modello è poi convertito in un file STL (*Standard Triangulation Language*) che permette di approssimare la superficie esterna attraverso triangoli di diverse dimensioni (*mesh*), in modo da seguire il profilo del pezzo. In un passaggio successivo, tramite programmi di *slicing*, il modello viene “affettato” e i vari strati ottenuti, i cosiddetti *layers*, vengono virtualmente sovrapposti tra loro durante la stampa, riuscendo così a ricostruire la geometria desiderata. Una volta che il pezzo è stato costruito, come si può vedere dallo schema in Figura 1, i successivi passaggi sono la rimozione dalla macchina ed eventuali operazioni di pulizia, finitura e rimozione dei supporti, qualora realizzati [1][6]. Pertanto, il materiale, processato dalla stampante 3D, è stratificato in accordo al disegno e al processo. Il principio di stratificazione è l’unico aspetto comune alle molteplici tecnologie di stampa 3D attualmente esistenti, sebbene esse trattino materiali diversi in modi diversi per creare l’oggetto finale [6]. A seconda dei vari processi, tuttavia, il materiale depositato si unisce a quello dello strato precedente secondo diversi meccanismi: tramite riscaldamento o fusione del materiale depositato, o tramite l’utilizzo di elementi che

fanno da legante, o per fotopolimerizzazione [6]. Plastica, metalli, ceramica e sabbia sono ora tutti comunemente usati per la prototipazione e produzione industriale. Altri materiali sui quali i ricercatori stanno indirizzando i loro sforzi sono i bio materiali e alcuni tipi di cibo [1].

Quindi l'adozione delle tecniche di fabbricazione additiva è subordinata alla disponibilità del modello matematico del componente realizzato su di un sistema CAD tridimensionale.

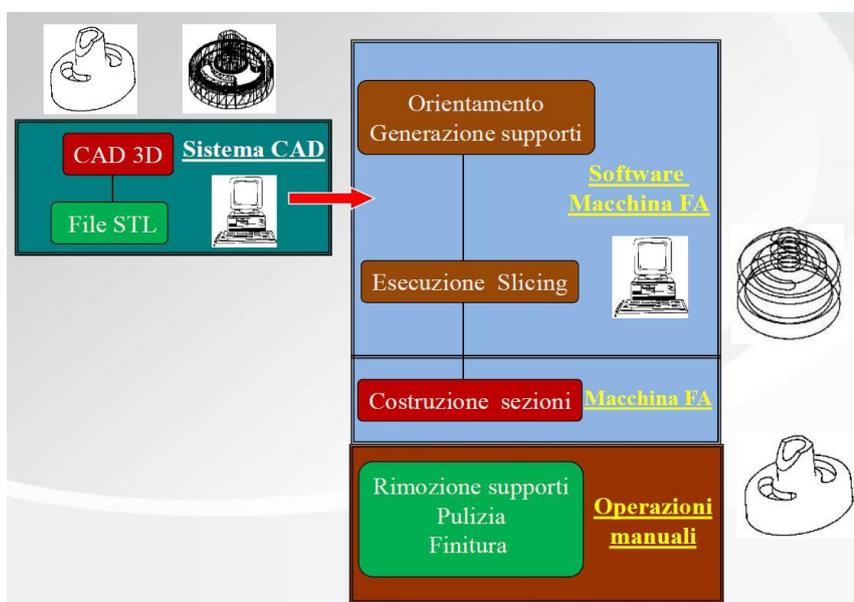


Figura 1 Ciclo di produzione AM [6]

Ciò contrasta con quanto accade nelle tecniche di produzione tradizionale, anche note come *Subtractive Manufacturing*, in cui si procede per asportazione di materiale tramite processi di lavorazione come fresatura e tornitura [1]. Con il sistema produttivo tradizionale è evidente un elevato livello di sprechi, derivante dalla rimozione del materiale dal pezzo grezzo, mentre con l'*Additive Manufacturing* il prodotto viene creato depositando o solidificando solo il materiale necessario alla realizzazione del prodotto, riducendo così gli sprechi come si vedrà in Figura 5.

## 1.2 Breve storia della fabbricazione additiva

Le prime tecnologie di stampa 3D videro la luce alla fine degli anni '80 e presero il nome di *Rapid Prototyping* (RP). Questo perché i processi erano originariamente concepiti come un metodo veloce e conveniente di creazione di prototipi per lo sviluppo di prodotti industriali. Infatti, risale al 1986 il primo brevetto per il processo di stereolitografia (SLA). Tale invenzione appartiene a Charles (Chuck) Hull, che costruì il suo macchinario nel 1983. Hull successivamente fondò la 3D Systems Corporation, ritenuta oggi una delle più grandi aziende operanti nel settore dell'AM. SLA non era la sola tecnologia in fase di sviluppo in quel periodo, infatti nel 1989 Carl Deckard depositò il brevetto per il processo di *Selective Laser Sintering* (SLS). Nello stesso anno, Scott Crump, il cofondatore della Stratasys, brevettò la tecnica *Fused Deposition Modelling* (FDM), la cui scadenza portò alla diffusione delle stampanti 3D a basso costo.

In Europa il 1989 vide anche la nascita di EOS GmbH in Germania, leader mondiale fin dal 2002 per i sistemi di sinterizzazione laser. Tra il suo vasto portafoglio di brevetti è possibile citare il processo *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS).

Nei decenni successivi aumentò il numero di nuovi entranti nel mercato, ma la quota di mercato rimase in mano a poche aziende, tra le quali quelle sopra citate.

Tra gli anni '90 e 2000 vennero introdotte nuove tecnologie e la R&S venne condotta anche dai più avanzati fornitori di tecnologie per specifiche applicazioni per stampi, attrezzature di fusione e produzione di preserie. Nascono nuove terminologie: *Rapid Tooling* (RT), *Rapid Casting* (RC) e *Rapid Manufacturing* (RM) che si riferiscono rispettivamente alla produzione rapida di utensili, attrezzature di fusione e produzione di pre-serie.

Ben presto esplose l'utilizzo delle stampanti 3D a basso costo, contribuendo alla diffusione della tecnologia presso un pubblico più ampio. Questo anche grazie a filosofie open source, come ad esempio RepRap (*Replicating Rapid Prototyper*) che permetteva di creare una stampante in grado di riprodurre sé stessa. Nel 2009 è stato messo in vendita il primo kit di stampante 3D basato sul concetto RepRap. Da quel

momento, quello che era un oggetto per pochi divenne un oggetto che, in teoria, tutti potevano realizzare [7].

Negli ultimi anni le tendenze del settore hanno portato e porteranno a miglioramenti incrementali in termini di precisione di stampa, velocità, costi di materiali e macchinari e infine sostenibilità economica e ambientale. Tutto ciò ha favorito un'accesa concorrenza, abbattendo sensibilmente i prezzi di mercato.

Occorre precisare che in questo paragrafo sono state esaminate solo le principali tecniche di AM, che hanno fatto da apripista per tutte le altre. L'intera gamma di processi e materiali ad oggi disponibili può generare confusione a causa delle diverse nomenclature che a volte, fanno riferimento alla stessa tecnologia ma sviluppata da diversi produttori. Nel paragrafo 1.3 si cercherà di fare chiarezza in tal senso.

### **1.3 Tecnologie di Additive Manufacturing**

Ciascun sistema di AM impiega diverse tecnologie che a sua volta processano diversi materiali in diversi modi. Quindi, una delle principali limitazioni di base dell'*Additive Manufacturing* (in termini di materiali e applicazioni) è proprio che non esiste una soluzione unica [1].

Vista la grande varietà di tecnologie, è necessaria una classificazione che tenga conto delle diverse variabili in gioco. Una delle possibili classificazioni che evidenzia le relazioni tra tecnologie, materiali, tipo di modello, costi associati e aspetto estetico, è mostrata in Figura 2.

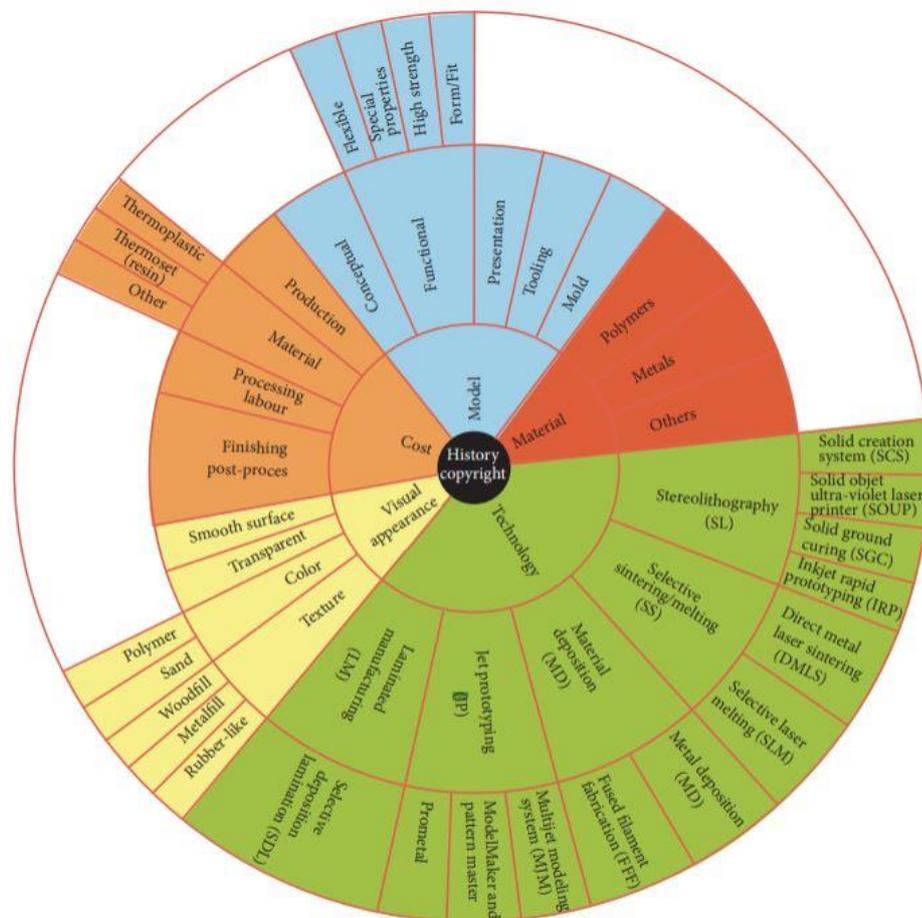


Figura 2 Diagramma circolare che classifica tecnologie, materiali, tipo di modello, costi associati e aspetto estetico [5]

Un'altra classificazione è quella effettuata dall' ISO in collaborazione con ASTM International, nata con lo scopo di creare normative univoche sull'AM [8]:

- *Material extrusion* – processo di AM nel quale il materiale è selettivamente erogato attraverso un ugello;
- *Material jetting* – processo di AM nel quale gocce di materiale sono selettivamente depositate;
- *Binder jetting* – processo di AM nel quale un agente legante liquido è selettivamente depositato per legarsi con la polvere dei materiali;
- *Sheet lamination* – processo di AM nel quale lamine di materiale sono legate tra di loro per formare una parte;

- *Vat photopolymerization* – processo di AM nel quale un fotopolimero liquido è selettivamente trattato da un polimero foto attivabile;
- *Powder bed fusion* (PBF) – processo di AM in cui si sfrutta energia termica per fondere selettivamente aree collocate su un letto di polvere;
- *Directed energy deposition* (DED) – processo di AM nel quale si sfrutta energia termica per fondere materiali mentre vengono depositati.

Queste sette macrocategorie a loro volta sono formate da varie tecniche produttive che rientrano sotto la propria famiglia di appartenenza. Il presente lavoro di tesi sarà incentrato sull'ultima, in particolar modo su un processo che fa parte della categoria DED. Tuttavia, prima di affrontare l'argomento, è bene delineare quali differenze esistano tra i più consolidati *Powder bed fusion* e i *Directed Energy deposition*.

### 1.3.1 Powder bed fusion

Si basa sul rilascio di uno strato di polvere metallica sulla piattaforma di costruzione e sulla successiva fusione selettiva del letto di polvere da parte di una sorgente energetica (raggio laser o fascio elettronico). Le polveri in ogni strato sono parzialmente (*Selective Laser Sintering*) o totalmente (*Selective Laser Melting*) fuse da un raggio laser che sfrutta come mezzo laser attivo CO<sub>2</sub> o un cristallo d'ittrio e alluminio drogato (Nd:Yag). L'*Electron Beam Melting* (EBM) sfrutta invece un fascio di elettroni emessi da un filamento di tungsteno. Successivamente si ha una rapida ri-solidificazione che migliora le caratteristiche meccaniche dei materiali di partenza. La camera di costruzione è in atmosfera inerte (per processi laser) o sottovuoto (per processi *Electron Beam*) per evitare ossidazioni, riducendo il livello di ossigeno. La fonte di energia scorre su ogni strato di polvere per fondere selettivamente il materiale seguendo un percorso predefinito sulla base del modello CAD. In Figura 3 si nota come, completato uno strato, la camera di costruzione si abbassa lungo l'asse Z, per permettere la formazione di strati successivi. Un meccanismo a rullo deposita la polvere sulla camera di costruzione che è nuovamente investita dalla fonte di energia. Questo ciclo è ripetuto, strato dopo strato, finché non si è formato il pezzo completo [6][9].

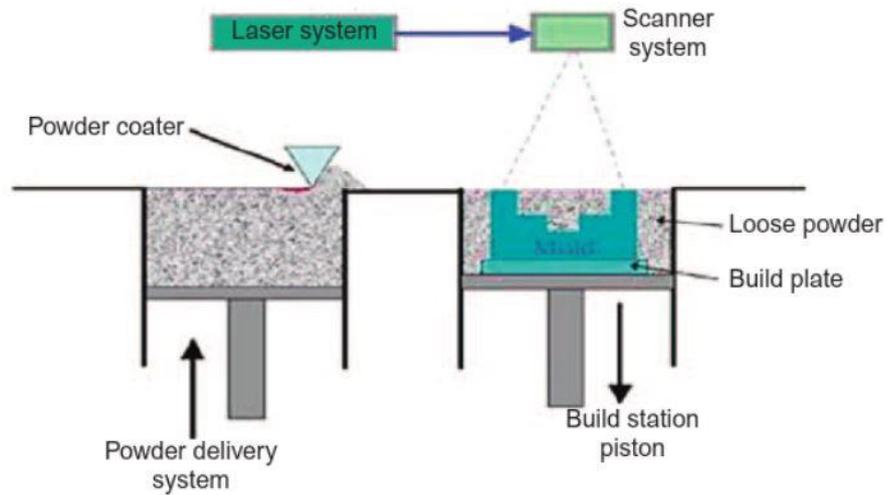


Figura 3 Rappresentazione schematica del processo PBF [9]

### 1.3.2 Direct Energy Deposition

È una tecnica di fabbricazione per creare componenti metallici e funzionali, strato su strato. A differenza del processo di PBF, in cui è selettivamente fuso un letto di polvere, il processo DED viene effettuato alimentando contemporaneamente polvere o filo e una fonte di energia concentrata. In questo metodo, sulla superficie del substrato o dell'ultimo strato depositato si forma un bagno di fusione grazie all'uso di laser ad alta potenza, come Nd:YAG o CO<sub>2</sub>, o altre fonti di energia (arco elettrico o fascio di elettroni) e allo stesso tempo la polvere o il filo vengono depositati nel bagno di fusione attraverso il fascio energetico. Il materiale, depositato con una certa velocità, viene rilasciato da un ugello o da una testa di deposizione multi-ugello che si muove a velocità costante seguendo un percorso utensile definito dall'utente [9]. In realtà, la velocità di traslazione della testa di deposizione, dovendo adeguarsi alla traiettoria prevista per il percorso di deposizione, segue degli step dove i parametri vengono mantenuti costanti per un certo tratto di percorso, come in Corbin et al. [10]. In seguito, il processo viene ripetuto, strato dopo strato, basandosi su un modello CAD precedentemente sezionato dal software che governa la macchina, fino alla completa creazione del pezzo. In Figura 4 è possibile vedere il suo funzionamento.

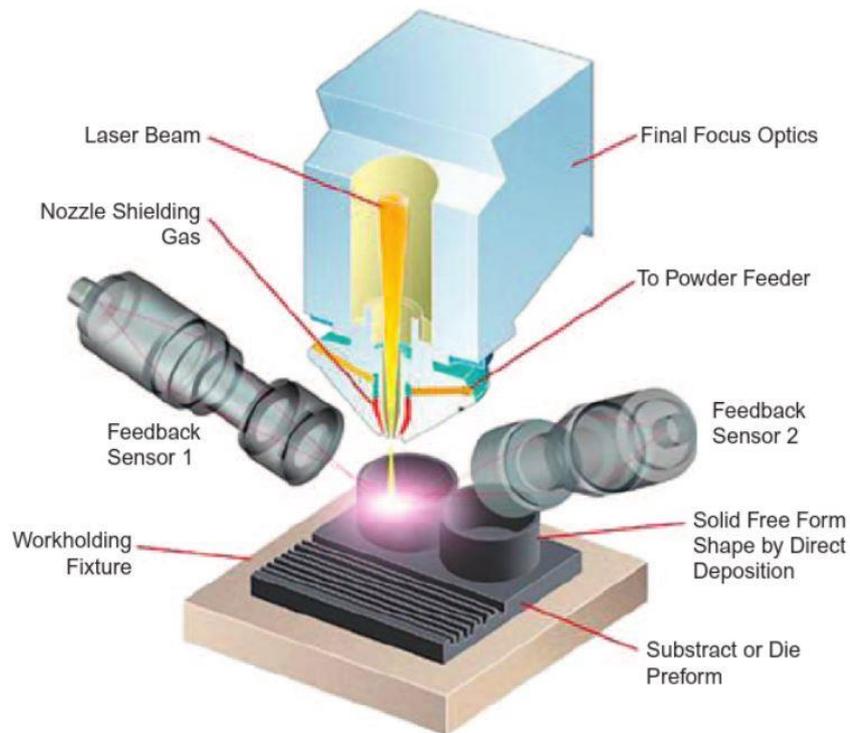


Figura 4 Rappresentazione schematica del processo DED [9]

Tra i processi AM, il DED riveste una posizione unica grazie al suo potenziale nel fabbricare componenti metallici puri e nel riparare e rivestire parti che non possono essere riparati con metodi tradizionali. Questo è dovuto principalmente a una zona esposta al calore molto piccola, a una densità molto alta, distorsioni o crepe minimizzate e un'accurata deposizione. [11] La riparazione di componenti danneggiati permette un risparmio energetico considerevole. Morrow et al. [12], hanno rilevato una domanda energetica pari a 8 GJ per la rilavorazione di uno stampo mediante *Direct Metal Deposition* (DMD), rispetto ai 16,5 GJ richiesti per la produzione ex novo con macchine CNC, portando così ad una diminuzione del 50% in termini di energia necessaria.

Inoltre, è possibile ottenere leghe in-situ alimentando le diverse polveri nel bagno di fusione. In particolare, regolando la velocità di alimentazione dell'ugello è possibile ottenere le desiderate caratteristiche microstrutturali e composizioni chimiche. Inoltre, tale processo presenta un tasso di deposizione più elevato e una finestra di processo relativamente più ampia rispetto alle altre tecniche AM.

Al di là dei meriti di tale processo, i principali difetti sono la bassa efficienza della polvere e la scarsa finitura superficiale. Anche in DED, allo stesso modo del processo PBF, permangono problemi di distorsione e stress termico residuo in quanto sono entrambi processi con un alto gradiente di temperatura.

Diversamente da PBF, alcune macchine avanzate DED fanno uso di un sistema a 5 o più assi, invece di 3, permettendo la fabbricazione ottimale di componenti dalle forme particolarmente complesse, senza dover ricorrere alla realizzazione di supporti. L'utilizzo di robot, o di strutture gantry, permette la realizzazione di componenti senza troppe limitazioni nelle dimensioni, essendo svincolati dal volume della camera di lavoro di una macchina basata su tecnologia a letto di polvere. Ulteriore differenza rispetto a PBF, dove gli impianti operano sottovuoto oppure insufflando gas inerte, nei processi DED con metalli non reattivi (acciaio, leghe di Nichel) un ambiente con gas inerte non è necessario. Per proteggere il materiale dall'ossidazione viene applicato un flusso di gas schermante nella zona di fusione [13].

Le tecnologie etichettate come processi DED sono diverse e sono descritte in Tabella 1.

Tabella 1 Tecnologie DED [8]

CATEGORIA	TECNOLOGIA	SOCIETÀ	DESCRIZIONE
<b>DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)</b>	Direct metal Deposition (DMD)	DM3D Technology LLC (precedentemente POM Group)	Utilizzo di laser e polvere metallica per la fusione e deposizione mediante un processo a ciclo chiuso
	Laser engineered net shaping (LENS)	Optomec. Inc.	Utilizzo di laser e polvere metallica per la fusione e deposizione
	Direct manufacturing (DM)	Scialky. Inc.	Utilizzo di un fascio elettronico e filo metallico per la fusione e deposizione
	Shaped metal deposition or wire and arc additive manufacturing (WAAM)	Non ancora in commercio (brevetto di Rolls Royce Plc.)	Utilizzo di un arco elettrico e filo metallico per la fusione e deposizione

## 1.4 Vantaggi e svantaggi dell'AM

La fabbricazione additiva riduce i tempi e i costi di sviluppo prodotto dalla fase di progettazione a quella di produzione anche perché non occorrono investimenti specifici per la produzione delle attrezzature. Inoltre, il vantaggio va oltre il solo risparmio per le attrezzature grazie alla libertà delle forme e alla possibilità di avviare la produzione immediatamente dopo la fase di progettazione. Il grande vantaggio rispetto alle lavorazioni convenzionali è il minore rapporto tra il peso del materiale grezzo e del prodotto finito, ovvero il rapporto *Buy-to-fly* (BTF), come è possibile osservare nella Figura 5. Il BTF fornisce indicazioni sull'efficienza di utilizzo del materiale e dell'energia incorporata per produrre un pezzo. Ad esempio, nelle lavorazioni tradizionali (fresatura, tornitura, pressocolata) il rapporto BTF può andare anche oltre 30:1 [14]. Ciò significa che per ottenere 1 kg di prodotto finito, è necessario lavorare 30 kg di materiale grezzo, che saranno in gran parte scarti di produzione.

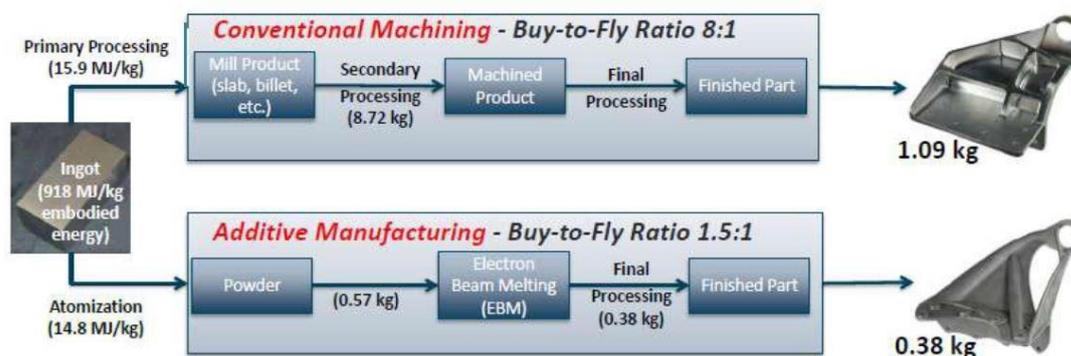


Figura 5 Rapporto buy-to-fly tra Conventional Machining e Additive Manufacturing nel caso di una staffa [6]

Nel processo di lavorazione tradizionale il materiale di prima qualità viene legato e fuso due volte in un forno fusore ad arco sottovuoto [15]. Questo processo è stato costantemente migliorato nel corso degli anni. Una volta in forma di lingotto, il materiale può essere lavorato tramite processi di asportazione, per ottenere, come per esempio in Figura 5, un prodotto finito di 1,09 kg partendo da un semilavorato di 8,72 kg. È evidente il consumo di materiale dovuto alle caratteristiche intrinseche della lavorazione sottrattiva, che, di fatto, asporta materiale in eccesso. Utilizzando un

processo AM invece, come l'*Electron Beam Melting*, è possibile ottenere la medesima staffa con un peso finale di 0,38 kg. In tal caso viene utilizzato solo il materiale strettamente necessario e la polvere non utilizzata, dopo essere stata setacciata, può essere riciclata senza che la composizione chimica o le proprietà fisiche siano alterate [6]. Lo spreco di materiale è quindi ridotto al minimo.

Nel caso di produzione di un componente in titanio destinato a un utilizzo aerospaziale (Barnes et al. [15]), è possibile osservare come, con le lavorazioni tradizionali, si ottenga un rapporto BTF 11:1 e la fase che incide maggiormente sui costi totali è la lavorazione (52%). Investimenti in migliori utensili da taglio, in tecniche criogeniche per raffreddare l'utensile o utilizzando energia termica per ridurre la rigidità del materiale consentono una riduzione dei costi. Tuttavia, la produzione additiva resta la tecnologia che ha il potenziale di abbattere notevolmente il rapporto BTF fino a un valore di 1,5. In tal caso, il materiale di partenza incide per il 20% sul costo di produzione dello stesso pezzo con polveri metalliche contro il 48% della lavorazione convenzionale. È altrettanto vero che il costo unitario delle polveri metalliche è più alto di quello del materiale lavorato. La Figura 6 evidenzia come, per produrre lo stesso pezzo, un rapporto BTF 11:1 comporta l'utilizzo di più materia prima, portando a un costo più alto, mentre l'efficienza intrinseca dell'AM, nonostante l'alto costo delle polveri, consente, in ogni caso, di ottenere un costo totale più basso [15].

Miglioramenti ulteriori dell'efficienza si ottengono con i processi basati su filo metallico in quanto permettono di depositare quasi tutto il materiale consumato e inoltre sono caratterizzati da un costo del materiale inferiore, come si vedrà nel Capitolo 2. Pertanto, il *Metal Wire Deposition* risulta essere una tecnica di produzione molto favorevole nei settori dove i rapporti BTF sono tipicamente alti con le modalità convenzionali, come quello aerospaziale e della difesa [16][17].

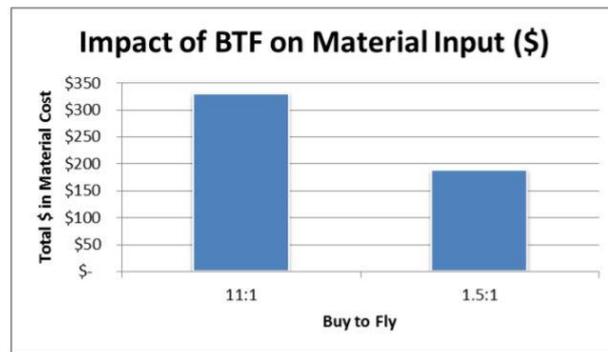


Figura 6 Impatto del BTF sul costo del materiale [15]

Il ridotto consumo di materie prime porta a una supply chain più efficiente con minori lead times e assenza di magazzini [6].

Un ulteriore vantaggio è spiegato dal seguente grafico (Figura 7).

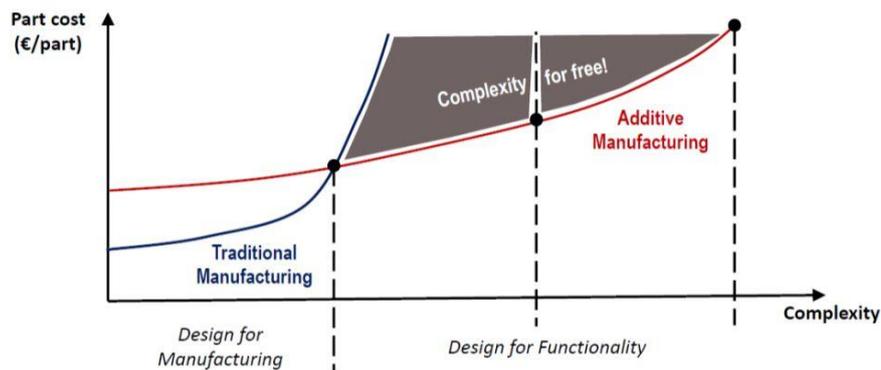


Figura 7 Andamento dei costi in relazione alla complessità geometrica [6]

Come si può notare, con una complessità bassa, l'approccio AM risulta essere più costoso di un approccio tradizionale e ben consolidato nel tempo. All'aumentare della complessità, il costo unitario per un processo convenzionale aumenta esponenzialmente fino a renderlo non conveniente, favorendo l'adozione delle tecniche additive. Ci sono ancora grandi margini di produttività che la tecnologia AM può raggiungere nel corso del tempo con un impatto diretto sulla componente costo e sulla competitività del processo. Entro il 2025 si stima un risparmio pari a \$ 593 miliardi nei settori industriali in cui l'AM è maggiormente impiegata (aerospaziale, componenti medicali e utensili) [18].

Qui di seguito sono elencati i vantaggi suddivisi per prodotto e per processo. [6]

In termini di processo:

- Utilizzo di una sola macchina che consente forme illimitate;
- Assenza di attrezzature e di dispositivi di bloccaggio;
- Sottosquadri ammessi;
- Un solo step produttivo;
- Minimo intervento dell'operatore;
- Tempi e costi legati solo alle dimensioni e non alla complessità geometrica.

In termini di prodotto:

- Libertà di progettazione;
- Possibilità di realizzare strutture leggere (forme cave complesse);
- Design ergonomico e alta personalizzazione.

È altrettanto vero che ci sono svantaggi che l'evoluzione tecnologica sta cercando di eliminare progressivamente.

Dal punto di vista del processo, i limiti principali sono rappresentati da:

- Volumi di lavoro ridotti che di conseguenza influenzano la dimensione dei pezzi;
- Velocità di costruzione limitata;
- Ciascuna macchina lavora solo con determinati materiali.

Per ciò che concerne il prodotto invece, si evidenziano:

- La necessità di adoperare i supporti durante la lavorazione per alcuni processi;
- Il numero di materiali che può essere utilizzato è limitato.

## **1.5 Campi di applicazione**

La Fabbricazione Additiva è stata concepita per ridurre i tempi di realizzazione dei prototipi e per molti anni ha assunto il nome di Prototipazione Rapida. La realizzazione dei prototipi è ancora oggi l'applicazione principale della fabbricazione additiva, ma negli ultimi anni sta subendo un rapido sviluppo come processo di produzione di parti definitive, come si nota dalla timeline in Figura 8 [6].

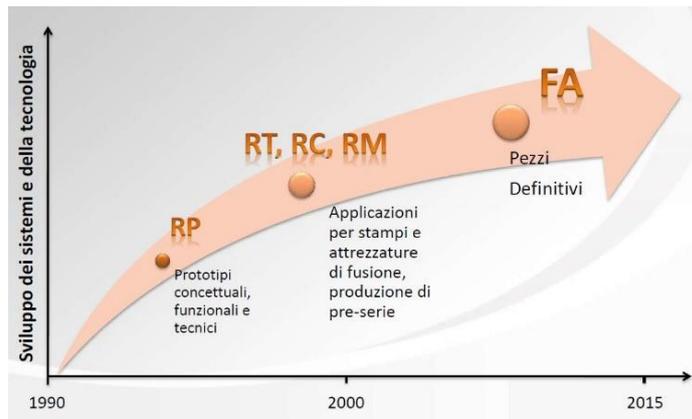


Figura 8 Evoluzione delle applicazioni di AM [6]

I campi d'impiego principali sono:

- fabbricazione degli stampi metallici per preserie nell'ambito della pressocolata. La tecnica di FA impiegata è la *Selective Laser Melting* (SLM) con l'impiego di miscele metalliche;
- fabbricazione degli stampi per l'iniezione della cera. Le tecniche di FA che meglio si prestano per la fabbricazione di attrezzature per l'iniezione della cera sono la Stereolitografia (SLA), la *Selective Laser Melting* (SLM), la *Fused Deposition Modelling* (FDM);
- fabbricazione di modelli a perdere. Le tecniche di FA che meglio si prestano per la fabbricazione dei pattern sacrificali sono: la stereolitografia (SLA-Quick Cast), la *Selective Laser Sintering* (SLS), la *Drop On Demand* (DOD).

Queste tecnologie sono molto utilizzate nell'ambito del motorsport e aerospace e vi è un crescente interesse per la produzione di gioielli, oggetti di design e materiale tessile (Figura 9). Con la disponibilità di nuovi materiali flessibili ma allo stesso tempo resistenti, è possibile fabbricare vestiti e abbigliamento sportivo, beneficiando dell'alta personalizzazione e complessità geometrica (Figura 10).

Nel settore biomedico la creazione di protesi e la disponibilità di modelli 3D a partire da scansioni mediche consente un'alta qualità diagnostica in minori tempi e costi.

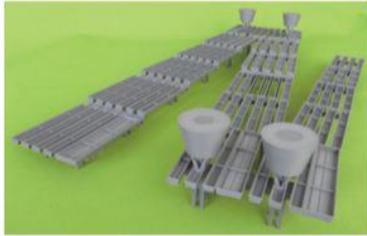
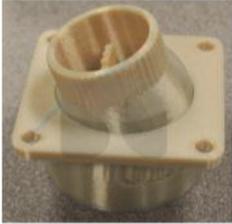
		
Product development	Motor vehicles	Medical/dental
		
Architecture	Aeronautics	Food

Figura 9 Applicazioni [5]

		
Production	Jewellery (microfusion)	Art and crafts
		
Textiles-fashion	Toys-videogames	Sport

Figura 10 Altre applicazioni [5]

## CAPITOLO 2

### Metal Wire Deposition

Le tecniche di deposizione con filo appartengono alla macrofamiglia *Shaped Metal Deposition* (SMD) [19]. Tali processi possono essere definiti “*build-up welding*” [20], in quanto un filo metallico viene fuso tramite una sorgente di energia e successivamente depositato su una struttura a strati con lo scopo di creare o ricostruire parti. I processi basati su *Metal Wire Deposition* (MWD) sono generalmente caratterizzati da alti tassi di deposizione, economicità del materiale (vedi Tabella 2) e delle attrezzature [21], e sono in grado di generare parti ad alta densità che mostrano una buona integrità strutturale [22][23]. I fili metallici sono più semplici da produrre e consentono un processo pulito, senza inquinamento da polveri metalliche. Dunque, i prodotti finali avranno un minor impatto ambientale. Si potrebbe citare la tecnologia di Gefertec GmbH sviluppata con l’obiettivo di creare turbine, propulsori, pompe e valvole idrauliche mediante fili in lega di rame che siano resistenti all’usura e corrosione e capaci di operare per lunghi periodi in ambienti marini [14].

Tabella 2 Confronto dei costi di materia prima tra polvere e filo per vari tipi di materiale [14]

Material Feedstock	Titanium 6Al-4V	Tantalum	Inconel 625	Stainless Steel 316
Wire - 0.035" diameter (0.9 mm)	\$58/lb.	\$545.30/lb.	\$26.73/lb.	\$5.19/lb.
Wire - 0.045" diameter (1.1 mm)	\$54/lb.	\$545.30/lb.	\$23.30/lb.	\$4.63/lb.
Wire - 0.062" diameter (1.6 mm)	\$50/lb.	\$524.88/lb.	\$22.17/lb.	\$4.57/lb.
Wire - 0.093" diameter (2.4 mm)	\$48/lb.	\$502.30/lb.	\$21.43/lb.	\$4.81/lb.
Wire - 0.125" diameter (3.2 mm)	\$45/lb.	\$438.96/lb.	\$21.02/lb.	\$4.75/lb.
Wire - 0.156" diameter (4.0 mm)	\$44/lb.	\$438.96/lb.	N/A	\$4.69/lb.
Powder - AM Grade	\$77/lb.	\$522.00/lb.	\$48.00/lb.	\$10.00/lb.

Il grande vantaggio, rispetto ai processi *Powder-bed* (PB), è nell’eliminazione dei limiti di costruzione, consentendo così la fabbricazione di componenti medio-grandi.

Un'altra differenza tra i processi di deposizione diretta e quelli basati su polvere è l'opportunità di creare materiali con proprietà diverse in zone diverse.

I cordoni di saldatura creati durante la MWD sono caratterizzati da una larghezza di  $1 \div 2$  mm, mentre quelli derivanti da processi a letto di polvere vanno da pochi micrometri a 1 mm al massimo. Questa differenza permette un tasso di deposizione più alto (anche fino a 16 volte), permettendo la produzione di pezzi di grandi dimensioni in breve tempo. I valori tipici dei tassi di deposizione sono dell'ordine di alcuni kg all'ora (per esempio,  $2 \div 10$  kg/h) [22], a seconda della combinazione di fonte di calore e materiale depositato. Inoltre, i valori di DR (*Deposition Rate*) possono essere raddoppiati se si sfrutta l'uso di una torcia tandem [24]. Possono essere raggiunti DR più alti, ma più alti sono, più bassa è la risoluzione delle parti create [22]. DR troppo alti potrebbero essere quindi controproducenti, poiché sarebbero necessarie più operazioni di lavorazione post-AM [25]. Il rischio di contaminazione del materiale di alimentazione è ridotto con il filo, poiché l'area di superficie è inferiore rispetto alla quantità di massa equivalente di polvere, specialmente per i materiali reattivi come Ti e Al, e per i materiali richiesti nelle applicazioni aerospaziali. Inoltre, le parti depositate a filo potrebbero mostrare porosità inferiori rispetto ai processi PB, così come una soddisfacente integrità strutturale [26].

Le sfide principali nel MWD riguardano le tensioni residue e la finitura superficiale, che è notoriamente inferiore rispetto ai processi PB [27][28]. Le tensioni residue e le distorsioni possono essere ricondotte alla mancanza di uniformità nella storia termica del componente e risolte o evitate attraverso: il serraggio parziale del pezzo, l'uso di rulli, o l'adozione di post-processi termo-meccanici. Non solo la scelta della corretta fonte di calore per un certo materiale è fondamentale, ma anche l'identificazione del set ottimale di parametri di processo ha un ruolo cruciale sulla microstruttura e quindi, sulle proprietà meccaniche di un pezzo [16]. Viene sottolineata l'importanza del monitoraggio *in-process* [29], così come l'uso di tecniche non distruttive, come il controllo iterativo di apprendimento, il rilevamento mediante telecamere laser e altre per evitare il rischio di generare difetti e garantire una qualità accettabile del pezzo [2]. I processi MWD sono classificati, principalmente, a seconda del tipo di fonte energetica utilizzata e, in secondo luogo, si sono sviluppate nel tempo successive

varianti che differiscono per il tipo di tecnologia. Il *Laser Metal Wire Deposition* (LMWD) fa uso di una sorgente laser, mentre l'*Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM) o *Direct Manufacturing* (DM) sfrutta un fascio elettronico. La grande famiglia del *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) invece, comprende diversi processi che hanno in comune l'utilizzo di un arco elettrico

## 2.1 EBAM

Il processo EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*), esclusiva di Sciaky, Inc., utilizza un filo e una fonte di calore, che consiste in un fascio di elettroni, per produrre parti all'interno di una camera a vuoto (Figura 11). Iniziando con un modello 3D da un programma CAD, che è convertito in codice CNC, il fascio di elettroni deposita il metallo, attraverso il filo metallico, strato per strato, fino al completamento della parte. Infine il componente viene sottoposto al trattamento termico finale e alla lavorazione. Il processo è scalabile per componenti da millimetri a più metri di dimensione, limitato solo dalle dimensioni della camera di lavorazione.

Sciaky sostiene che, con lavorazioni PB, occorrerebbe 5 volte il volume del letto di polvere, per produrre lo stesso pezzo e la maggior parte del materiale dovrà essere scartato o riutilizzato [30].

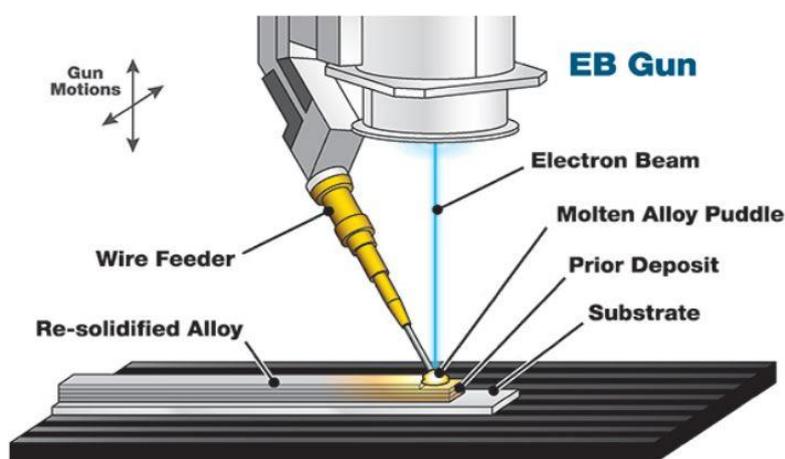


Figura 11 Principio di funzionamento EBAM [27]

## 2.2 LMWD

Il *Laser Metal Wire Deposition* (LMWD) è un processo di fusione basato sulla tecnologia di *laser cladding*. Quest'ultima sta a indicare i processi (basati su polvere o filo) volti al rivestimento superficiale e alla riparazione di componenti. Si distingue dagli altri, per una migliore stabilità di processo, miglior controllo sui parametri di processo e buon legame metallurgico tra rivestimento e substrato [31].

In LMWD le parti sono fabbricate fondendo il filo che successivamente si solidifica mentre il fascio laser si muove lungo un percorso predesignato. Il filo viene alimentato nel bagno di fusione tramite un ugello laterale, come si osserva in Figura 12. Il sistema che fornisce il materiale di alimentazione in forma di filo offre una maggiore efficienza di deposizione (viene usato il 100% del materiale), un materiale di alimentazione meno costoso e uno spreco di materiale inferiore rispetto alla polvere. Inoltre, presenta una buona qualità del materiale con bassi livelli di impurità e un tasso di deposizione relativamente alto, (quindi una velocità di produzione più alta) rispetto alla polvere. Tuttavia, l'instabilità della velocità di alimentazione del materiale, la varietà ridotta di materiali, la dipendenza dell'assorbimento delle radiazioni sulla finitura superficiale del filo e la maggiore diluizione del materiale depositato con il substrato<sup>1</sup> sono alcuni dei difetti dei processi basati su filo [32].

I requisiti critici per una deposizione laser di successo sono un legame solido tra il materiale depositato e il substrato o tra gli strati, una bassa porosità e deposizione senza crepe. Uno strato sottile del substrato sarà fuso simultaneamente per ottenere un legame metallurgico. Tuttavia, una diluizione eccessiva non è auspicabile nella maggior parte delle applicazioni[33].

---

<sup>1</sup> Per le applicazioni di trattamento superficiale, il substrato può essere una fusione o una parte usurata, mentre per le applicazioni in cui viene fabbricato un pezzo completo, il substrato è una piastra che supporta il primo strato depositato [33].

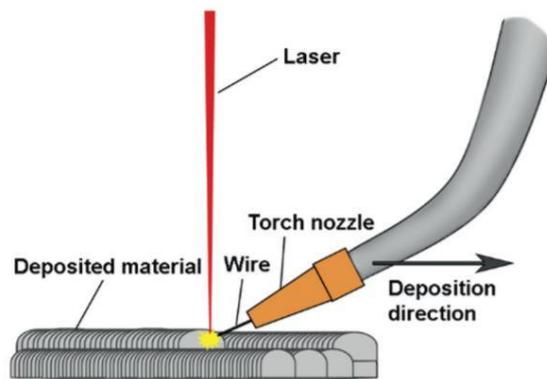


Figura 12 Principio di funzionamento LMWD [31]

Le sub-varianti del LMWD sono:

- **Double-sided laser beam**

Il processo di saldatura, illustrato in Figura 13, viene condotto su due lati, in quanto due raggi laser in fibra sono focalizzati simmetricamente in due posizioni opposte lungo il cordone, per ottenere un bagno di fusione comune. Per stabilizzare il processo di saldatura, il filo d'apporto e il gas di protezione sono focalizzati sullo stesso piano del raggio laser e con un angolo di circa  $20^\circ$  rispetto al cordone [34].

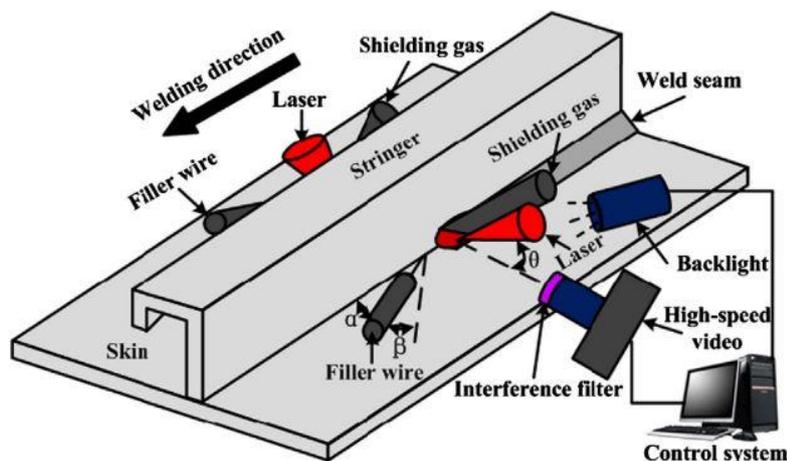


Figura 13 Creazione di un pannello di una fusoliera di aereo con tecnologia a doppio fascio laser [32]

- **UHF (Ultra-high frequency induction)**

Nel metodo in Figura 14, il calore trasferito da una bobina a induzione è usato come fonte di calore principale per fondere il metallo depositato e il calore del

laser agisce come fonte di calore ausiliaria. Questo permette di ottenere una superficie del substrato ad alta temperatura per una efficiente fusione tra il metallo depositato e il substrato [35].

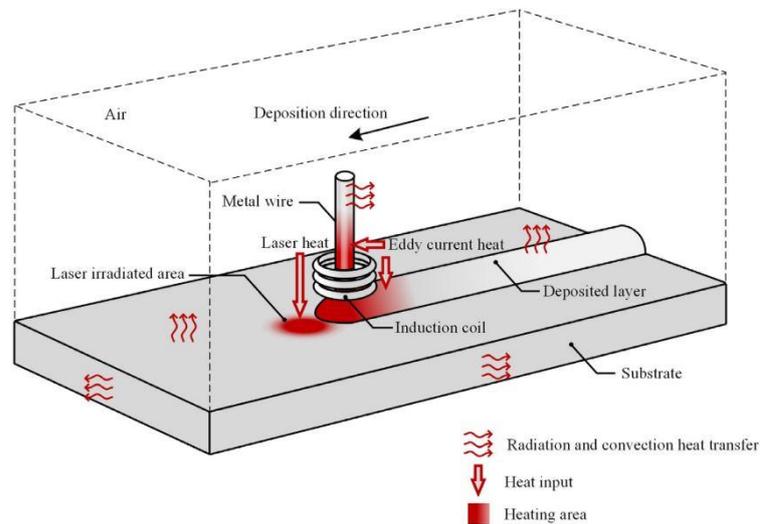


Figura 14 Principio di deposizione laser assistita da metodo a induzione UHF [33]

- **(Laser Hot Wire Cladding) LHWC**

Il rivestimento laser a filo caldo (LHWC) è un processo di deposizione ibrido in cui il filo è preriscaldato da una sorgente di energia durante il processo di deposizione (Figura 15). Questo processo può aumentare drasticamente l'efficienza della deposizione e il tasso di utilizzo del materiale [36].

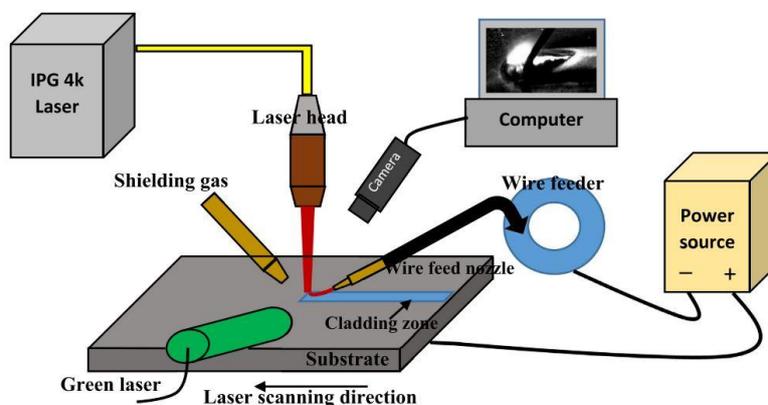


Figura 15 Schema del sistema LHWC [34]

- **Vertical LMWD**

Questa variabile permette l'input di energia solo sul filo e non sul materiale di base (substrato) consentendo una potenziale riduzione di energia necessaria rispetto ai processi convenzionali. Così, il filo viene alimentato verticalmente e il raggio laser è inclinato di  $50^\circ$  dall'asse verticale del filo (Figura 16). Usando il fascio laser per fondere soltanto il filo è possibile un risparmio di energia dell'86.6% rispetto a un processo LMWD standard [37].

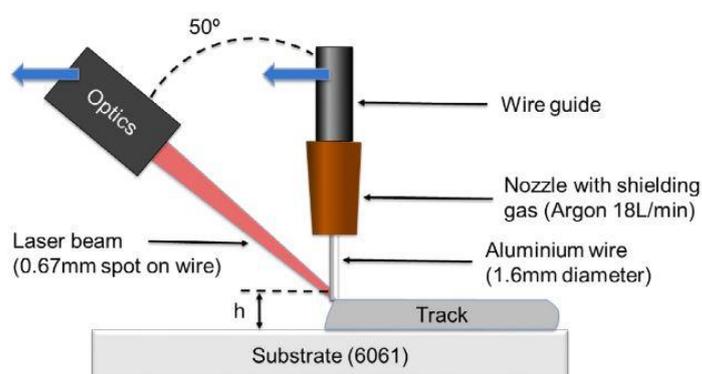


Figura 16 Setup operativo di un processo verticale con filo e substrato in leghe di alluminio [35]

- **Micro LMWD**

Il sistema  $\mu$ LMWD consiste in una sorgente laser Nd:YAG a flash, funzionante a impulsi con durate da micro a millisecondi e un sistema di alimentazione del filo sviluppato in-house. La catena ottica può essere regolata automaticamente per variare il diametro spot tra 0,3 e 0,5 mm. Le condizioni di lavorazione sono state studiate per la deposizione a strato singolo e multistrato in termini di geometria, durezza ed efficienza di utilizzo del materiale. I risultati mostrano che è possibile ottenere una risoluzione geometrica simile a quella ottenibile con polveri mantenendo i vantaggi del filo. Con questo processo, sono state prodotte con successo strutture a parete sottile con un aspect ratio (rapporto tra max altezza e max larghezza della sezione depositata) fino a 20, dove la larghezza dello strato era compresa tra 700 e 800  $\mu\text{m}$  [38].

- **Wire + Powder-LMWD**

In uno studio di Teli et al. [39], una testa laser ibrida è stata integrata all'interno della macchina, che consiste in un ugello coassiale che spruzza polvere e in un sistema di alimentazione del filo. Il filo viene depositato lateralmente, a un angolo di 40° con il substrato, e fuso dal raggio laser. Allo stesso tempo, la polvere viene rilasciata coassialmente nel bagno di fusione, come è possibile osservare in Figura 17. L'aggiunta di polvere consente il raffinamento della microstruttura del materiale, tuttavia ne risulta un materiale con durezza molto più bassa che non è adatto alla forgiatura a caldo.

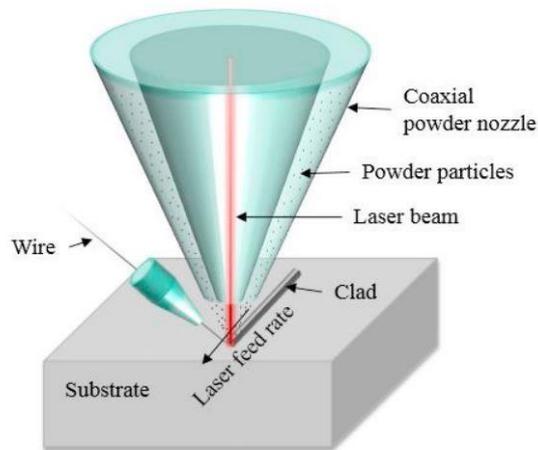


Figura 17 Principio di funzionamento di WP-LMD [37]

- **Hybrid manufacturing**

La produzione ibrida è una combinazione di produzione additiva (deposizione) e sottrattiva (lavorazione) in una singola macchina utensile. Un tale sistema può essere utilizzato per la produzione di forme quasi nette e per la riparazione di componenti. Integrato in un unico sistema, la transizione tra la produzione additiva e sottrattiva può avvenire immediatamente, senza pause di lavorazione, ed essere sfruttata per generare componenti di grandi dimensioni. È stato dimostrato che riduce il tempo di ciclo complessivo fino al 68%, migliora l'allungamento medio alla rottura del 71% e riduce la frazione di

porosità relativa media dell'83% rispetto ai componenti fabbricati con processi additivi tradizionali [40].

In Figura 18 un esempio delle fasi che compongono un processo di *Hybrid manufacturing*.

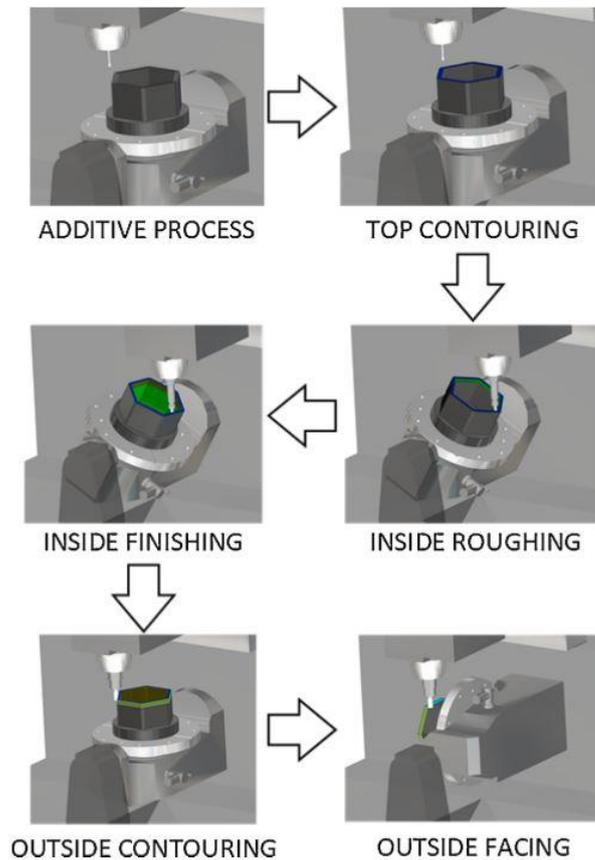


Figura 18 Flusso di lavoro di fabbricazione ibrida di un componente esagonale [38]

## 2.3 WAAM

*Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM), illustrata in Figura 19, è una tecnica di produzione che permette di fabbricare componenti completamente densi di forma quasi a rete utilizzando un filo metallico come materia prima e un arco elettrico come fonte di calore. Il filo viene alimentato ad una velocità controllata e viene fuso mediante un arco elettrico su un substrato o sullo strato precedentemente depositato.

WAAM ha un tasso di deposizione molto più alto (5 kg/h per applicazioni in acciaio inossidabile o 2,5 kg/h per leghe di titanio Ti6Al4V [41]) rispetto alla maggior parte degli altri processi di fabbricazione additiva dei metalli. Ha anche una maggiore efficienza di utilizzo del materiale (che si avvicina al 100%), nessun requisito di manipolazione della polvere, e un costo inferiore rispetto al laser e alle tecnologie basate sulla polvere [42]. Inoltre, le competenze della manodopera richiesta per i processi WAAM sono meno severe, poiché la conoscenza dei suoi componenti base (sorgente di saldatura e robot) è consolidata a livello globale, rendendo la tecnologia più robusta [14].

Tuttavia, se da un lato WAAM permette l'ottenimento delle desiderate specifiche meccaniche, dall'altro occorre scegliere il corretto processo sulla base del materiale e delle applicazioni richieste [41].

Il processo di saldatura ad arco, in linea generale, può essere basato su un sistema a gas inerte (MIG), un sistema a gas inerte con elettrodo di tungsteno (TIG) o un sistema di saldatura al plasma (PAW). GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*) usano un elettrodo di tungsteno non consumabile, mentre il GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) usa il filo di apporto come elettrodo per generare l'arco. Diversamente dal WAAM basato su GMAW, l'orientamento dell'avanzamento del filo nel GTAW e PAW può variare e influenzerà la qualità della deposizione, il che rende la pianificazione del processo più complicata. Il tasso di deposizione del GMAW è da 2 a 3 volte superiore a quello dei metodi basati su GTAW o PAW. Tuttavia, GMAW è meno stabile e genera più fumi e spruzzi di saldatura a causa della corrente elettrica che agisce direttamente sul materiale di partenza [43].

Il movimento può essere fornito da sistemi robotici o da sistemi a controllo numerico (CNC). Le parti sono prodotte depositando strati di metallo con il processo di deposizione basato sulla saldatura [44].

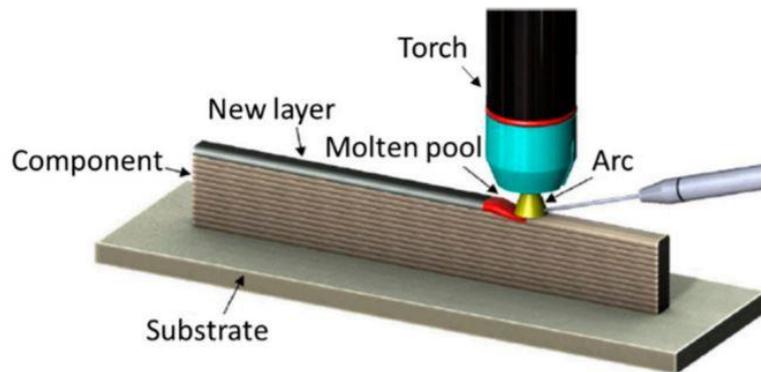


Figura 19 Principio di funzionamento WAAM [43]

Tuttavia, la precisione e la qualità superficiale delle parti create da queste tecnologie sono tipicamente molto più basse di quelle che si vedono nelle parti lavorate con macchine.

Pertanto, i ricercatori hanno sviluppato processi di produzione additiva basati sul GMAW e li hanno accoppiati con la fresatura CNC per creare un sistema completo di produzione additiva e sottrattiva, come descritto nella Figura 20. Questi sistemi depositano uno strato di filo fuso su un'area geometrica prescritta usando il GMAW e successivamente lo strato viene poi fresato. Al completamento delle deposizioni dello strato e dei cicli di fresatura, viene eseguita una lavorazione di finitura per ottenere le dimensioni finali desiderate [45].

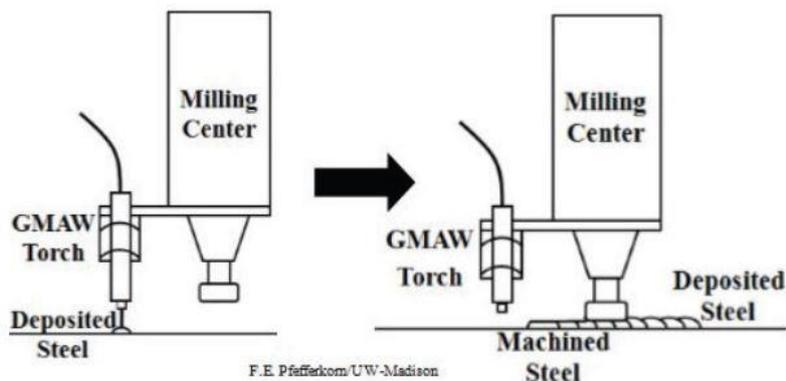


Figura 20 Wire-Based Additive-Subtractive Manufacturing [44]

Nei paragrafi 2.3.1 e 2.3.2 si classificheranno le diverse varianti del WAAM in base alla configurazione ugello del filo-testa della sorgente di calore. In particolare, l'ugello di estrusione del filo metallico può essere coassiale (ovvero in asse con la direzione dell'arco) oppure *off-axis* (laterale o frontale).

## 2.3.1 Filo-sorgente coassiali

### 2.3.1.1 GMAW

GMAW, anche conosciuto come MIG (*Metal Inert Gas*) o MAG (*Metal-arc Active Gas*), è stato sviluppato negli anni '50 ed è il processo che consente di fondere e unire metalli mediante un arco elettrico, filo di supporto e materiale di base. Il bagno di fusione e l'arco sono di solito schermati da gas inerti.

In particolare, le modalità di trasferimento del metallo nel GMAW possono essere classificate in *free flight* e *short circuiting*. Il *Free flight* può essere ulteriormente diviso in modalità *Spray*, *Globular* e *Repelled modes*. Durante la modalità *Free Flight*, la traiettoria delle gocce dalla punta del filo al bagno di saldatura è importante. Norrish [46] descrive il meccanismo di trasferimento del metallo in termini di equilibrio delle forze che agiscono sul sistema, che include la forza gravitazionale, la resistenza aerodinamica, le forze elettromagnetiche, le forze del getto di vapore e la tensione superficiale. La sola forza gravitazionale può essere sufficiente a superare le forze assiali che normalmente proietterebbero la goccia attraverso l'arco con conseguente dislocazione del materiale dalla target position, come da schema in Figura 21 a). Inoltre, la comune modalità di trasferimento a spray funziona solo al di sopra di una corrente di transizione minima, si forma di solito un grande bagno di saldatura, che è indesiderabile per il processo di deposito multidirezionale. Nel trasferimento *Short circuiting* (principio di funzionamento alla base del CMT), una gocciolina si forma sulla punta del filo durante la fase d'arco, ma il materiale viene trasferito solo quando la punta del filo tocca il metallo di base. Pertanto, il trasferimento delle gocce al bagno di saldatura è influenzato meno dalla forza gravitazionale. Il metallo fuso di norma viene trasferito accuratamente sulla posizione di destinazione quando si usano i

parametri di saldatura corretti. Per questo motivo, il trasferimento *short circuiting* viene utilizzato per depositare il materiale in tutte le posizioni [47].

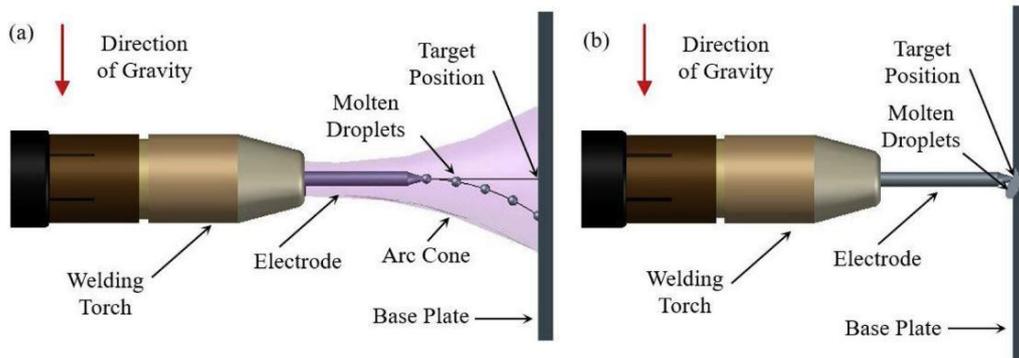


Figura 21 Traiettoria delle gocce in a) Free flight e b) Short circuiting [46]

Inoltre, la modalità *SpeedPulse* coinvolge un processo di saldatura a impulsi non cortocircuitante, che opera a una frequenza costante e combina le caratteristiche di un classico arco a impulsi con quelle di un classico arco a spruzzo per ottenere un'elevata affidabilità del processo. La modalità *SpeedArc*, invece, si distingue dal convenzionale processo GMAW per un arco breve e particolarmente forte nell'arco di spruzzatura e quindi presenta un'eccezionale stabilità direzionale e un'alta densità di energia [48].

Le sub-varianti del GMAW sono:

- **T-GMAW**

Vengono usati in parallelo due sistemi GMAW per il processo di saldatura ad arco pulsato alternato o asincrono, alimentati da due fonti di energia elettrica (Figura 22). In questo modo, possono essere create leghe semplicemente regolando la velocità di alimentazione dei fili di materiali diversi (ad esempio: Ti-6Al) [49].

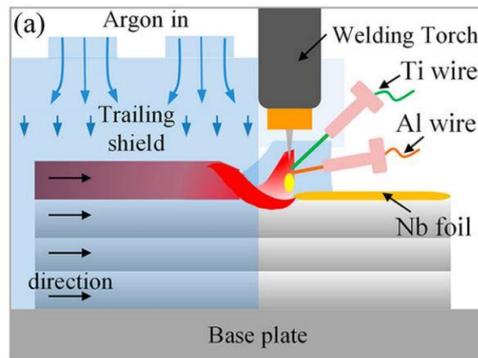


Figura 22 Principio di funzionamento T-GMAW nel caso di una lega Ti-Al [48]

- **CMT**

*Cold Metal Transfer* (CMT) è una variante modificata del GMAW, basata sul meccanismo di trasferimento freddo di metallo mediante controllo meccanico dell'arco, che può fornire un'elevata capacità di deposizione con un input di calore relativamente basso [50]. L'avanzamento del filo avviene con un movimento di avanzamento e ritiro ad alta frequenza, l'alimentazione viene interrotta dopo che si verifica il cortocircuito e il filo viene ritirato allo stesso tempo. Questo favorisce il trasferimento delle gocce senza l'aiuto della forza elettromagnetica. L'arco si riavvia dopo il completamento del trasferimento delle gocce. Tra uno strato e l'altro si lascia il tempo di raffreddare il metallo per convezione naturale fino a raggiungere i 100 °C, evitando l'accumulo di calore nella successiva deposizione di metallo fuso. Può essere utilizzata una piastra di supporto in alluminio raffreddata ad acqua per raffreddare più rapidamente la parte. Consente di risparmiare la maggior quantità di energia possibile modificando il processo di trasferimento delle gocce al bagno di saldatura [51]. CMT è adatto per componenti grandi in acciaio inossidabile con requisiti meccanici medio/bassi [41].

In Figura 23 è possibile vedere tutte le fasi del processo. Inizialmente la torcia di saldatura si avvicina alla superficie metallica e si crea un primo arco di saldatura tra l'elettrodo e il pezzo (Step 1). Questo provoca la fusione del filo d'apporto, che viene saldato alla superficie metallica. Nello Step 2, il passaggio

di corrente viene interrotto e il filo saldato viene lasciato raffreddare (tempo di ritardo tra 0,5 e 2 s). A causa del trasferimento di calore, si forma un gradiente di temperatura poiché la base del filo ha una maggiore massa di materiale per scambiare calore. Così, quando il circuito viene richiuso e la corrente elettrica scorre attraverso il filo d'apporto saldato (Step 3) si formerà un punto caldo a causa di un aumento locale della resistenza e dell'effetto Joule. Infine (Step 4), viene applicata al filo una forza di ritrazione che, combinata con l'aumento locale della temperatura, porta alla sua rottura [52].

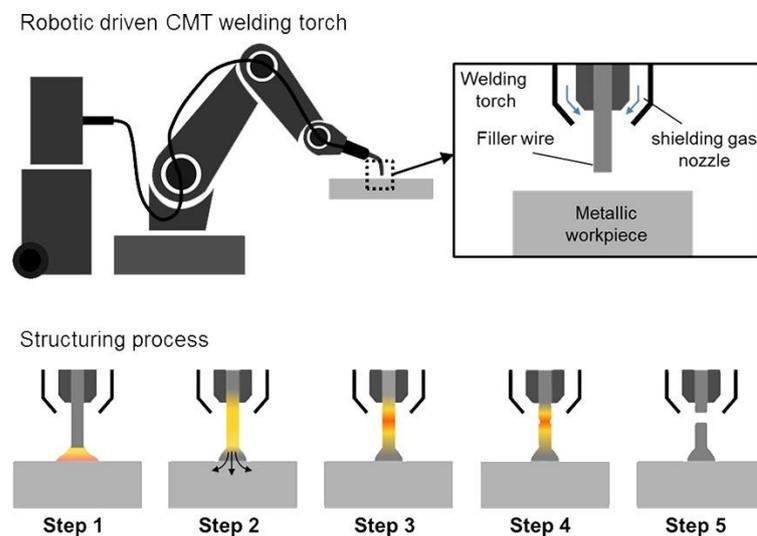


Figura 23 Principio di funzionamento CMT nel caso di fabbricazione di perni saldati [51]

- **CMT Mix drive**

Il sistema accoppia la tecnologia CMT (movimento oscillatorio del filo azionato da un piccolo motore elettrico situato nella torcia) alla pulsazione di corrente e tensione [4]. Questo permette un alto DR ma, dall'altro lato, comporta un aumento dell'input di calore rispetto al CMT "puro", proprio a causa dei continui passaggi tra fase a pulsazioni e fase CMT. Per le sue caratteristiche, il processo CMT Mix Drive è in grado di essere 3,5 volte più veloce del CMT (in termini di tasso di deposizione per singolo cordone) [4].

Tuttavia CMT consente un risparmio di energia del 61% rispetto a CMT Mix drive [4].

- **VP-CMT**

In questo modello, tramite un oscilloscopio è possibile effettuare dei cicli alternati con polarità negativa e polarità positiva. Ciò consentirebbe di diminuire l'energia termica necessaria, di avere una struttura del grano fine e una efficace pulizia dell'ossido del filo d'apporto. Gli effetti dei cicli sono visibili in Figura 24 e Figura 25 [20].

- **CMTP**

In questo caso, il processo è costituito da una classica fase CMT seguita da una fase a pulsazioni, come si vede in Figura 24.

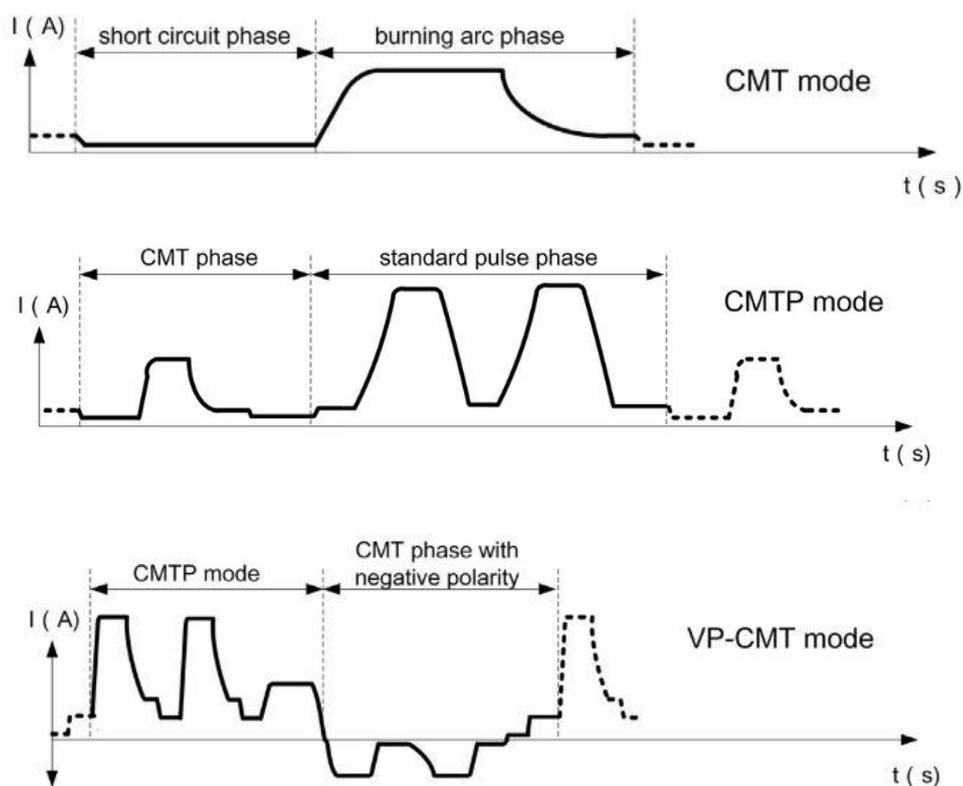


Figura 24 Andamento della corrente in CMT, CMTP e VP-CMT [18]

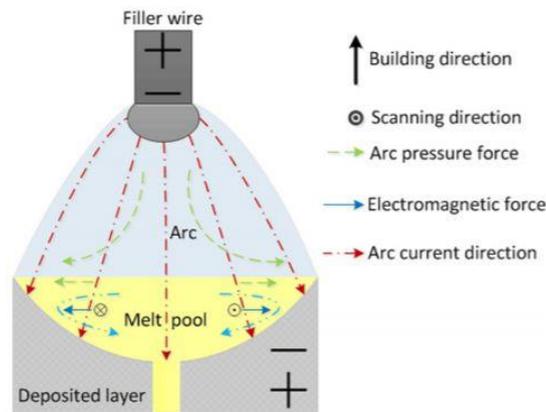


Figura 25 L'effetto del VP-CMT sul bagno di fusione [52]

## 2.3.2 Filo-sorgente off-axis

### 2.3.2.1 GTAW

Le sub-varianti del GTAW sono:

- **TIG**

Il processo TIG, schematizzato in Figura 27, è un procedimento di saldatura ad arco con elettrodo infusibile (di tungsteno), sotto protezione di gas inerte. Il filo può essere alimentato frontalmente o lateralmente. Consente una buona precisione dimensionale e di produrre strutture metalliche senza spruzzi con una migliore finitura superficiale [53].

- **TopTIG**

Nel processo TopTIG, il filo di metallo d'apporto passa attraverso l'ugello mantenendo un angolo fisso con l'elettrodo. In questo modo, il filo è costantemente alimentato nella zona più calda dell'arco indipendentemente dalla direzione di saldatura e porta a tassi di deposito più elevati. (Nei sistemi convenzionali GTAW a filo caldo o freddo, il filo viene alimentato con un angolo di circa  $90^\circ$  rispetto all'elettrodo e solitamente parallelo alla direzione di saldatura) [54]. Si tratta principalmente, di un processo che consente la deposizione coassiale del filo, pur conservando l'alta qualità della tecnologia TIG [55]. La Figura 26 rende ancora più chiara la differenza. La forma d'onda dinamica avanzata della corrente genera piccole goccioline fuse sulla punta del

filo che vengono staccate a bassa corrente con l'aiuto del ritiro meccanico del filo. Ciò si traduce in un apporto di calore molto basso, un trasferimento di metallo senza spruzzi, un arco elettrico estremamente stabile e saldature solide. Si possono raggiungere velocità di saldatura e tassi di deposizione paragonabili al GMAW, cioè 1,5 m/min e 3 kg/h, rispettivamente, per applicazioni di saldatura in acciaio inossidabile ma più bassi del CMT o PAW [54]. Inoltre, per applicazioni in lega di titanio Ti6Al4V occorre una miscela attiva di gas di schermatura per una deposizione ottimale, a causa della bassa efficienza energetica. Pertanto, TopTIG è adatto per applicazioni in acciaio inossidabile e titanio medio/grandi con requisiti meccanici medio/alti [41]. Con questa torcia, il processo è quasi coassiale (non richiede la regolazione della direzione di alimentazione del filo), totalmente privo di spruzzi, robusto e stabile. La stabilità del processo è migliorata perché la distanza dell'elettrodo dal pezzo diventa meno importante, dato che il filo è sempre costretto a entrare nel bagno di fusione [54].

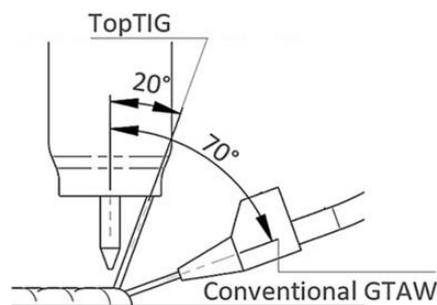


Figura 26 Configurazione TopTIG [55]

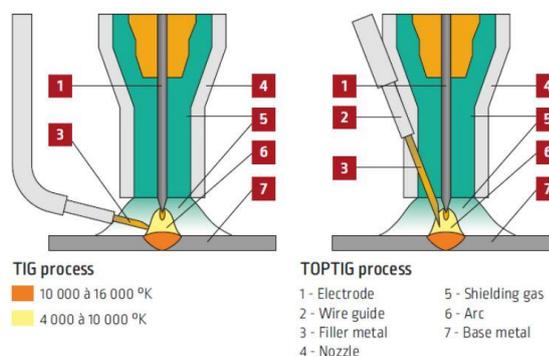


Figura 27 TIG Vs TopTIG [56]

### 2.3.2.2 PAW

Il sistema PAW (*Plasma Arc Welding*) utilizza un arco al plasma per fondere il filo e questo porta a elevati tassi di deposizione (3,5 kg/h con filo in acciaio inossidabile [41]) e a una bassa rugosità superficiale rispetto ad altri processi. Fino ad ora, le tecnologie di saldatura ad arco basate su GTAW e PAW hanno dimostrato di essere i processi più affidabili per il WAAM con meno problemi di *sputtering* (processo per il quale si ha emissione di atomi, ioni o frammenti molecolari dal substrato sotto l'effetto del bombardamento da parte del plasma [56]), riscaldamento eccessivo, distorsione o porosità rispetto al GMAW. Tuttavia, in queste due tecnologie, il filo non è alimentato coassialmente e questo porta a variazioni di processo quando si cambia la direzione di saldatura e a un'estrema sensibilità alla lunghezza dell'arco. Infatti, molti sistemi di saldatura robotizzata richiedono un asse rotativo per orientare l'ugello di alimentazione del filo e mantenerlo allineato con la direzione di saldatura, il che limita i campi di applicazione [41]. Un tasso di deposizione più alto sarebbe auspicabile per ridurre i tempi di produzione e quindi i costi complessivi, ma il limite della produttività è dettato dalla fisica del processo e dalla capacità di controllare la forma del bagno di fusione. Come viene affermato in questo studio [22], alti tassi di deposizione, ma con uno scarso controllo del processo, portano ad un'eccessiva quantità di materiale che deve essere depositato e successivamente lavorato via, il che è controproducente dal punto di vista economico. Pertanto, è di fondamentale importanza aumentare la velocità di deposizione senza compromettere la qualità e la fedeltà dei componenti. Il processo PAW è quindi adatto per componenti in acciaio inossidabile e titanio medio/grandi con proprietà meccaniche medio/alte [41].

Le sub-varianti del PAW sono:

- **PTA (Plasma Transferred Arc)**

L'arco al plasma è ristretto da un ugello di rame raffreddato ad acqua, ciò significa che il diametro dell'ugello influenza la pressione dell'arco e di conseguenza la formazione del cordone [57].

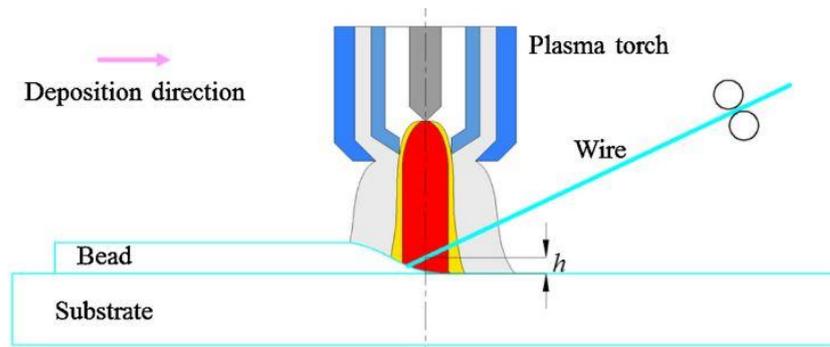


Figura 28 Vista di sezione del processo di saldatura PTA [57]

- **CC-WAAM (Compulsively Constricted)**

L'arco si sprigiona tra il filo e un elettrodo di tungsteno. All'interno dello stretto spazio confinato, le goccioline si staccano dall'estremità del filo sotto l'effetto di forze complesse. L'espansione termica dell'arco al plasma interno e il flusso di gas inerte alimentato in continuo portano all'espulsione del getto di plasma dall'uscita dell'ugello alla piastra di base. Poiché l'uscita dell'ugello ha un diametro molto più piccolo di quello dello spazio interno della torcia (vedi Figura 29), il flusso di gas e il getto di plasma vengono prima compressi e poi accelerati quando passano attraverso l'ugello (la pressione interna è più alta di quella atmosferica) [58]. Questo inevitabilmente influisce sul trasferimento delle gocce e dovrebbe risolvere i problemi di eccessivo input termico e accumulazione di calore.

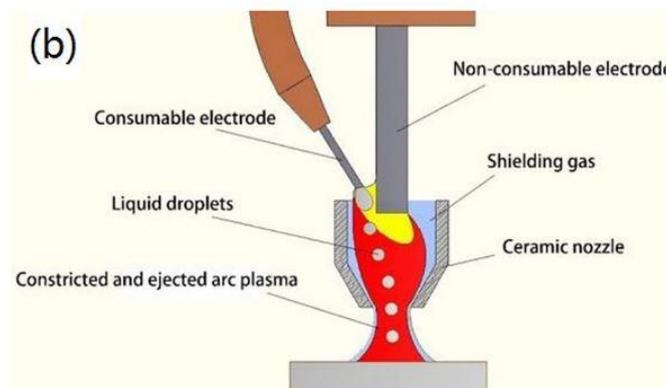


Figura 29 Schema del processo compulsively constricted WAAM [58]

## **CAPITOLO 3**

# **Analisi comparativa dell'efficienza energetica**

### **3.1 Parametri di processo**

L'obiettivo della presente analisi è quello di effettuare una valutazione quantitativa dell'efficienza energetica dei processi MWD. Pertanto, il primo passo è stato quello di estrapolare dalla letteratura scientifica esistente i principali parametri che influenzano direttamente o indirettamente le performance dei processi. Gran parte della letteratura analizzata (cfr. Appendice A.1) fa riferimento a studi sperimentali, finalizzati al comprendere l'effetto dei singoli fattori e delle loro interazioni sulla qualità del processo di deposizione, sulla microstruttura e proprietà meccaniche del materiale ottenuto [2]. Tra gli altri, i parametri di processo che sono stati utilizzati nella valutazione dei processi LMWD e WAAM, in Tabella 3 e Tabella 4, sono:

- la potenza di uscita del laser o arco;
- la tensione e corrente elettrica nel caso di processi ad arco;
- la velocità di avanzamento del filo;
- la velocità di traslazione della testa di deposizione;
- il materiale del filo;
- il diametro del filo.

Il processo EBAM, basato su fascio elettronico, non è stato considerato in questa analisi, data la ridotta quantità di fonti presenti in letteratura. La potenza di uscita del laser è stata generata da laser a fibra o a diodi, laser CO<sub>2</sub> e laser Nd:YAG o Yb:YAG. Sono stati considerati diversi materiali, con diametri di filo che vanno da 0,5 a 2,0 mm; la velocità di avanzamento del filo è stata mantenuta tra 4 e 167 mm/sec; tuttavia, questo valore deve essere scelto in base alla potenza di uscita del laser e alla velocità di traslazione.

Riguardo alle tecnologie ad arco, la potenza di uscita dell'arco è stata generata da un sistema a gas inerte, da un elettrodo di tungsteno, arco al plasma o utilizzando il filo di apporto. Sono stati considerati diversi materiali, con diametri di filo che vanno da 0,80 a 1,20 mm, la velocità di avanzamento del filo è stata mantenuta tra 8 e 583 mm/sec.

All'interno degli intervalli proposti in Tabella 3 e Tabella 4, sono stati identificati combinazioni di fattori che hanno portato ad un processo stabile e qualitativamente soddisfacente, così come combinazioni di processi irraggiungibili. Variabili in uscita come l'assenza di difetti, l'omogeneità microstrutturale, le vibrazioni che si creano nel sistema di alimentazione, la velocità di raffreddamento termico del flusso, la porosità, la mancanza di riempimento, e la risposta geometrica sono state assunte come metriche per la valutazione della qualità di deposizione [2].

La corretta impostazione dei parametri di processo è essenziale non soltanto per ottenere la desiderata geometria del cordone ma anche per una deposizione priva di porosità [59].

I parametri principali sono: la potenza di uscita del laser (P), la velocità di traslazione della testa di deposizione (TS) e la velocità di avanzamento del filo (WFS). La loro combinazione è responsabile della quantità di massa depositata e dell'energia fornita per la fusione. Di conseguenza, mantenendo costanti i valori di potenza del laser e di velocità di traslazione, e aumentando la velocità di alimentazione del filo si ottiene un aumento della quantità di massa depositata. Tuttavia, questo effetto permane fino ad un valore massimo, superato il quale vi è la presenza di materiale non completamente fuso. Inoltre, è stato dimostrato che fissando la potenza e la velocità di alimentazione del filo e aumentando progressivamente la velocità della testa si ottiene un cordone di saldatura più grande sia in altezza che in larghezza [60][61].

Cambiamenti nella velocità della testa hanno effetti più significativi sull'altezza dei cordoni, mentre la potenza condiziona maggiormente la larghezza (con velocità di alimentazione del filo invariata) [60][59].

Per i processi ad arco, la combinazione di più forze influenza la formazione del bagno di fusione. In aggiunta alla forza normale  $N$ , intervengono anche la forza di gravità, la pressione dell'arco e la tensione superficiale. Se il filo è aumentato nel bagno di fusione troppo rapidamente, si ottiene un deterioramento nella geometria del cordone a causa dell'effetto combinato della ridotta tensione superficiale, aumento del tempo di raffreddamento e del volume del cordone. Inoltre, alte velocità di traslazione portano a un insufficiente materiale depositato; di conseguenza per evitare una traccia discontinua del cordone è consigliabile una minore velocità di traslazione [47].

Tabella 3 Parametri di processo Laser

Famiglia di materiale	Potenza (W)	Vel. di traslazione (mm/s)	Vel. Di avanzamento del filo (mm/s)	Diametro del filo (mm)	Ref.
Leghe <sup>1</sup> di alluminio	1400-7000 <sup>4</sup>	8-100 <sup>4</sup>	10-166.67 <sup>4</sup>	1-1.6 <sup>4</sup>	[62],[63],[64],[65],[37]
Leghe di cobalto	4000	6-10	45-65	1.2	[36]
Leghe di nickel	800-2000	1.7-15	6.7-25	1.2-2	[33],[43],[44]
Acciaio	120-2750	1.8-17.78	3.83-74.08	0.5-1.4	[38],[39],[68],[59],[40]
Leghe di titanio	1250-2625	3.33-16.66	10-40	1-1.2	[61],[60],[69],[70]

Tabella 4 Parametri di processo WAAM

Famiglia di materiale	Processo	Potenza scelta <sup>2</sup> (W)	Corrente (A)	Tensione (V)	Vel. di traslazione (mm/s)	Vel. di avanzamento del filo (mm/s)	Diametro del filo (mm)	Ref.
Leghe di alluminio	CMT	461.42-3986.36	32-159	11.1-19.3	5	30-150	1.2	[20] [4]
Leghe di alluminio	VP-CMT	1565.47-2727.98	103-140	11.7-15	n.d	116.67	1.2	[20]
Leghe di alluminio	GMAW	4364.77-10288.38	120-240	28-33	12-22	166.67-250	1.2	[71]
Leghe di alluminio	T-GMAW	2624.06	101	20	n.d	47.5-91.67	1.2	[72]
Leghe di cobalto	MAG	2385.03-6827.74 <sup>4</sup>	180 <sup>4</sup>	10.2-29.2 <sup>4</sup>	16.67-25 <sup>4</sup>	8.33-83.33 <sup>4</sup>	1.2	[73]
Leghe di nickel	CMT	2110.94	130	12.5	13.33	108.33	1.2	[51]
Acciaio	WAAM	1870.61-3819.17	80-140	18-21	3.33-30	66.66-133.33	0.8-1	[74] [75]
Acciaio	CMT	1234.86-7659.13	98-220	9.7-26.8	1.66-16.66	83.33-166.66	0.9-1	[47] [54]
Acciaio	GMAW	467.65-14185.5 <sup>3</sup>	19.5-350	12-140	3.9-50	50-233.33	0.8-1.2	[76][77] [78] [79][80] [81] [82][48]
Acciaio	T-GMAW <sup>5</sup>	20900-23800 <sup>3</sup>	n.d	n.d	11.7-13.33	458.33-583.33	1.2	[81]
Acciaio	TopTIG	4429.72	220	15.5	11.67	48.33-100	1	[54]
Leghe di titanio	TIG	1543.26	99	12	4.5	30	1.2	[42]
Leghe di titanio	GTAW	1714.73-2847.91	110-176.8	12-12.4	1.58-5	16.67-33.3	1.2	[83] [84] [69] [85] [43]
Leghe di titanio	PAW	3748.37-4302.41	145-160	19.9-20.1	75-79.17	33.33-3.33	1.2	[86]

Note alla Tabella 3 e Tabella 4:

Nota 1) La presente analisi ha coinvolto una grande varietà di leghe. In Tabella 5 nel dettaglio i materiali utilizzati con la loro nomenclatura specifica.

Tabella 5 Leghe e materiali analizzati

<b>Alloys</b>	<b>Technical name</b>
<b>Aluminium alloy</b>	Al-6Mg AWS A5,10 ER4043 ER4043 ER2325 AA5183 aluminium alloy 2319 ER5356 AlMg4.5MnZr (En AW-5087) ER 5A06 aluminium alloy AA4047 alloy 7075 aluminium alloy AISI10Mg AISI5 AISI12
<b>Cobalt alloy</b>	superalloy Stellite 6 alloy WEARTECH WT-6
<b>Nickel alloy</b>	Inconel 625 Hastelloy X alloy Waspaloy Inconel 718 ATI 718
<b>Steel</b>	carbon steel ER70S-6 316L stainless steel 308L stainless steel HLSA AWS A5,28 ER110S-G H13 tool steel H11 steel niobium powder L-56 steel copper coated H08Mn2Si duplex stainless steel 2205 1,4462 G 4Si1 ER70S-G EN S235JR structural steel ER308LSi AISI 308 AISI 301
<b>Titanium alloy</b>	Ti-6Al-4V grade 5 e 23 Ti-6Al-4V with trace boron additions dual alloy titanium: Ti64 e CPTi Ti-6Al-7Nb
<b>Tungsten</b>	
<b>Molybdenum</b>	
<b>Magnesium</b>	biodegradable Mg alloy

Nota 2) Nel caso delle prove sperimentali basate sull'utilizzo di arco, la potenza è stata calcolata a partire dai valori di corrente (I) e tensione (V) a disposizione, laddove non fosse esplicitamente fornita. Per calcolarla è stato ipotizzato

l'utilizzo di un sistema trifase simmetrico nelle tensioni ed equilibrato nelle correnti. Occorre precisare che quest'ultima è un'ipotesi semplificativa, adottata al fine di ottenere i dati di potenza laddove non fossero presenti.

Nota 3) Sono presenti tre casi in cui il valore della potenza è esplicitato:

- 1480 W [77];
- 2730 W [48];
- 2984 W [48].

Confrontando il valore fornito e il valore calcolato mediante la sopracitata ipotesi, risulta che il dato calcolato porta a una sovrastima del 30-35%. In Tabella 6 viene riportata la stima dell'errore tra potenza fornita e potenza calcolata.

*Tabella 6 Stima dell'errore tra potenza fornita e potenza calcolata*

Potenza calcolata (W)	Potenza fornita (W)	Differenza percentuale
1999	1480	35%
3546	2730	30%
3876	2984	30%

Pertanto, in tutti e tre i casi, si è scelto il valore di potenza fornito da letteratura, sicuramente più attendibile. (Nella tabella in Appendice A.3 i tre valori sono evidenziati in verde).

Nota 4) In taluni casi, i valori di potenza, corrente, tensione, velocità di avanzamento del filo e velocità di traslazione forniti in letteratura fanno parte di un range min-max. Pertanto, ai fini dell'analisi, sono state individuate le varie combinazioni possibili, in modo da ottenere valori numerici univoci (quindi non facenti parte di intervalli) sfruttabili per i modelli di regressione e in generale per le analisi su foglio elettronico. (Nelle tabelle in Appendice A.2 e A.3 i valori appartenenti a questi intervalli sono evidenziati in arancione).

Nota 5) Nel caso dei processi tandem, occorre tener conto che i valori dei parametri fanno parte di due fili di materiale diverso.

## 3.2 Analisi statistica

### 3.2.1 Frequenza assoluta dei diametri del filo

La disponibilità di un campione di osservazioni sufficientemente rappresentativo, ha permesso di generare una distribuzione della frequenza dei diametri del filo, al fine di acquisire informazioni sui diametri più comuni e quindi, i tipi di fili metallici maggiormente impiegati nei processi laser e ad arco.

Pertanto, sulla base di 211 osservazioni per i processi ad arco e 259 per i processi laser, è stata calcolata la frequenza assoluta, ovvero il numero di volte in cui un dato valore di diametro è stato utilizzato nella totalità degli esperimenti. I dati del diagramma a barre, in Figura 30, sono stati plottati per tipo di processo (laser e arco). L'asse delle ordinate riporta i valori dei diametri dei fili analizzati, l'asse delle ascisse ne indica la frequenza. I diametri di 1 mm e 1,2 mm hanno riportato il più alto numero di utilizzo. In particolare, l'uso del filo da 1 mm è stato riscontrato 174 volte nei processi Laser e 56 volte nei processi Arco. Il filo da 1,2 mm risulta invece, maggiormente presente nei processi Arco con 109 osservazioni, mentre nei processi Laser è stato utilizzato 62 volte. Come è possibile vedere in Tabella 7, alcuni tipi di diametro non sono molto frequenti o addirittura non sono mai stati utilizzati come, per esempio, 0,8;0,89 e 0,9 mm nel caso dei processi laser.

Tabella 7 Dati origine del grafico in Figura 29

Diametro (mm)	0,5	0,8	0,89	0,9	1	1,13	1,14	1,2	1,4	1,6	2	2,4
Arco	0	5	5	12	56	1	2	109	0	15	3	3
Laser	9	0	0	0	174	0	2	62	1	10	1	0

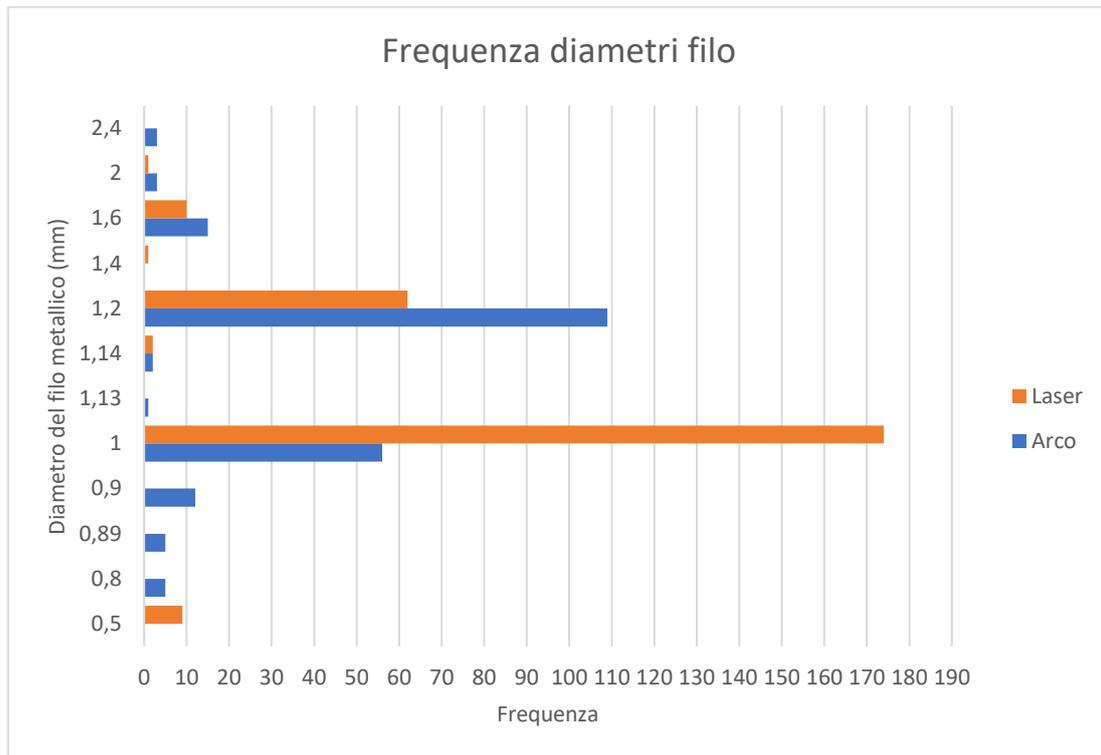


Figura 30 Frequenza diametri filo

### 3.2.2 Calcolo dell'indicatore SEI

L'obiettivo è quello di calcolare lo *Specific Energy Input* (SEI). Questo indicatore permette di quantificare l'apporto di energia necessario al materiale (in MJ), fornito dalla sorgente laser o arco, per depositare una massa unitaria di materiale (in kg) [2]. È stato calcolato con la seguente formula:

Equazione 1 Calcolo del SEI in MJ/kg

$$SEI \left[ \frac{MJ}{Kg} \right] = \frac{P [W]}{\frac{\pi d^2}{4} [mm^2] \cdot \rho \left[ \frac{Kg}{mm^3} \right] \cdot WFS \left[ \frac{mm}{s} \right] \cdot 10^6}$$

Dove:

- $P$  è la potenza elettrica;
- $d$  è il diametro del filo;

- *WFS* è il *Wire Feed Speed*, ovvero la velocità di avanzamento del filo. Moltiplicando l'area della sezione del filo per il *WFS* si ottiene il *WFR (Wire Flow Rate)*, ovvero la portata volumica;
- $\rho$  è la densità del materiale.

Il SEI non corrisponde al *Specific Energy Consumption (SEC)*, formalizzato da Kara et al. [87] e molto utilizzato in letteratura per quantificare l'energia consumata durante i processi di asportazione. Infatti, l'indicatore SEI non rappresenta la domanda totale di energia elettrica del sistema, ma soltanto una parte. La richiesta energetica totale di un processo MWD è influenzata anche 1) dall'efficienza del sistema laser, 2) dal consumo di energia in tempi non produttivi (come l'installazione e il tempo di sosta), 3) dal consumo di tutte le attrezzature ausiliarie e l'uso dei materiali di protezione (come i gas di schermatura) [2].

- **Consumo di energia durante tempi non produttivi**

Le operazioni eseguite in modalità standby, come ad esempio le operazioni preliminari di avviamento e impostazione della macchina, implicano una certa quantità di energia che dovrebbe essere considerata nel computo totale [2]. Inoltre, i processi MWD, rilasciano una grande quantità di energia termica che influenza i tempi di raffreddamento [88]. Le fasi di raffreddamento e consolidamento del materiale depositato sono fondamentali per il corretto trasferimento delle gocce (vedi processo CMT) e per ottenere le migliori condizioni durante il deposito del materiale. Tali fasi costituiscono parte integrante di ogni processo MWD e devono essere prese in considerazione nel calcolo dell'efficienza energetica. Alcuni ricercatori, durante queste pause, hanno introdotto un passaggio di laminazione o di asportazione, migliorando nel contempo la microstruttura e le proprietà meccaniche di leghe di alluminio [89]. Altresì, è stato sviluppato un sistema di raffreddamento attivo durante e/o dopo la deposizione di ogni strato, a base di argon, azoto o CO<sub>2</sub> diminuendo i tempi di sosta tra la deposizione degli strati [90].

- **Consumo di energia delle attrezzature ausiliarie e di protezione**

Le più frequenti attrezzature sperimentali per la conduzione delle prove analizzate sono: 1) sistemi CNC o robot, 2) estrattori di gas e fumi, 3) sistemi di raffreddamento 4) computer, 5) sistemi di monitoraggio della temperatura del bagno di fusione e del pezzo in lavorazione [91][59], 6) telecamere con sensori CCD [92][93] o CMOS [36], o fotodiodi infrarossi [94] per monitorare il processo di deposizione e il bagno di fusione in tempo reale. In Figura 31 uno schema delle attrezzature utilizzate per un processo GMAW. Tali apparecchiature contribuiscono al consumo totale di energia del processo e di conseguenza influenzano anche l'efficienza energetica. Inoltre, tutti i processi basati su filo metallico hanno bisogno dell'applicazione di un flusso di gas schermante per proteggere il materiale dall'ossidazione e per una deposizione ottimale. La selezione del gas di protezione dipende dal tipo di processo e materiale [41] (a titolo di esempio vedi Tabella 8). L'energia necessaria per produrre i gas di schermatura dovrebbe essere inclusa nel bilancio energetico totale [2].

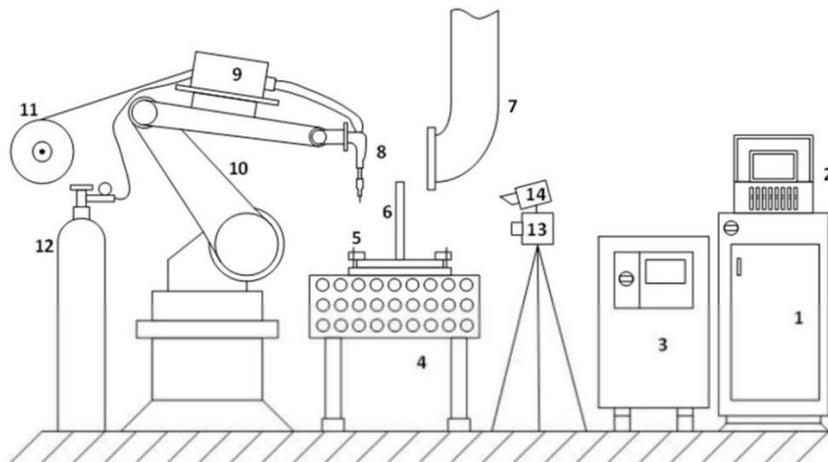


Figura 31 1) unità di controllo robot; 2) sistema di misurazione DAQ; 3) sorgente di alimentazione GMAW; 4) tavolo di saldatura; 5) dispositivo di serraggio; 6) manufatto; 7) estrattore di gas e fumi; 8) torcia di saldatura GMAW; 9) dispositivo di alimentazione del filo; 10) braccio a 6 assi; 11) spola; 12) gas di schermatura; 13 e 14) telecamere [95]

Tabella 8 Gas di protezione per specifici materiali [41]

<b>Materiali</b>	<b>Processi</b>	<b>Gas di protezione</b>
AISI 316L	CMT	25%Co <sub>2</sub> /75%Ar
	PAW	5%H <sub>2</sub> /95%Ar
	TopTIG	100%Ar
Ti-6Al-4V	CMT	100%Ar
		50%He/50%Ar
		100%He
	PAW	100%Ar
	TopTIG	70%He/30%Ar

Pochi ricercatori hanno studiato in maniera olistica il consumo di energia in tutte le sue componenti. Sproesser et al. [96] hanno valutato l'efficienza energetica del GMAW mediante l'indicatore EDE (*Electrical Deposition Efficiency*), espresso in g/kWh.

Equazione 2

$$EDE = \frac{wfr}{P_w} \cdot \rho \cdot A_w$$

Dove:

- $wfr$  è il tasso di avanzamento del filo;
- $P_w$  è la potenza di processo, che quantifica l'energia necessaria per creare il bagno di fusione e fondere il filo. Degna di nota è la metodologia proposta dall'autore [96] che permette una valutazione completa della potenza elettrica consumata attraverso la misurazione di corrente e tensione nella fase precedente e successiva al passaggio nella sorgente elettrica dedicata alla saldatura (vedi Figura 32). Dal rapporto tra la potenza in uscita e la potenza elettrica misurata alla presa a muro, si ottiene una misura dell'efficienza *wall-plug*, che permette di valutare l'impatto delle eventuali perdite nel sistema di alimentazione e della potenza richiesta per il sistema di raffreddamento sulla potenza in uscita;
- $\rho$  è la densità del filo;
- $A_w$  è l'area della sezione del filo.

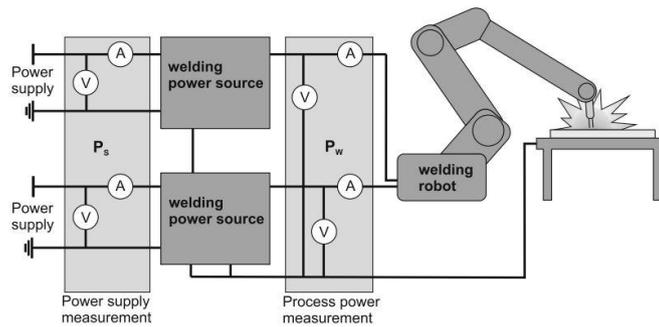


Figura 32 Schema di misurazione della potenza dalla presa a muro nel caso di un processo GMAW [95]

Altri autori [45][4] hanno impiegato il SEC, confrontando l'efficienza energetica di processi diversi, non considerando, tuttavia, tutte le componenti (è altrettanto vero che, come ad esempio in [75], i consumi durante tempi non produttivi e delle attrezzature sono inferiori di un ordine di grandezza e pertanto ritenuti trascurabili). Si rende necessario quindi colmare il *gap* per una maggior consapevolezza dell'effettiva sostenibilità dei processi MWD. Inoltre, l'efficienza energetica è solo una parte degli obiettivi che devono essere considerati in fase di progettazione; le valutazioni energetiche devono essere integrate con altri obiettivi di carattere ambientale ed economico. Priarone et al. [97] hanno analizzato la domanda di energia cumulativa e i costi di produzione per ciascuna singola fase di un processo integrato additivo/sottrattivo confrontando i risultati con le lavorazioni tradizionali. La metodologia usata, in Figura 33, permette di quantificare i diversi contributi energetici, economici, di risorse e tempi di produzione per ogni step (dalla produzione del materiale grezzo fino alle fasi di finitura). È opportuno dunque includere nel bilancio energetico totale anche le fasi di post-processo, sicuramente non trascurabili, ma necessarie per ottenere le desiderate finiture superficiali. Seguendo un simile approccio è stata effettuata l'analisi di Campatelli et al. [75] nel caso studio di una paletta di acciaio. Entrambi gli studi dimostrano come l'approccio additivo WAAM-sottrattivo, sulla base del componente e del tipo di materiale adoperato, apporti risparmi significativi di risorse e di energia.

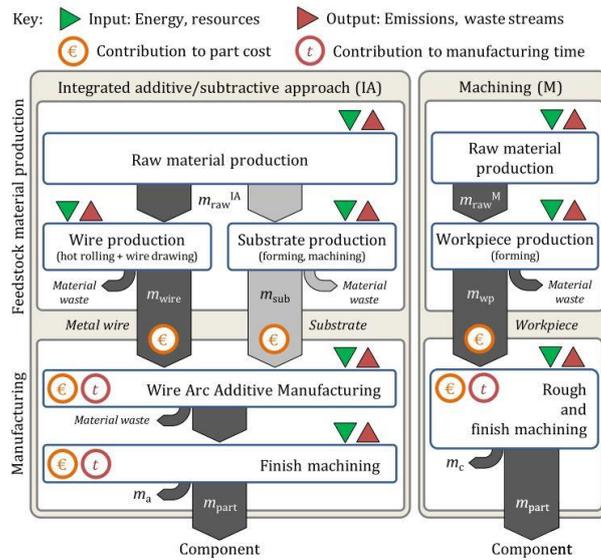


Figura 33 Principali flussi degli approcci di produzione additivo (WAAM)/sostrattivo e sottrattivo puro [96]

Nel presente lavoro di tesi, il SEI è stato calcolato in accordo ai dati disponibili in letteratura, riportati in Appendice A.1, e per ogni prova sperimentale condotta dagli autori.

### 3.2.3 Modelli di regressione (SEI Vs WFR)

Per verificare l'esistenza di correlazioni tra i dati osservati, in questo caso tra due variabili, si considerano le coppie ordinate di valori  $(x_i, y_i)$  e si rappresentano in un piano cartesiano, ottenendo i diagrammi a dispersione. I grafici delle prossime sezioni 3.2.3.1 e 3.2.3.2 sono stati realizzati tramite MS Excel e disposti per tipo di processo o per tipo di materiale.

I due parametri, SEI e WFR, sono influenzati da molte variabili (potenza, densità del materiale, corrente, tensione, diametro del filo, tipo di processo, velocità di avanzamento del filo, velocità di traslazione, qualità della deposizione), pertanto è impossibile stabilire a priori il miglior processo o il miglior materiale in termini di efficienza energetica. Inoltre alcune variabili sono combinate e hanno effetti diversi sulla deposizione di materiale. Si cercherà di fare una valutazione comparativa, delineando gli aspetti più significativi e salienti, e individuando analogie con quanto

detto in letteratura. Inoltre, come si nota anche dall'Equazione 1, SEI e WFR sono inversamente proporzionali, a parità degli altri parametri, in quanto all'aumentare della portata volumica, si riduce il consumo di energia per unità di massa.

La presente analisi di regressione è stata condotta con l'obiettivo di trovare l'equazione di una curva che meglio approssima la relazione che lega la variabile Y alla variabile deterministica X. Per rappresentare le curve di regressione è stato utilizzato il tool Curve Fitting della suite Matlab R2020b, andando a ordinare il WFR e plottando i corrispondenti SEI. Il modello che si intende seguire è quello sviluppato da Kara e colleghi [87], per processi di asportazione di materiale, in cui vengono correlati lo *Specific Energy Consumption* (SEC) e il *Material Removal Rate* (MRR), ovvero il tasso di asportazione di materiale, con lo scopo di impostare un modello empirico per predire il consumo totale di energia.

Equazione 3

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR}$$

Tale parametro contiene un'informazione relativa alla velocità del processo. Anche nel presente lavoro di tesi si è cercato di correlare lo *Specific Energy Input* (Equazione 4) con un parametro che desse informazioni circa la velocità di processo. Essendo un processo di deposizione e non di asportazione di materiale si sarebbe potuto utilizzare il *Deposition Rate*, come effettuato da [98] Lunetto et al., ma poiché non si sono reperiti (poiché non sempre dichiarati in letteratura) tutti i dati per poterlo calcolare, al suo posto si è fatto riferimento al *Wire Flow Rate*.

Equazione 4

$$SEI = C_0 + \frac{C_1}{WFR}$$

Nell'Equazione 4,  $C_0$  (in MJ/kg) è una costante rappresentativa di un valore di SEC fissato, indipendente dal tasso di deposizione.  $C_0$  aumenta linearmente se la quantità di massa depositata aumenta.  $C_1$  (in MJ/min) è una costante rappresentativa del consumo energetico di apparecchiature. Pertanto,  $C_1$  è legato principalmente all'architettura della macchina [98].

Dunque, una volta individuato il SEI e il WFR, l'obiettivo di questa analisi statistica è quello di determinare i coefficienti  $C_0$  e  $C_1$  dal modello di regressione lineare secondo il metodo dei minimi quadrati ordinari OLS<sup>2</sup>. Nell'output di Matlab, riportato a lato di ogni grafico, è possibile trovare la funzione della curva di regressione della popolazione, i coefficienti  $C_0$  e  $C_1$ , e i controlli della bontà di adattamento comunemente usati.

Una volta costruito un modello di regressione, è importante confermare la bontà di adattamento del modello e la significatività statistica dei parametri stimati. Viene utilizzato un intervallo di confidenza al 95%, ovvero un intervallo che contiene il valore reale dei coefficienti nel 95% dei campioni ripetuti.

I controlli della bontà del modello sono:

- $R^2$ : misura la frazione della varianza di Y spiegata da X. Y è la variabile dipendente mentre X è la variabile indipendente o regressore. È una proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato.

*Equazione 5*

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS}$$

dove ESS è la devianza spiegata dal modello:

*Equazione 6*

$$ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

e TSS è la devianza totale:

*Equazione 7*

$$TSS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

---

<sup>2</sup> *Ordinary Least Squares* (OLS) è una tecnica di regressione che, mediante un calcolo differenziale, permette di stimare i coefficienti  $C_0$  e  $C_1$  sulla base della somma dei quadrati degli scarti dei valori stimati da quelli osservati, detti anche residui.

- $R^2$  corretto:

*Equazione 8*

$$\overline{R^2} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-k-1} \right) \frac{SSR}{TSS} \quad , \quad SSR = \sum_{i=1}^n \hat{u}_i^2$$

- RMSE: radice dell'errore quadratico medio, misura la dispersione della distribuzione dell'errore statistico  $u$ , corretta da  $n$  gradi di libertà

*Equazione 9*

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \widehat{u}_i^2}$$

Nei paragrafi 3.2.3.1 e 3.2.3.2 verranno riportate le rappresentazioni grafiche (diagrammi a dispersione e curve di regressione con output di Matlab) inizialmente per i processi Laser e successivamente per i processi che fanno uso di arco elettrico. I dati origine sono riportati nelle tabelle in Appendice A.2 e A.3.

### 3.2.3.1 Processi Laser (LMWD)

- Laser – per tipo di materiale e processo

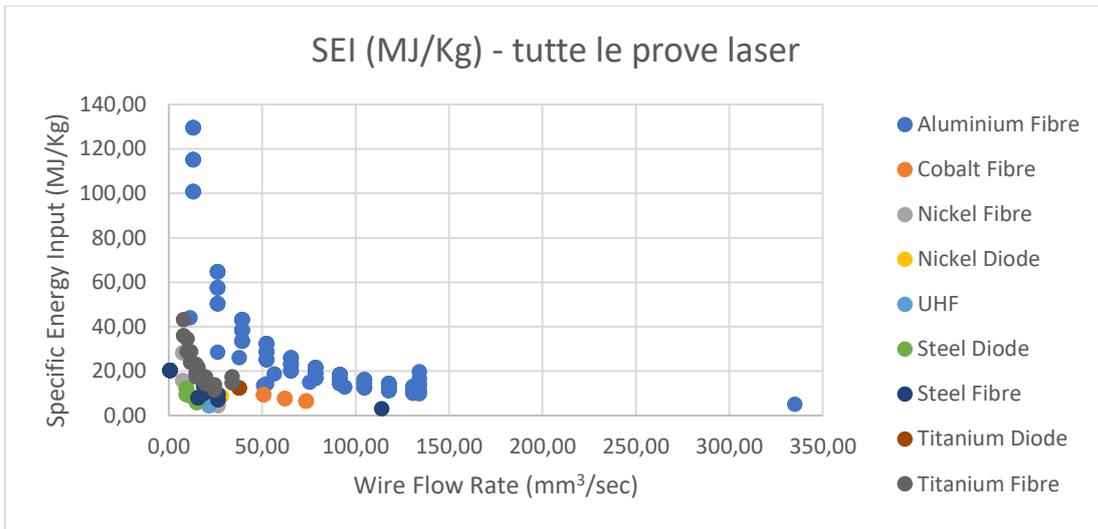


Figura 34 SEI (MJ/kg) - tutte le prove laser

Il grafico in Figura 34 riporta i valori di SEI in relazione al WFR sulla base delle varie leghe e tipi di materiale utilizzati nei due principali processi laser (a fibra e a diodi). Questo diagramma a dispersione, adoperando tutti i test con processi laser, consente una visione globale dei processi LMWD, a livello di tecnologia e di materiale.

In linea generale, si osservano chiaramente le tendenze significative presentate dai dati ottenuti con utilizzo delle leghe di alluminio e di titanio, con una maggiore inclinazione negativa per la curva del titanio. Per quanto concerne le leghe di cobalto, nonostante la sola disponibilità di tre test, è evidente una progressiva riduzione del SEI. Tendenzialmente, i valori di consumo energetico per l'alluminio risultano, a parità di WFR, più elevati rispetto agli altri materiali. Per i processi laser in lega di alluminio, con portate volumiche in un intervallo [26.18, 134.11], il consumo energetico necessario si concentra in un intervallo [64.74, 9.85]. Per i processi laser in lega di titanio invece, con portate volumiche in un intervallo [7.85, 45.24], il consumo energetico necessario si concentra in un intervallo [43.11, 10.98].

Dunque, tenendo costante la portata volumica, l'acciaio consente valori più bassi di SEI, seguito dal cobalto, titanio e infine l'alluminio che, nonostante la maggiore richiesta energetica, risulta maggiormente apprezzato in ambito industriale per le sue caratteristiche di alta rigidità e leggerezza (densità:  $2,66 \div 2,85 \text{ g/cm}^3$ ) [63].

Non ci sono abbastanza elementi per poter confrontare laser a fibra e a diodo, nel complesso, il laser a fibra è quello maggiormente presente tra le attrezzature.

Tra tutti i risultati osservati, eccetto punti estremi che verranno analizzati nei successivi grafici in Figura 35 e Figura 39, si distinguono i valori registrati da leghe di nickel e cobalto, facendo uso di laser fibra, e da acciai utilizzando laser a diodo e fibra. In Abioye et al. [33], è stato depositato uno strato di Inconel 625 (lega di nickel) con laser a fibra drogato con itterbio, raggiungendo un valore di SEI 4,50 MJ/kg e WFR di  $26,35 \text{ mm}^3/\text{sec}$ . È stato dimostrato che all'aumentare del WFS si riduce l'angolo di contatto delle gocce sul substrato e aumenta la diluizione e l'*aspect ratio*. Inoltre, la velocità di traslazione della testa di deposizione e la potenza elettrica influenzano positivamente la diluizione e *aspect ratio*, e negativamente l'angolo di contatto.

In Zhang et al. [36], un filo preriscaldato di Weartech WT-6 (lega di cobalto) è stato depositato con laser a fibra 4 kW, ottenendo SEI 6,49 MJ/kg e WFR  $73,51 \text{ mm}^3/\text{sec}$ . Molto favorevoli i risultati ottenuti impiegando fili di acciaio con laser a diodo con valori di SEI non superiori a 12,23 MJ/kg e WFR non superiori a  $15,08 \text{ mm}^3/\text{sec}$ . Sono riconducibili a una serie di prove di Teli et al. [39], in cui il minor valore di SEI è stato 5,94 MJ/kg. In tale studio è stato depositato un filo di acciaio H11 congiuntamente a polvere di niobio con laser a diodo 4,5 kW ottenendo una migliore efficienza energetica ma una riduzione della durezza del materiale ottenuto.

In Medrano et al. [59], sono stati depositati dei cordoni di acciaio inossidabile 308L con laser a fibra 2 kW. Con lo scopo di individuare una finestra di processo, il minor valore di efficienza energetica è stato raggiunto con SEI 7,11 MJ/kg, in corrispondenza di WFR  $26,39 \text{ mm}^3/\text{sec}$ . L'autore conferma che una potenza troppo bassa o una velocità di avanzamento del filo troppo elevata porta a porosità e ad aree non correttamente fuse.

- **Laser – Leghe di Alluminio**

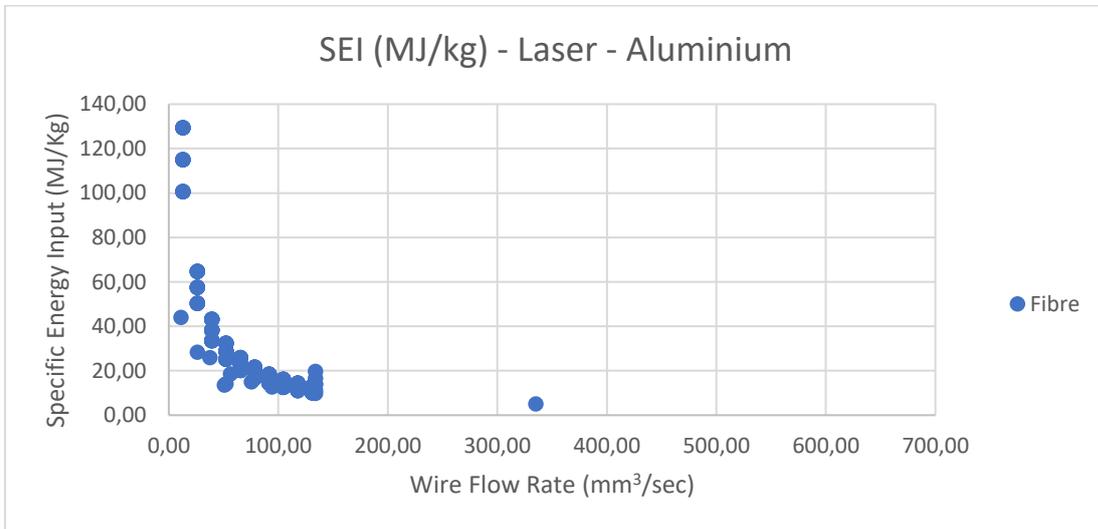


Figura 35 SEI (MJ/kg) - Laser – Aluminium

In Figura 35 e Figura 36 viene analizzato il SEI derivante da prove con processo laser LMWD e utilizzando fili in lega di alluminio. Vengono rappresentate le variazioni del consumo di energia SEI (MJ/kg) per materiale consumato (WFR). Data la scarsità di prove con laser a diodi sono stati presi in considerazione solo dati derivanti da esperimenti con laser a fibra.

Il valore ottenuto da Froend et al. [99] (SEI 5,06 MJ/kg e WFR 335,10 mm<sup>3</sup>/sec) consente una riduzione di consumo energetico notevole grazie a una elevata velocità di avanzamento del filo congiuntamente al diametro di AlMg4.5MnZr di 1,60 mm. Tuttavia, questo risultato va contestualizzato, in quanto lo scopo dell'autore era proprio quello di cercare di ottimizzare sia l'input di calore rilasciato dalla saldatura che il processo di raffreddamento, adattando allo scopo i parametri di processo. Infatti, per quanto riguarda la formazione di grani e la microstruttura della parte ottenuta, come previsto, l'autore dichiara una crescita dei grani non uniforme lungo la struttura. Al contrario, un altro studio [63], condotto dallo stesso autore, ha portato a un basso consumo di materiale e ad elevati valori di SEI (128,48; 115,10; 100,71 MJ/kg) variando soltanto il diametro e il WFS (diminuito di 100 mm<sup>3</sup>/sec). Questo probabilmente è il risultato di più prove condotte cercando di ottenere strati depositati

in assenza di difetti, anche preriscaldando, come in questo caso, il substrato. Quindi anche in questo caso, la qualità di deposizione è un fattore cruciale. Non ci sono abbastanza elementi per poter confrontare le caratteristiche geometriche del materiale depositato rispetto ad altre prove condotte con altri parametri.

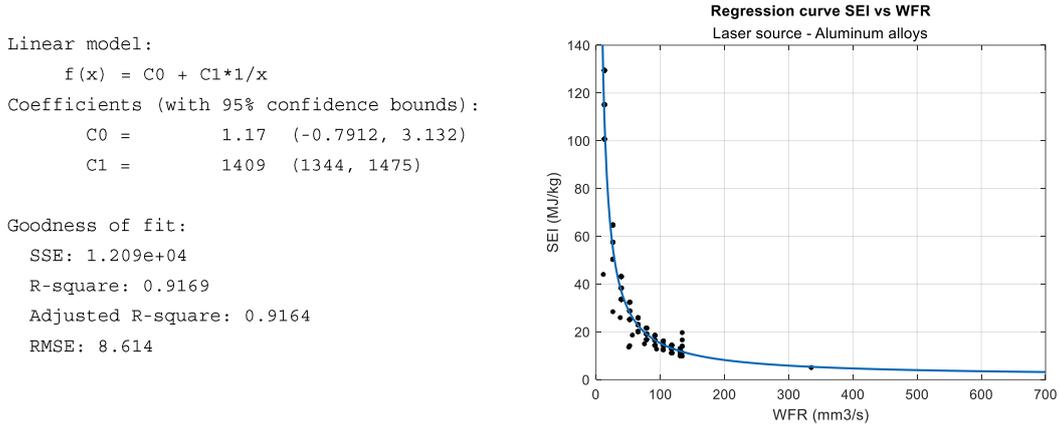


Figura 36 Output e curva di regressione (Laser - Alluminio)

- **Laser – Leghe di Cobalto**

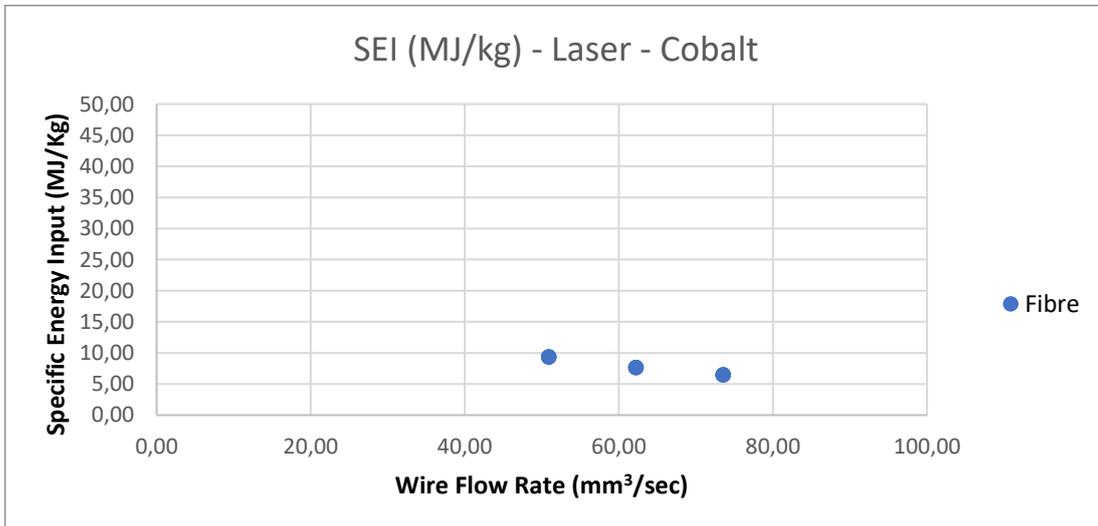


Figura 37 SEI (MJ/kg) - Laser – Cobalt

L'analisi del grafico in Figura 37, pur in presenza di dati molto limitati e con valori di SEI molto più bassi, evidenzia un andamento caratteristico della quasi totalità dei dati analizzati. La spesa energetica si riduce all'aumentare del flusso di materiale

depositato nel processo. L'analisi di regressione è stata limitata ai processi che disponevano di un numero di dati significativo, pertanto non è stata eseguita per le leghe di cobalto e nickel.

- **Laser – Nickel**

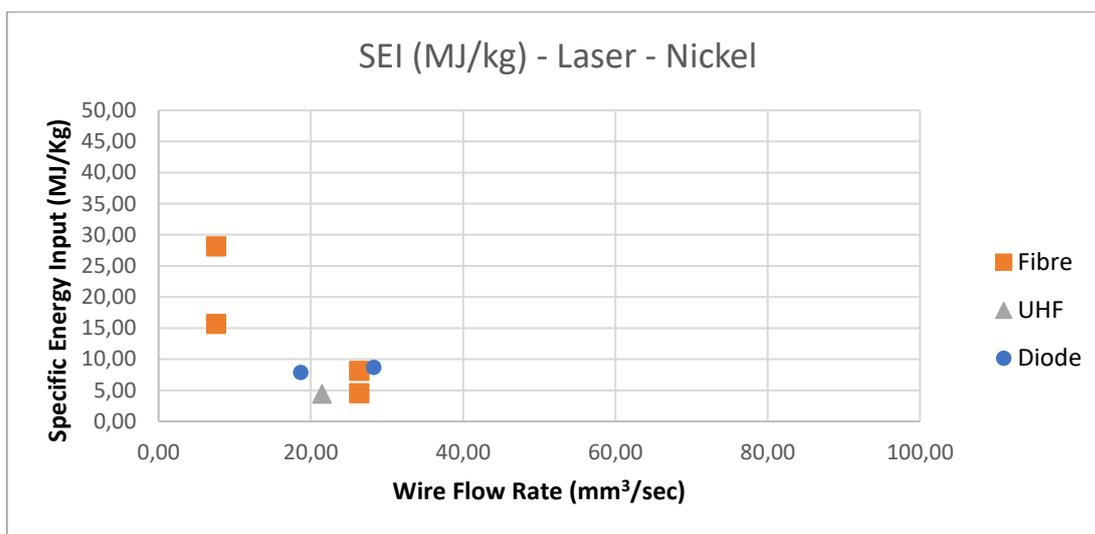


Figura 38 SEI (MJ/kg) - Laser – Nickel

Anche nel caso di leghe di Nickel depositate tramite utilizzo di testa laser, con un ridotto campione statistico, l'andamento è simile ai precedenti. In questo caso, si evidenziano differenti consumi energetici, con portata volumica costante. Sono dovuti sicuramente a più prove effettuate con parametri tenuti costanti, lasciandone variare uno a turno. È bene ricordare che in taluni casi, come ad esempio in questo, i parametri (estrappolati da Abioye et al. [33]) sono riportati in un intervallo min-max e pertanto ne sono state individuate tutte le possibili combinazioni (si rimanda alla tabella in Appendice A.2 per tutti i valori).

Tra gli altri, sono rilevanti i risultati di prove effettuate utilizzando la tecnologia laser di induzione ad alta frequenza, con un SEI di 4,41 MJ/kg in corrispondenza di un WFR di 21,47 mm³/sec. Nello studio [35] l'autore ha controllato l'apporto termico delle due sorgenti di calore (laser e bobina a induzione), per migliorare il rendimento dello strato depositato.

- **Laser – Acciaio**

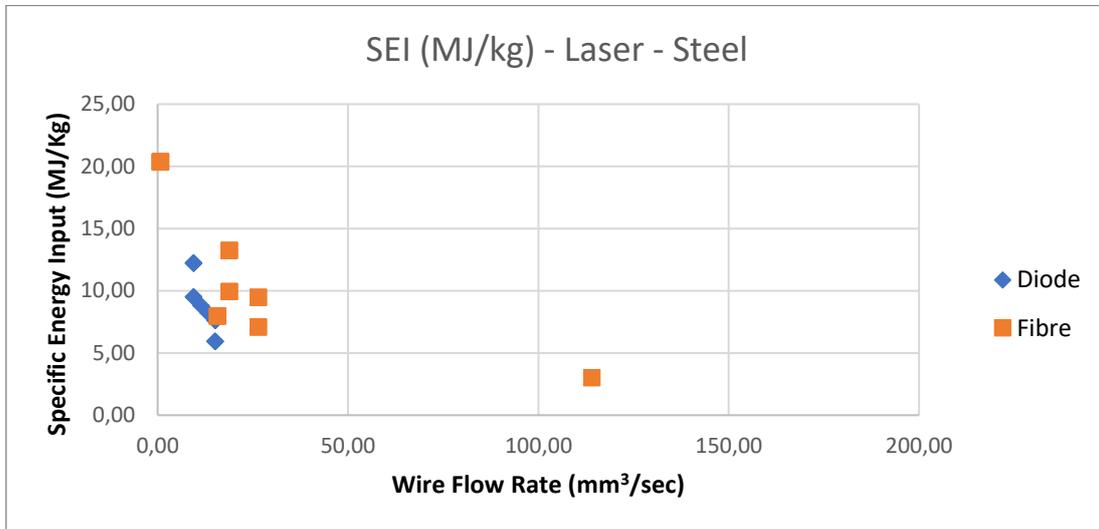


Figura 39 SEI (MJ/kg) – Laser – Steel

La Figura 39 evidenzia nel dettaglio consumi energetici differenti. La velocità di alimentazione e il diametro del filo, ancora una volta, si rivelano parametri importanti per la riduzione del SEI congiuntamente all'incremento del WFR. Infatti, il punto con coordinate (114.04, 3.01) fa riferimento a uno studio [40] atto a verificare le capacità del processo a filo caldo e della fresatura finale a macchina nel correggere distorsioni e porosità. È plausibile che, in assenza della manifattura ibrida, la qualità superficiale dello strato depositato non sarebbe stata ottimale.

All'opposto, il dato (WFR 0.75, SEI 20.36) è rappresentativo di come, impostando bassi valori dei parametri di processo (potenza, wfs e diametro del filo), ne consegue un ridotto flusso di materiale e quindi un alto consumo energetico. La scarsa portata volumica è probabilmente dovuta alle caratteristiche della tecnologia  $\mu$ LMWD utilizzata in [38], che impiegando fili dal diametro molto inferiore rispetto agli altri processi (0,5 mm), porta a una bassa WFS.

Tendenzialmente, a parità di SEI, le prove con laser a diodi hanno portato a un WFR più basso.

In questo caso, in Figura 40, si ha una curva poco rappresentativa, nonostante l'alto valore di  $R^2$ .

Linear model:  
 $f(x) = C0 + C1 \cdot 1/x$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
C0 = 8.249 (7.401, 9.097)  
C1 = 9.199 (7.627, 10.77)  
Goodness of fit:  
SSE: 167.1  
R-square: 0.8014  
Adjusted R-square: 0.7957  
RMSE: 2.185

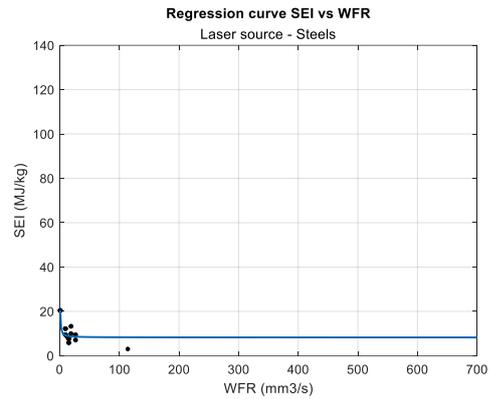


Figura 40 Output e curva di regressione (Laser - Acciaio)

- **Laser – Leghe di Titanio**

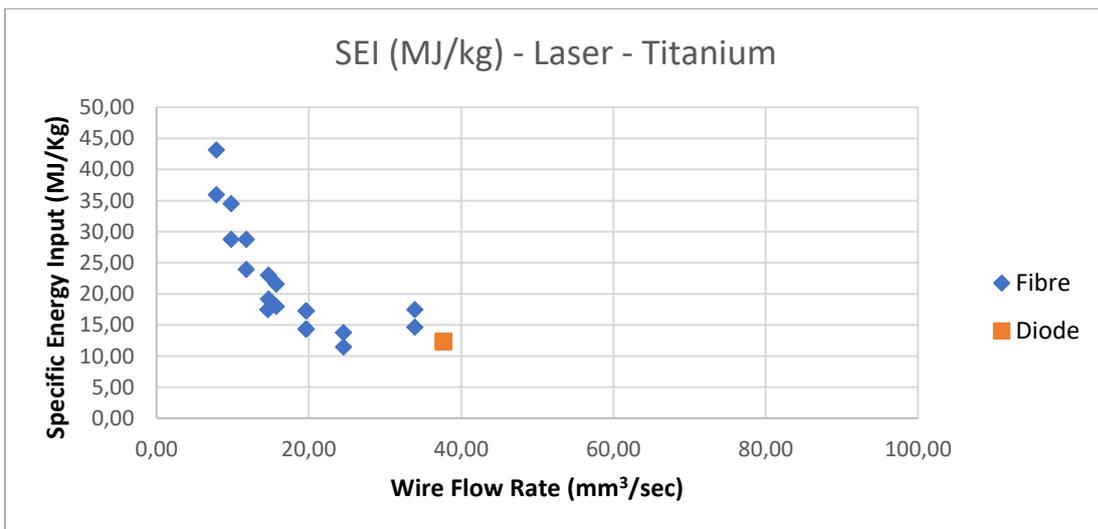


Figura 41 SEI (MJ/kg) - Laser - Titanium

La Figura 41 evidenzia un andamento simile a quelli riscontrati per i materiali precedentemente analizzati. I valori del SEI risultano più elevati per i sistemi laser a fibra rispetto ai sistemi basati su diodi.

Il titanio è soggetto ad ossidazione, pertanto ha bisogno di un sistema inerte che protegga sia il bagno di fusione sia il metallo durante la solidificazione. Grazie al suo eccezionale rapporto resistenza-peso, la lega di titanio Ti-6Al-4V è uno dei principali

materiali utilizzati nell'industria aerospaziale. Negli Stati Uniti questa lega rappresenta la metà di tutte le leghe di titanio utilizzate [60].

È evidente un trend in Figura 42. In linea generale, si può osservare una classica curva iperbolica. I punti sperimentali sono concentrati attorno alla curva. Questo è confermato anche dagli alti valori di  $R^2$  e  $R^2$  corretto.

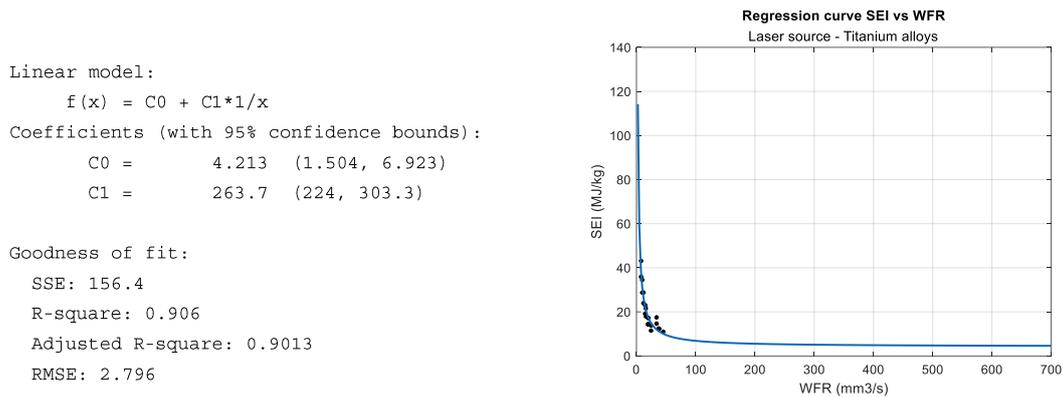


Figura 42 Output e curva di regressione (Laser - Titanio)

### 3.2.3.2 Processi ad arco elettrico (WAAM)

- Arco elettrico (per tipo di processo)

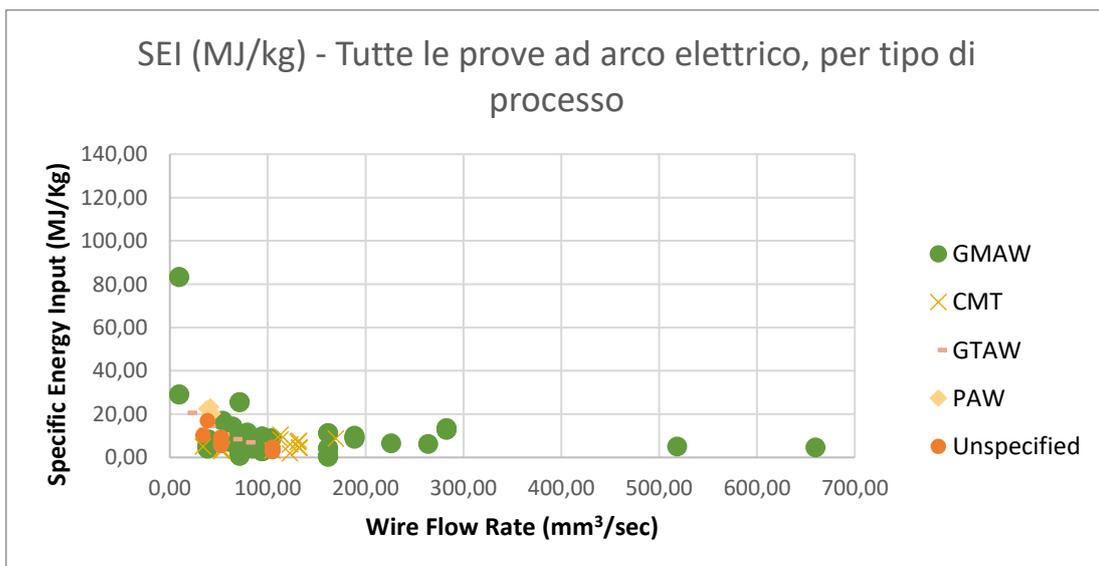


Figura 43 SEI (MJ/kg) - Tutte le prove ad arco elettrico, per tipo di processo

In Figura 43 vengono analizzati i vari processi: GMAW, CMT, GTAW, PAW e UNSPECIFIED (nel caso in cui non è stato riportato il tipo di processo in letteratura). Il processo GMAW, più degli altri, evidenzia un consumo energetico elevato per valori minimi di materiale depositato, mentre si riduce sensibilmente quando il WFR incrementa.

Sono presenti tre valori estremi. Il primo punto, in alto a sinistra del grafico, con coordinate (9.42;83.37) è probabilmente dovuto alla combinazione di alti valori di più parametri di processo, quali la tensione e di conseguenza la potenza, e la velocità di traslazione. Gli altri due punti con un altissimo tasso di deposizione (518.36 e 659.73 mm<sup>3</sup>/s) fanno riferimento al lavoro di ricerca di Sproesser et al. [81], che ha coinvolto un processo T-GMAW. Si ritiene che siano quindi, parametri risultanti dall'accorpamento dei due singoli GMAW (dalla letteratura in questione non è ben specificato).

È noto dalla letteratura che il processo GMAW abbia i più alti tassi di deposizione. I risultati del grafico sono in linea con quanto appena detto, in quanto vengono riportati alti valori di WFR. Tale affermazione è un'approssimazione, fatta a parità di tutti gli altri fattori, in quanto molto dipende dal tipo di materiale utilizzato e quindi dalla sua densità.

Il processo CMT per la sua tecnica di raffreddamento è un processo che consente grandi risparmi di energia rispetto agli altri. I risultati del grafico confermano ciò.

Il processo TopTIG conosciuto per avere tassi di deposizione paragonabili al GMAW, in questa analisi non dispone di dati a sufficienza per poter confermare ciò.

Il GTAW, in linea con quanto detto in letteratura, ha bassi valori di WFR.

Il processo GMAW si concentra su valori di WFR compresi in un intervallo [30.16,104.72] con un SEI da [12.83,2.83]. I valori più bassi di SEI dei processi GMAW sono stati raggiunti con una simulazione tridimensionale di un modello fluido utilizzando i più bassi valori di potenza di tutta la letteratura analizzata, dimostrando il ruolo di forza del trasferimento di calore sulla qualità di deposizione [82].

Per il processo CMT invece, con portate volumiche in un intervallo [104.72,169.65], il consumo energetico necessario si concentra in un intervallo [3.30,8.85].

Il processo GTAW, considerando l'andamento del grafico, è abbastanza simile ai precedenti (il trend osservato dalla nuvola di punti è abbastanza sovrapponibile) ma i dati di consumo di materiale sono concentrati verso il basso (WFR [18.85,78.54] e SEI [7.05,20.53]).

Il processo PAW nelle tre prove eseguite determina sicuramente un consumo di energia in un range ridotto, rispetto agli altri processi. Ciò probabilmente è dovuto alla poca numerosità del campione.

È possibile osservare che, in un intervallo di WFR da 0 a 100 mm<sup>3</sup>/sec, i processi ad arco ottengono risultati migliori di SEI concentrati al di sotto di 20 MJ/kg, rispetto a quelli ottenuti con i processi laser.

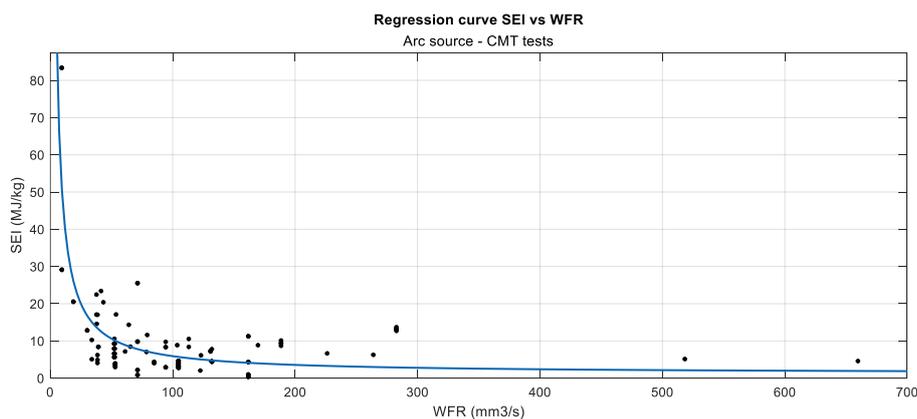


Figura 44 Curva di regressione (tutte le prove ad arco elettrico)

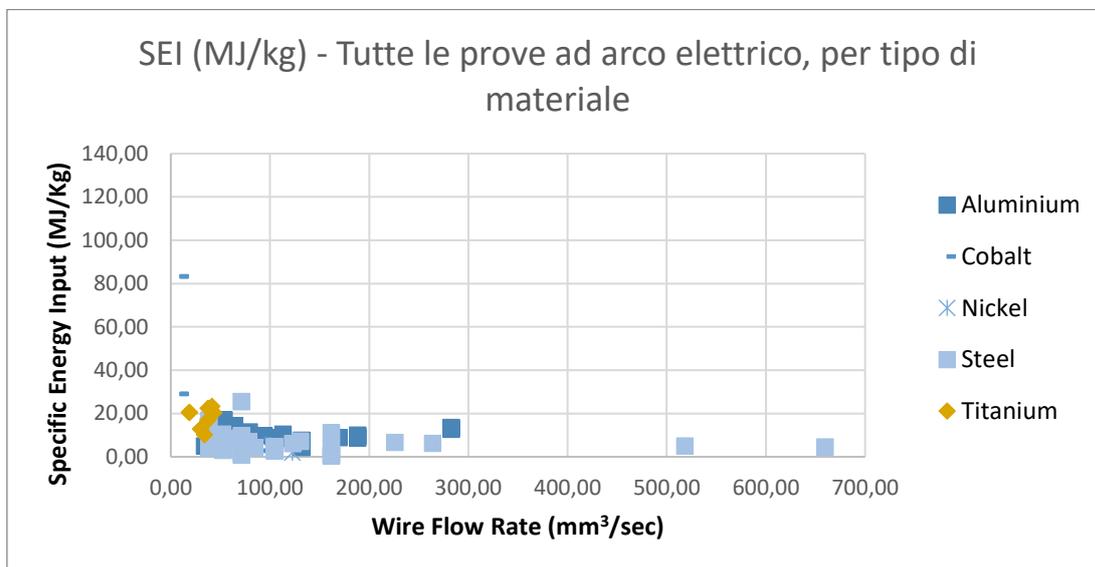
```

Linear model:
    f(x) = C0 + C1*1/x
Coefficients (with 95% confidence bounds):
    C0 =      1.216  (-0.6217, 3.053)
    C1 =     469.5  (398.3, 540.7)

Goodness of fit:
    SSE: 6071
    R-square: 0.6016
    Adjusted R-square: 0.5981
    RMSE: 7.33
    
```

Figura 45 Output di Matlab (tutte le prove ad arco elettrico)

- **Arco elettrico (per tipo di materiale)**



*Figura 46 SEI (MJ/kg) - Tutte le prove ad arco elettrico, per tipo di materiale*

In Figura 46 vengono rappresentati gli stessi valori del grafico in Figura 43, pertanto è sovrapponibile a quello precedentemente osservato. Tuttavia, il presente grafico riporta i valori di SEI in relazione al WFR sulla base delle varie leghe e tipi di materiale utilizzati nei diversi processi ad arco. Tendenzialmente si osserva che i valori di consumo energetici per l'alluminio risultano (a parità di WFR) più elevati, analogamente a quanto già visto per i processi laser. Meno favorevoli i risultati ottenuti impiegando titanio, probabilmente a causa della sua densità ( $4,43 \text{ g/cm}^3$ ) più bassa dell'acciaio e dei bassi tassi di WFR, tuttavia le sue leghe sono molto utilizzate in ambito aerospaziale per le loro caratteristiche metallurgiche. La lega Ti-6Al-4V è caratterizzata da elevata rigidità, eccellente resistenza a fatica e a corrosione e buone performance ad alte temperature. I risultati migliori si trovano nella nuvola di punti occupata da alluminio e acciaio, dove a parità di SEI corrispondono maggiori valori di WFR. Trattasi di valori ottenuti nei processi GMAW e sua variante CMT, noti per i loro alti tassi di deposizione. Ulteriori indagini andrebbero fatte sulla qualità degli strati rispetto agli altri processi con meno WFR.

Tendenzialmente i processi ad arco assicurano valori di SEI più bassi rispetto ai processi laser, anche a parità di WFR (da un confronto tra il grafico in Figura 34 e in Figura 46). In aggiunta, sono state effettuate prove che hanno ottenuto valori maggiori di WFR rispetto ai processi laser, grazie anche agli alti tassi di deposizione raggiungibili dai processi WAAM. È altrettanto vero che non si distinguono dei chiari trend di ciascun materiale come in Figura 34, bensì delle nuvole di punti, anche abbastanza disperse, a causa della pluralità di tecnologie WAAM a disposizione.

- **CMT**

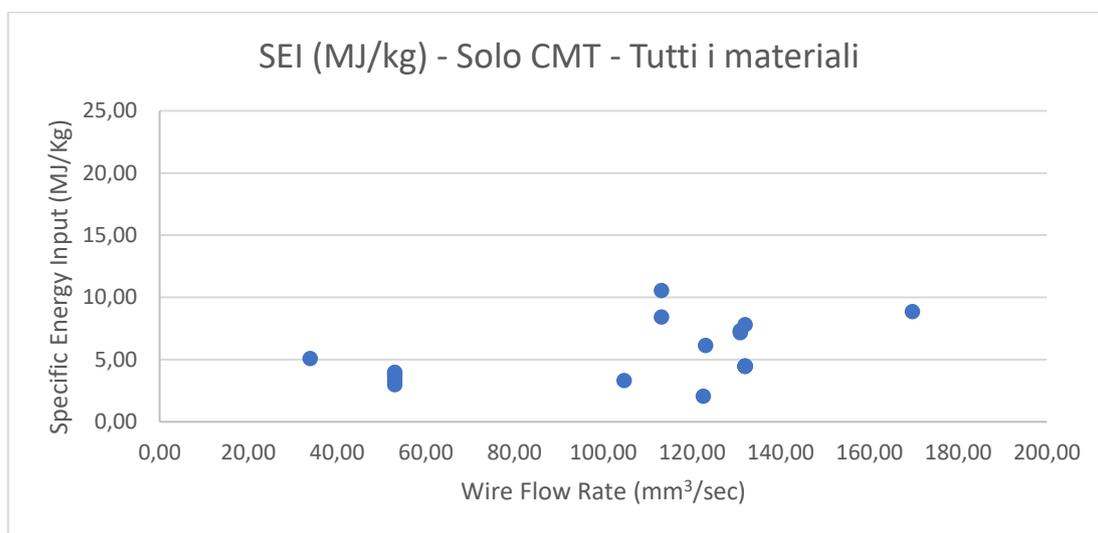


Figura 47 SEI (MJ/kg) - Solo CMT - Tutti i materiali

Il CMT è conosciuto in letteratura quale il processo WAAM che consente di risparmiare la maggior quantità di energia possibile, modificando il trasferimento delle gocce di materiale nel bagno di fusione. Per le sue particolari caratteristiche, è stato quindi trattato a parte, nonostante sia, a tutti gli effetti, una sub-variante del GMAW.

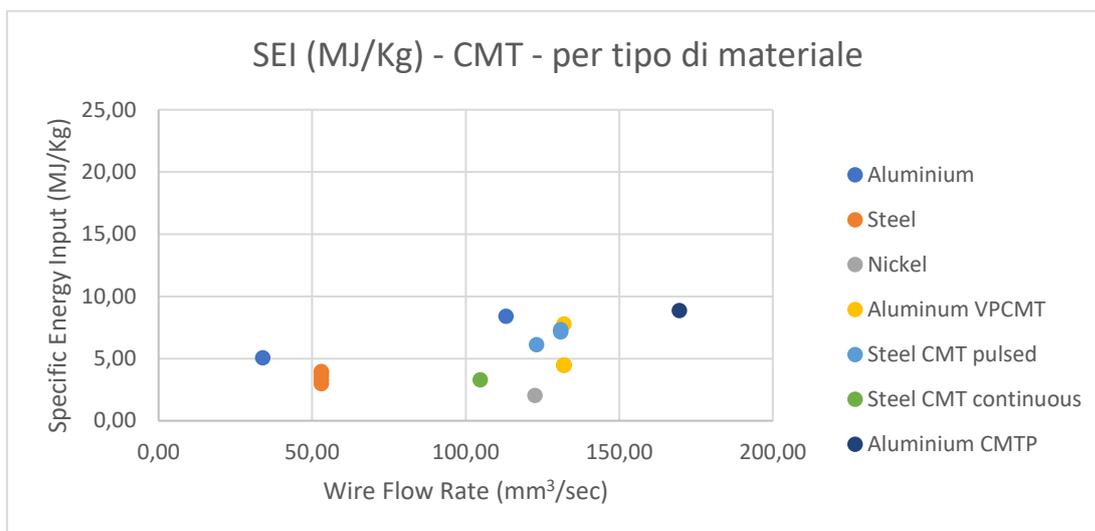


Figura 48 SEI (MJ/kKg) - Solo CMT - per tipo di materiale

In Figura 48, si possono osservare le varianti di processo utilizzate e come cambiano i valori a seconda del tipo di filo.

La prova effettuata con lega di nickel (Inconel 625) ha registrato il più basso valore di SEI (2,04). Lo studio in questione [51] intendeva analizzare gli effetti del trattamento termico sulla microstruttura e sulle proprietà meccaniche del materiale. È evidente quindi la necessità di operazioni di post-processing.

L' esperimento di Yuan et al. [47], mantenendo costante il WFR, ha conseguito valori di SEI da [2.97,3.97]. L'autore intendeva dimostrare come, aumentando la tensione (a parità di altri parametri) e conseguentemente la distanza dell'ugello dal substrato, aumenti anche l'input di calore con risultati insoddisfacenti nella geometria del cordone.

L'elemento centrale è, ancora una volta, il raggiungimento di un valore di compromesso tra velocità di avanzamento del filo e potenza elettrica, al fine di aumentare la portata e ridurre il consumo energetico.

- **GMAW (compreso CMT)**

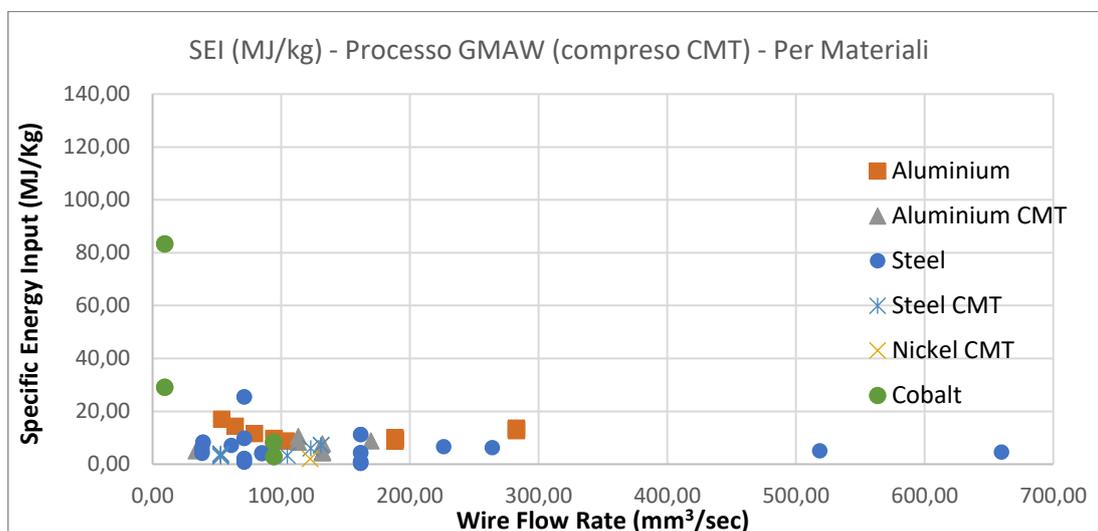


Figura 49 SEI (MJ/kg) - Processo GMAW (compreso CMT) - Per tipo di Materiale

In Figura 49, si può notare come i materiali processati con tecnologia CMT hanno tendenzialmente valori di SEI bassi rispetto agli altri, in linea con quanto riportato precedentemente. L'assenza del titanio, sfruttato soltanto con processi GTAW e PAW (oltre che laser), non è un caso. Il titanio non è frequentemente utilizzato con GMAW a causa della generazione di spruzzi, del divagare dell'arco elettrico e della conseguente ondulazione del cordone [100]. GTAW e PAW sono sicuramente processi più stabili ma è difficile prevedere accuratamente il percorso di deposizione (per via della loro configurazione filo-sorgente off-axis) e inoltre hanno un basso tasso di deposizione rispetto al GMAW. In Pardal et al. [100] si intende dimostrare come sia possibile stabilizzare il CMT sfruttando un fascio laser concentrico con l'arco. È altrettanto vero che le leghe di titanio sono molto costose e difficili da lavorare rispetto ad altri materiali utilizzati in ambito aerospaziale, come l'alluminio, in cui appunto si riconosce un trend in Figura 50. Tuttavia, analizzando la curva di regressione, si notano valori di  $R^2$  e di  $R^2$  corretto minori rispetto a quelli riportati per gli altri processi.

Linear model:  
 $f(x) = C0 + C1 \cdot 1/x$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
C0 = 2.079 (-0.5693, 4.727)  
C1 = 474.5 (381.4, 567.5)  
Goodness of fit:  
SSE: 5370  
R-square: 0.6073  
Adjusted R-square: 0.6015  
RMSE: 8.952

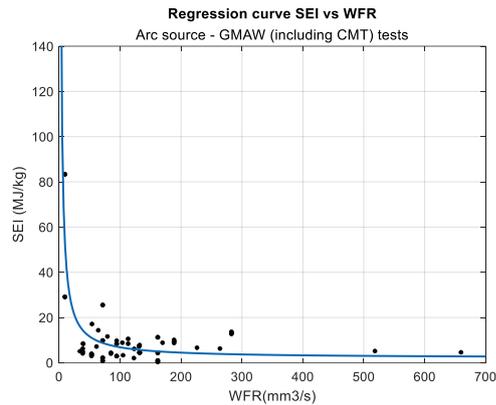


Figura 50 Output e curva di regressione (GMAW compreso CMT)

- **GTAW**

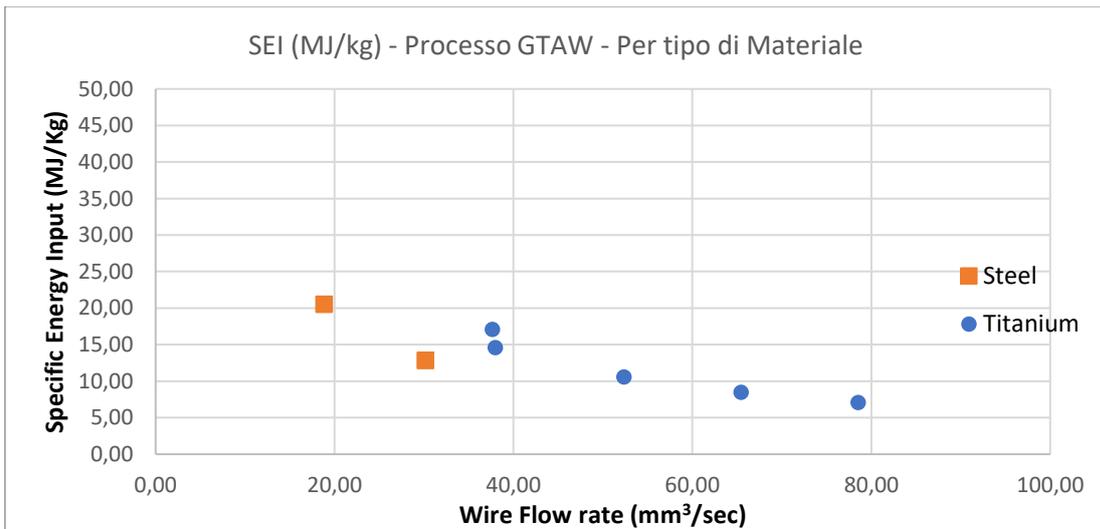


Figura 51 SEI (MJ/kg) - Processo GTAW - Per tipo di Materiale

Qui si è realizzato direttamente il plot con la differenziazione dei materiali dato il ridotto numero di tali valori complessivi.

In Figura 51 si può vedere come nonostante la scarsità di dati, vi è un trend del titanio derivante da studi di autori diversi. Sembra che il processo ad arco ottimale per il titanio sia proprio il GTAW. Si sta assistendo a un incremento nell'utilizzo delle leghe di titanio grazie alla sua buona compatibilità con i polimeri compositi in fibra di carbonio che vengono usati per le fusoliere dei velivoli [86].

$f(x) = C0 + C1 \cdot 1/x$   
 Coefficients (with 95% confidence bounds):  
 C0 = 4.782 (0.6985, 8.865)  
 C1 = 299 (176.4, 421.5)

Goodness of fit:  
 SSE: 32.75  
 R-square: 0.8261  
 Adjusted R-square: 0.8013  
 RMSE: 2.163

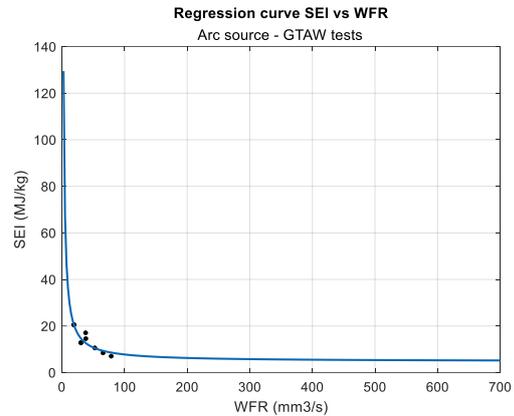


Figura 52 Output e curva di regressione GTAW

- PAW

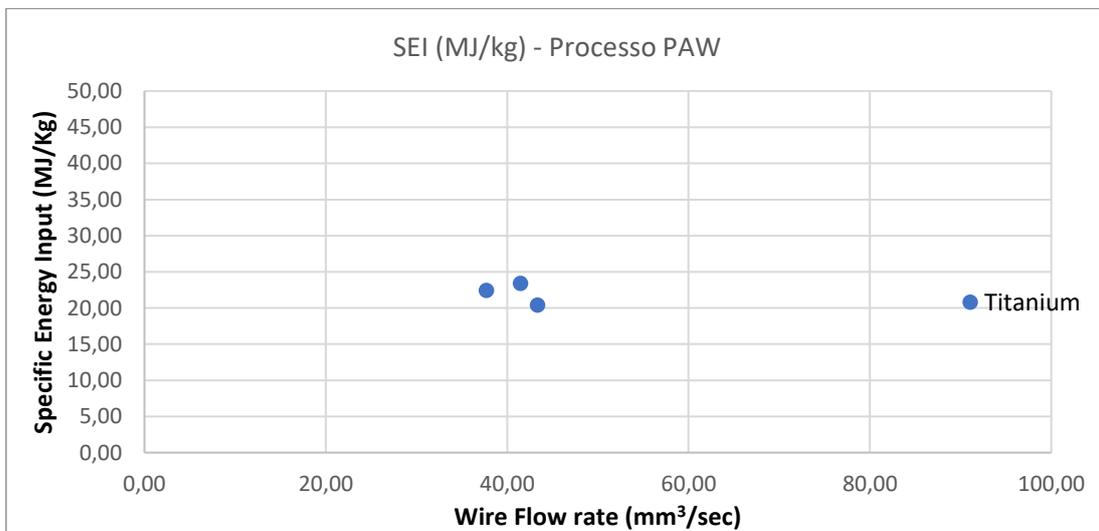


Figura 53 SEI (MJ/kg) - Processo PAW

Tra le prove sperimentali analizzate nella presente trattazione, il processo PAW coinvolge soltanto fili in leghe di titanio. In questo caso, il numero di valori non è abbastanza sufficiente per ottenere una curva di regressione rappresentativa.

Come afferma Taberero et al. [41], con leghe di titanio Ti6Al4V il processo PAW mostra ottimi rapporti di tasso di deposizione/proprietà meccaniche, raggiungendo un

tasso di deposizione di 2 kg/h e valori medi di tensione di snervamento, carico di rottura e allungamento a rottura del 97%, 98% e 120% dei limiti minimi, rispettivamente.

## Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi, a valle di una panoramica sulle tecnologie di produzione dell'*Additive Manufacturing*, è stata applicata una metodologia di analisi per la valutazione della sostenibilità energetica dei processi *Metal Wire Deposition*. Le tecnologie basate sulla deposizione a filo metallico sono processi di fabbricazione additiva che permettono di produrre parti medio-grandi, a bassa complessità, con minimo scarto di materiale e con tassi di deposizione relativamente alti rispetto ai processi basati su letto di polvere [2]. Lo studio della letteratura in materia ha mostrato che la qualità di deposizione è un fattore critico e pertanto l'attenzione dei ricercatori è diretta a ottimizzare i parametri di processo, al fine di evitare la generazione di difetti durante la fusione del materiale. Tuttavia, sono necessari ulteriori studi approfonditi per la valutazione dell'efficienza energetica e dell'impatto ambientale.

La presente analisi è stata condotta con l'obiettivo di valutare quantitativamente l'efficienza energetica dei processi LMWD e WAAM, mediante l'indicatore SEI. Sono state individuate le prove sperimentali riguardanti processi ad arco e laser da 86 articoli scientifici (cfr. Appendice A.1). In questo modo è stato possibile ricavare i parametri di processo, che influenzano direttamente SEI e WFR. Lo *Specific Energy Input* è un indicatore rappresentativo del consumo energetico del processo per unità di materiale depositato, mentre il *Wire Flow Rate* è rappresentativo della velocità del processo. Tali valori sono stati calcolati tramite l'Equazione 1, sono stati plottati e infine analizzati i grafici ottenuti.

Riguardo i risultati dell'analisi, è emerso che:

- Per i processi LMWD, le prove che hanno riportato i valori più bassi di SEI sono:
  - a) In Feldhausen et al. [40] è stato fabbricato un componente esagonale di acciaio 316 L utilizzando un processo LHWC con un SEI di 3,01 MJ/kg e WFR di 114,04 mm<sup>3</sup>/sec;
  - b) In Abioye et al. [33] mediante un filo di Inconel 625 è stato riportato un SEI di 4,50 MJ/kg e WFR di 26,35 mm<sup>3</sup>/sec;
  - c) In Froend et al. [99] mediante laser a fibra si è stati in grado di fondere un filo di AlMg4.5MnZr in H19 con un SEI di 5,06 MJ/kg e WFR di 335,10 mm<sup>3</sup>/sec.

- Per i processi CMT:
  - a) In Tanvir et al. [51] un filo di Inconel 625 con diametro 1,20 mm si è ottenuto un SEI di 2,04 MJ/kg, confermando la ottima sostenibilità energetica di tale processo, in corrispondenza di WFR 122,52 mm<sup>3</sup>/sec.
- Per i processi GMAW (escluso CMT):
  - a) In Ou et al. [82] sono stati raggiunti valori al di sotto di 1 MJ/kg, utilizzando fili di acciaio H13, con portata volumica fissa di 161,73 mm<sup>3</sup>/sec.
- Per i processi GTAW:
  - a) In Rodriguez et al. [54] tramite l'innovativo processo TopTIG continuous si è riportato un valore del SEI pari a 7,05 MJ/kg e un valore di WFR pari a 78,54 mm<sup>3</sup>/sec, utilizzando acciaio inossidabile 316 L.
- Per i processi PAW:
  - a) In Zhang et al. [86], la lega Ti-6Al-4V è stata utilizzata con tecnica PAW oscillation ottenendo un valore di SEI pari a 20,39 MJ/kg e WFR pari a 43,35 mm<sup>3</sup>/sec.

Per i processi con un elevato numero di prove a disposizione, è stata fatta un'analisi di regressione. Dai modelli di regressione analizzati è possibile confermare l'andamento iperbolico, che diversi autori, tra cui Kara et al. [87][101], Lunetto et al. [98] e Catalano et al. [2] hanno individuato rispettivamente per processi di asportazione, di *Fused Deposition Modelling* e di *Metal Wire Deposition*. Quindi, nel caso specifico di processi di deposizione con filo, maggiore è la velocità del processo, minore è il consumo energetico per unità di materiale. Si può affermare che l'efficienza energetica aumenta, se aumenta il volume di materiale depositato nell'unità di tempo.

Occorre considerare che nel bilancio energetico totale dei processi MWD bisogna includere non soltanto il consumo derivante dalla fase di deposizione pura, ma anche i consumi energetici nelle fasi di standby e di tutte le attrezzature ausiliarie/consumabili. Inoltre, dovrebbero essere considerati anche i processi di finitura, che sono indispensabili per ottenere le desiderate finiture superficiali.

Infatti, dall'analisi dei dati è evidente la necessità di dover ricorrere a trattamenti termici (a titolo di esempio ricottura, pressatura isostatica a caldo, preriscaldamento, pallinatura laser) e di post-processo per migliorare la qualità superficiale, le proprietà meccaniche e ridurre le deformazioni nella struttura dei grani [2]. Tali operazioni si rendono maggiormente necessarie all'aumentare della portata volumica del materiale depositato. È imprescindibile quindi un trade-off tra efficienza energetica e qualità di deposizione. Per ottenere ciò, dunque, è fondamentale l'identificazione del set ottimale di parametri di processo che tenga conto anche del fattore energetico, troppo spesso trascurato.

I processi di WD, non devono essere intesi come sostitutivi dei processi di fabbricazione convenzionali [90]. Infatti, lo sfruttamento in termini complementari delle due tecnologie ne potrebbe favorire lo sviluppo e la diffusione, migliorando la qualità di deposizione, fattore che ne ha limitato nel tempo l'utilizzo a vantaggio dei processi basati su letto di polvere.

Sebbene l'importanza di effettuare valutazioni ambientali sia stata riconosciuta sin dagli anni '90, come dimostra questo studio del 1998 [102] che introduce un modello di valutazione dei rischi per la salute derivanti da processi ad arco, occorre implementare approcci combinati che comprendano sia la sostenibilità energetica sia quella ambientale. Per una valutazione complessiva dell'impatto ambientale, confrontando processi con diverse efficienze energetiche, è possibile avvalersi di una metodologia sistematica quale LCA che comprenda le emissioni di CO<sub>2</sub>, la domanda energetica, i consumi e i costi delle risorse materiali [97]. Suddividere e classificare i diversi contributi permette di identificare la tecnologia di produzione caratterizzata da una minore domanda energetica ed emissioni di CO<sub>2</sub>.

In prospettiva, andrebbero effettuate ulteriori analisi che si basino sulla valutazione LCA dell'efficienza energetica dei processi di deposizione di fili metallici, come in Figura 54, che non comprenda soltanto la fase di deposizione pura, ma anche la produzione del materiale grezzo, la prefabbricazione e le fasi di post-processo [2]. Infatti, i ridotti sprechi di materiale e i bassi rapporti *buy-to-fly* aumentano la competitività di questi processi in termini di benefici ambientali [2].

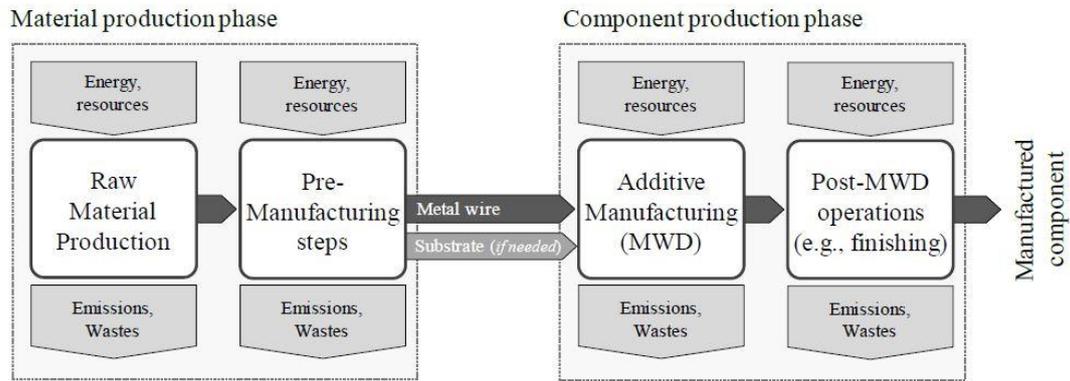


Figura 54 Schema di valutazione dell'impatto ambientale di processi basati su Metal Wire Deposition [2]

In conclusione, va considerato che, il contenuto di questo elaborato ambisce a contribuire allo sviluppo e all'applicazione di metodologie di supporto decisionale per la sostenibilità tecnologica e ambientale dei processi MWD, e che quindi è finalizzato alla sua implementazione nei futuri modelli LCA.

# Appendice

## A.1 Letteratura analizzata

Tabella 9 Letteratura analizzata

ID	YEAR	AUTORS	SUBJECT OF RESEARCH	PROCESS	DESCRIPTION OF THE PROCESS	MATERIAL	PROCESS PARAMETERS	SEC
1	2008	N.I.S. Hussein*, J. Segal, D.G. McCartney, I.R. Pashby	Microstructure formation in Waspaloy multilayer builds following direct metal deposition with laser and wire	DMD	Direct metal deposition using wire as a feedstock material and using a high power diode laser as the heat source. Lower cost and lower oxide content	Waspaloy: Nickel-based superalloy	Laser power 2 kW Traverse speed 0,0017 m/s wire feed rate 0,025 m/s 0,83 kg/h diameter 1,2 mm	
2	2008	Alexis Medrano, Janet Folkes, Joel Segal, Ian Pashby	Fibre laser metal deposition with wire: parameters study and temperature monitoring system	LMWD	Laser metal deposition with wire 100% of the material is used, clean (dust-free) process high metal deposition rates disadvantage: path-dependent process	Stainless steel 308L	Laser power 1500-2000 W wire feed rate 1,0-1,4 m/min traverse speed 200-250 mm/min diameter 1,2 mm	
3	2008	Sui Him Mok, Guijun Bi *, Janet Folkes, Ian Pashby	Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics	High power diode laser	Direct diode laser deposition with wire 2.5 kW Rofin DL025 top-hat power density distribution in the slow axis direction because the top-hat and wide beam can give more tolerance for the wire feeding	Ti-6Al-4V titanium alloy	Laser power 2,06 kW wire feed rate 2 m/min traverse speed 100 200 300 400 mm/min diameter 1,2mm	
4	2010	E. Brandl B. Baufeld C. Leyens R. Gault	Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications	Laser beam Shaped metal deposition (SMD)	Nd:YAG laser beam arc beam (tungsten inert gas) SMD cell consists of a welding torch attached to a 6-axis Kuka robot linked to a 2-axis table	Ti-6Al-4V titanium alloy	<u>WF-I-Beam</u> laser power 2625 W wire feed rate 30mm/s wire feed speed factor 4 deposition or welding speed 7,5 mm/s diameter wire 1,2mm <u>WF-A-Beam</u> welding current I=176,8 A voltage U=12,4 V welding speed 5mm/s wire feed speed 33,3 mm/s wire feed speed factor 6,67	
5	2011	Bernd Baufeld*, Erhard Brandl, Omer van der Biesta	Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition	Nd:YAG laser beam ALM SMD	Ns:YAG rod laser (diode pumped) The laser beam ALM was paused between each layer until the temperature of the previous layer fell below 300 °C, while SMD was performed continuously. In the case of laser beam ALM the welding speed derives only from the movement from the laser beam, while in the case of SMD the welding speed is a combination of rotation and tilting of the table and the movement of the torch. Argon in order to prevent oxidation	Ti-6Al-4V titanium alloy	<u>ALM</u> Power 3,5 kW welding speed 10 mm/s wire feed speed 40 mm/s deposition rate 0,7 kg/h <u>SMD</u> Power 2,2 kW welding speed 5,0 mm/s wire feed speed 30 mm/s deposition rate 0,6 kg/h diameter 1,2	
6	2011	J. Ding, P. Colegrove b, J. Mehnen a, S. Ganguly b, P.M. Sequeira Almeida b, F. Wangb, S. Williams	Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts	CMT Cold Metal Transfer	welding power source, a modified GMAW variant based on controlled dip transfer transfer mode mechanism, which can provide a high deposition rate capability with relatively low heat input A waiting time of 400 s was used between subsequent layers enabling the sample to cool below 50 C before new layers were deposited A water cooled aluminium backing plate was utilised in order to cool the sample more rapidly	mild steel	heat input 269,5 J mm <sup>-1</sup> wire feed speed 10 m min <sup>-1</sup> travel speed 8,33 mm s <sup>-1</sup> diameter 1,2	
7	2013	T.E. Abioye, J. Folkes, A.T. Clare	A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition T.	laser cladding	Laser cladding involves the use of a high-precision heat source to create a melt pool by simultaneously melting the additive material and a thin layer of a substrate. The relative movement of the laser beam and the substrate forms a track. The track is most often referred to as a clad bead Laser cladding with lateral wire feeding system, compared with powder based feeding systems, offers better rewards such as increased material usage efficiency, improved surface quality of the deposit, lower cost of preparing the wire materials and higher	Inconel 625 nickel based superalloy	Power 1,0-1,8 kW wire feed rate 6,7-23,3 mm s <sup>-1</sup> traverse speed 1,7-8,5 mm s <sup>-1</sup> diameter 1,2 mm	

					material deposition rates. However, wire based systems are highly sensitive to changes in processing condition.		
8	2013	Wang Tao a,b,n, Zhibin Yang a, Yanbin Chen a, Liqun Li a, Zhenguo Jiang a, Yunlong Zhang	Double-sided fiber laser beam welding process of joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects	Double-sided fiber laser beam welding process	In the double-sided welding process, the weld seams between the lower skin panel and the upper stringer were obtained simultaneously from both sides of the stringer.	AA4047 alloy	laser power 1,8 kW welding speed 3,8 m/min wire feeding rate 2,7 m/min diameter 1,2
9	2013	FUDE WANG, STEWART WILLIAMS, PAUL COLEGROVE, and ALPHONS A. ANTONYSAMY	Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V	WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a novel manufacturing technique that can directly fabricate fully dense large 3-D near-net shape components from metal wire. In this process, wire is fed at a controlled rate into an electric arc and is melted onto a substrate or the previously deposited layer. WAAM has substrate or the previously deposited layer. WAAM has a much higher deposition rate (several kg/h) than most other metal additive manufacture processes. It also has a higher material usage efficiency (approaching 100 pct), no powder handling requirement, and a lower cost compared with the laser and powder-based technologies.	Ti-6Al-4V titanium alloy	average current 99 A travel speed 0,27 m/min wire feed speed 1,8 m/min average voltage 12 V
10	2014	Paul A. Colegrove <sup>1</sup> , a *, Filomeno Martina <sup>1</sup> , Matthew J. Roy <sup>2</sup> , Blanka A. Szost <sup>3</sup> , Sofiane Terzi <sup>3</sup> , Stewart W. Williams <sup>1</sup> , Philip J. Withers <sup>2</sup> , David Jarvis <sup>3</sup>	High pressure interpass rolling of Wire + Arc Additively Manufactured titanium components	WAAM (TIG)		titanium	average current 110 A travel speed 4,5 mm s <sup>-1</sup> wire feed speed 1,6 m min <sup>-1</sup>
11	2015	M.J. Bermingham, a, D. Kent, a, b H. Zhan, a D.H. StJohn and M.S. Dargusch	Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V with trace boron additions	GTAW	GTAW promising technology for high volume deposition (up to several kg/h) and parts produced by this method are reported to be an order of magnitude less expensive than parts produced by laser-based powder ALM processes Each deposit was created by moving the torch in a linear direction and feeding wire into the molten pool, which solidified to make a layer. A subsequent layer was then deposited over the first by increasing the height of the torch	Ti-6Al-4V titanium alloy with trace boron additions	Arc power 120 A wire feed 1,5 m/min deposition speed 150 mm/min diameter 1
12	2015	J. Dinga, *, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, M.R. Palt	Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture	WAAM (PAW)	The WAAM process utilizes an electric arc as a heat source and wire as feedstock. The arc-based welding process can be based on either metal inert gas (MIG) system, tungsten inert gas (TIG) systems, or plasma arc welding (PAW) system. The motion can be provided either by robotic systems or by computer numerical controlled (CNC) systems. Parts are manufactured by depositing layers of metal with the welding-based deposition process.	Ti-6Al-4V	wire feed speed 2,4 m/min travel speed 4,5 mm/s current 160 A diameter 1,2
13	2015	FILomeno MARTINA, PAUL A. COLEGROVE, STEWART W. WILLIAMS, and JONATHAN MEYER	Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components	TIG		Aerospace grade 5 Ti-6Al-4V	average current 110 A wire feed speed 1,6 m min <sup>-1</sup> travel speed 4,5 mm s <sup>-1</sup> pulse duration 0,05 s frequency 10 Hz
14	2016	Gunther Sproessera*, Andreas Pittnerb, Michael Rethmeierab	Increasing performance and energy efficiency of Gas Metal Arc Welding by a high power tandem process	Standard GMAW TIGMAW		G 4Si1	Standard GMAW wfr 12 14 m/min welding speed 6,7 7,5 mm/s average power 11,8 13 kW TGMAW wfr 27,5 35 m/min welding speed 11,7 13,3 mm/s average power 20,9 23,8 kW diameter 1,2 mm
15	2016	Giuseppe Venturinia*, Filippo Montevicchia, Antonio Scippaa, Gianni Campatellia	Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features	MIG		carbon steel AWS ER70S-6	current 50 A voltage 19 V wire feed speed 4,6 m/min welding speed 300 mm/min diameter 0,8 mm

16	2016	Pia Åkerfeldt n, Marta-LenaAntti,RobertPederson	Influence of microstructure on mechanical properties of laser metal wire-deposited Ti-6Al-4V	LMWD	The Lmwd process exhibits good material quality with low impurity levels and it also exhibits a relatively high deposition rate i.e. production speed as compared with powder	Ti-6Al-4V	power 2-3 kW deposition speed 10 mm/s diameter 1,14 mm	
17	2016	J. Donoghue a,*, A.A. Antonysamy a,1, F.Martina b, P.A. Colegrove b, S.W. Williams b, P.B. Prangnell	The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V	WAAM (GTAW)	In Wire-Arc Additive Manufacture (WAAM) a consumable wire is fed at a controlled rate into an adapted electric arc (or plasma) welding torch that is translated by a robot Material is built up in the form of a weld bead that is overlaid on previously deposited tracks	Ti-6Al-4V	travel speed 270 mm/min average arc voltage 12 V average current 110 A wire feed speed 1,6 m/min diameter 1,2 mm	
18	2016	Marcus A. Jackson1, Arik Van Asten1, Justin D. Morrow1, Sangkee Min1, Frank E. Pfefferkorn1*	A Comparison of Energy Consumption in Wire-Based and Powder-Based Additive-Subtractive Manufacturing	GMAW	These systems deposit a layer of molten wire across a prescribed geometric area using GMAW and the layer is then face milled. Upon completion of the appropriate layer depositions and face milling cycles, finishing machining is performed to attain the desired final dimensions.	L- 56 steel	wire feed speeds 2,9 4,1 5,6 7,6 8,6 m/min voltage settings 16 17 18 19 20 V diameter 0,89 mm	total 3,23E+07 J/Kg
19	2017	Gunther Sproesser1 · Ya-Ju Chang3 · Andreas Pittner2 · Matthias Finkbeiner3 · Michael Rethmeier1,2	Energy efficiency and environmental impacts of high power gas metal arc welding		SGMAW with a spray arc and a pulsed arc transfer TGMAW with alternating pulsed arcs, asynchronous pulsed arcs and the ED transfer	G 4S11	SGMAW wfr 10 12 14 m/min welding speed 6-8 mm/s TGMAW wfr welding speed 10-14 mm/s diameter 1,2 mm	
20	2017	Mariacira Liberinia, Antonello Astaritaa,*, Gianni Campatellib, Antonio Scippab, Filippo Montevectchib, Giuseppe Venturinib, Massimo Durantea, Luca Boccarussoa, Fabrizio Memola Capece Minutoloa, A. Squillacea	Selection of optimal process parameters for wire arc additive manufacturing	WAAM (MIG/MAG)	In WAAM, the building strategy consists in the deposition of a series of single weld beads, one on the other, alternating pauses of cooling with deposition steps	ER70S-6 steel	current 50 A voltage 11,7 V wire speed 1,68 m/min speed rate 300 mm/min	
21	2017	X. Lu1 & Y. F. Zhou1 & X. L. Xing2 & L. Y. Shao1 & Q. X. Yang2 & S. Y. Gao1	Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties	GMAW	gas metal arc welding	ER70S-6 steel	voltage 20 V current 132 A wire feed speed 7,3 m/min torch speed 600 mm/min diameter 0,8	
22	2017	Filippo Montevectchi*, Giuseppe Venturini, Niccolò Grossi, Antonio Scippa, Gianni Campatelli	Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing	GMAW		ER70S-6 steel	average welding voltage 19 V average welding current 81 A electrical power 1480 W wire feed speed 4,6 m/min travelling speed 30 mm/min diameter 0,8	
23	2017	Stella Holzbach Oliari1, Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira1, Martin Schulz2	Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition	LMWD	The building principle behind this process is to deposit the feedstock material tracks side-by-side and layer-upon-layer [9]. In LDM process, wire is fed into the melt-pool via lateral nozzle	hot work tool steel H11	laser power 945 900 845 travel speed 600 500 400 diameter 1,2	
24	2017	Bintao Wu, Donghong Ding, Zengxi Pan*, Dominic Cuiuri, Huijun Li, Jian Han, Zhenyu Fei	Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V	GTAW	Gas tungsten arc welding promising alternative for the fabrication of large metal components due to its high deposition rate and low cost	Ti6Al4V	deposition current 110 A arc voltage 12 V travel speed 95 mm/min wire feed speed 1000 mm/min diameter 1,2	
25	2017	X ZHANG1,2, F MARTINA1, J DING1, X WANG1,2 and SW WILLIAMS1	Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire +arc additive manufactured Ti-6Al-4V	WAAM (PAW)	process works by feeding a wire at controlled rate into an electric or plasma arc, to melt the wire onto a substrate or previously deposited layers. In this case tetrix plasma power source	Ti6Al4V grade 5 and 23	single pass, oscillation, parallel current 145 150 160 A wfs 2 2,3 2,2 ts 4,5 4,75 4,5 voltage 19,9 20,1 20,7 diameter 1,2	
26	2018	Xingwang Bai a, fl, Paul Colegrove b, Jialuo Ding b, Xiangman Zhou c, Chenglei Diao b, Philippe Bridgeman b, Jan roman Hönnige b, Haiou Zhang d, Stewart Williams	Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing	PAW	Plasma arc welding The higher energy density of PAW leads to a higher deposition rate and lower surface roughness		welding current 180 A arc voltage 23 V deposition welding speed 300 mm/min wire feeding rate 2,2 m/min diameter 1,2	
27	2018	Fabrizia Caiazzo	Additive manufacturing by means of laser-aided directed metal deposition of titanium wire	DMD	laser beam is used as heat source to scan the surface, thus creating a melting pool over an existing substrate. Since metal impinging, the pool is fed concurrently (i.e., in single-stage processing) [8], a deposited metal trace results, with metallurgical bonding to the substrate thanks to fusion and diffusion.	Ti-6Al-4V	power 1250 1500 travelling speed 600 750 mm/min wire speed factor 1,0 1,5 2,0 2,5 diameter 1 mm	
28	2018	Ali Gökhan Demir	Single track deposition study of biodegradable Mg-rare earth alloy by micro laser metal wire deposition	$\mu$ LMWD		biodegradable Mg alloy	wire feed rate 128 mm/min transverse speed 50 60 70 m/min diameter 0,5 mm	

							max average power 10 W
29	2018	Ali Gökhan Demir	Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures	μLMWD	Micro laser metal wire deposition The results show that the μLMWD process yields geometrical resolution close to powder-bed additive manufacturing processes, while maintaining the benefits of using wire feedstock.	AISI 301 stainless steel	wire feed rate 230mm/min pulse energy 9 9,6 10,5 11,4 12 J transverse speed 90 108 135 162 180 mm/min diameter 0,5
30	2018	Guocai Ma <sup>1</sup> · Gang Zhao <sup>1,2</sup> · Zhihao Li <sup>1</sup> · Min Yang <sup>1</sup> · Wenlei Xiao	Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures	GMAW (CMT)	RASM: Robotic additive manufacturing and subtractive manufacturing. In GMAW-based WAAM, the electric arc is not stable in the arc igniting and arc extinguishing process, leading to the irregular appearance of the deposited bead.	ER4043 aluminum alloy	current 140A wfr 7 m/min travel speed 0, m/min diameter 1,2 mm
31	2018	M. Froenda, <sup>*</sup> , V. Ventzkea, S. Riekehr, N. Kashaeva, B. Klusemanna, b, J. Enza	Microstructure and microhardness of wire-based laser metal deposited AA5087 using an Ytterbium fibre laser	LMWD	This technique opens up a larger range of commercially available alloys that are already disposable as wire. Additionally, a significantly increaseable deposition rate to some kg/h, material usability, and easy handling of the consumable rate to some kg/h, material usability, and easy handling of the consumable material compared to SLM can be realized.	AlMg4,5MnZr (En AW-5087) in H19 condition	power 4500 wfr 10 m/min specific energy 13,2 kJ/g diameter 1,6 deposition velocity 5 m/min
32	2018	M. Froenda,b, <sup>*</sup> , S. Riekehr, N. Kashaevb, B. Klusemanna, b, J. Enzb	Process development for wire-based laser metal deposition of 5087 aluminium alloy by using fibre laser	LMWD		AlMg4,5MnZr (En AW-5087)	power 3500 400 4500 deposition velocity 1 wire velocity 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 m/min diameter 1
33	2018	A. Horgara, H. Fostervollb, B. Nyhusb, X. Renb, M. Erikssonb, O.M. Akselsena,	Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire	GMAW		AA5183 aluminium alloy	current range 230-240 120-130 arc voltage 32-33 28-30 wfr 15 10 m/min travel speed 12 22 mm/s diameter 1,2
34	2018	Anthony R. McAndrewa, Marta Alvarez Rosalesa, Paul A. Colegrovea, <sup>*</sup> , Jan R. Hönnigea, Alistair Hob, Romain Fayollea, Kamal Eytayoa, Ioan Stana, Punyaweek Sukrongpanga, Antoine Crochemorea, Zsolt Pintera	Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+arc additively manufactured features for microstructural refinement	PAW		Ti-6Al-4V	wfs 2,2 2,4 m/min travel speed 200 200 mm/min current 200 190 A diameter 1,14 mm
35	2018	Filippo Montevecchi <sup>*</sup> , Giuseppe Venturini, Niccolò Grossi, Antonio Scippa, Gianni Campatelli	Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element based technique	GMAW		ER70S-6 steel	current 80 A voltage 18 V heat input 1440 W deposition speed 300 mm/min wire feed speed 4,6 m/min diameter 0,8
36	2018	Maurizio Motta, Ali Gökhan Demir <sup>*</sup> , Barbara Previtali	High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition	LMWD		AISI 308	<u>layer adherence tests</u> power 1000 W traverse speed 1 m/min wire feed rate 1,2 m/min <u>single track feasibility test</u> traverse speed 0,8 0,9 1 1,1 power 800 900 1000 1100 <u>multi layer experiments</u> traverse speed 1 m/min wfr 1,2 m/min power 1000 diameter 1 mm
37	2018	W. Oua, b, T. Mukherjee a, G.L. Knapp a, Y. Wei b, T. DebRoy	Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing	MIG/MAG		H13 tool steel	current range 30-350A voltage range 12-31,2 V speed 5-11,7 mm/s wfr 63-143 mm/s diameter 1,2 mm
38	2018	Sergio Ríosa, b, <sup>*</sup> , Paul A. Colegrovea, Filomeno Martinaa, Stewart W. Williamsa	Analytical process model for wire+arc additive manufacturing	TIG PAW		Ti-6Al-4V	<u>TIG experiment</u> average current min:120 max:220 travel speed min:2 max:6 mm s <sup>-1</sup> wfs min:1.2 max:4 m min <sup>-1</sup> arc voltage 12 V <u>PAW experiment</u> current min:100 max:229 travel speed 5 mm s <sup>-1</sup> wfs 50 mm s <sup>-1</sup>

39	2018	N. Rodriguez1 & L. Vázquez1 & I. Huarte1 & E. Arruti1 & I. Taberero2 & P. Alvarez1	Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel	CMT TopTIG	CMT technology is an improvement of short-circuit GMAW process which is based on controlled dip transference. CMT is characterized by alternating wire forward and retraction movement at high frequency. In the TopTIG process, the filler metal wire passes through the nozzle keeping a fixed angle with the electrode. In this way, the wire is constantly fed to the hottest zone of the arc independently of the welding direction and leading to higher deposition rates	316L stainless steel	<u>CMT feasibility</u> current 150 200 220 220 A wfs 8,9,4,10,10 m/min voltage 14,2,23,3,26,8,26,2 V travel speed 0,6,0,6,1,0,0,8 m/min diameter 1,0 mm <u>TopTIG feasibility</u> current pulsed:350/187 continuous 3:220 A wfs pulsed:5,5/2,9 continuous 3:5 m/min voltage pulsed:15,5 continuous 3:15,5 V travel speed pulsed:0,8 continuous 3:15,5 m/min diameter 1,0
40	2018	Rujian Sun a, Liuhe Li a, Ying Zhu a, Wei Guo a, *, Peng Peng a, Baoqiang Cong a, Jianfei Sun a, Zhigang Cheng b, Bo Li c, Chao Guo c, Lei Liu c	Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening	WAAM (TIG) LSP	Laser shock peening (LSP) is an innovative surface treatment technique, which applies a pulse laser with high power density (in GW/cm <sup>2</sup> range) and ultra-short duration (usually nanoseconds) onto the surface of metallic components to induce large depth and high value compressive residual stress. Grain refinement can be achieved after multiple LSP treatments. Enhancements in fatigue strength, tensile strength, wear resistance and corrosion resistance have been intensively reported.	2319 aluminium alloy	wfs 1,5 m/min diameter 1,2 mm travel speed 0,3 m/min pulse energy 15 J
41	2018	Mahesh Teli, Fritz Klocke i, kristian Arntz, Kai Winands, Martin Schulz, Stella Oliari	Study for combined wire + power laser metal deposition of H11 and Niobium	WP-LMD	Wire and powder based laser metal deposition.	H11 steel niobium powder	<u>With Nb powder</u> laser power 700 900 780 850 W wfr 500 800 600 700 mm/min laser feed rate 400 900 700 800 mm/min diameter 1,2 mm <u>without Nb powder</u> laser power 900 900 W wfr 800 500 mm/min laser feed rate 900 400 mm/min diameter 1,2 mm
42	2018	Jun Wang, Zengxi Pan*, Yan Ma, Yao Lu, Chen Shen, Dominic Cuiuri, Huijun Li	Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: Microstructure, mechanical properties and oxidation behaviour	GTAW	WAAM is able to deposit consistent material with the desired chemical composition because of the negligible generation of spatter and the formation of a quiescent melt pool during this process	pure titanium and 1080 pure aluminium Ti-Al alloy	current 120 A travel speed 100 mm/min wfs of Ti 1050 1000 950 900 850 800 650 wfs of Al 316 401 490 584 682 788 783 diameter of titanium wire 1,00 diameter of aluminium wire 0,9
43	2018	Tingting Wang a, Yuanbin Zhang a, *, Zhihong Wu b, Chuanwei Shi	Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire	WAAM (MIG)		H13	current 140±5 A arc voltage 25 V welding speed 4 mm/s
44	2018	Bintao Wua, Zengxi Pana, Donghong Dingb,*, Dominic Cuiuria, Huijun Lia	Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing	GT-WAAM	GTAW and PAW use a non-consumable tungsten electrode, while GMAW use the deposition wire as electrode to generate arc. Different from GMAW-based WAAM, the orientation of wire feed in GTAW-based and PAW-based WAAM can be varied and it will affect the quality of the deposition, which makes the process planning more complicated. The deposition rate of GMAW-based WAAM is 2 to 3 times higher than that of GTAW-based or PAW-based methods. However, the GMAW-based WAAM is less stable and generates more weld fume and spatter due to the electric current acting directly on the feedstock	ASTM B863 grade 5 Ti6Al4V alloy	current 110 A arc voltage 12 V travel speed 95 mm/min wfs 1000 mm/min diameter 1,2 mm
45	2018	Xiangfang Xu*1, Supriyo Ganguly1, Jialuo Ding1, Cui Er Seow2, 3, Stewart Williams1	Enhancing mechanical properties of wire + arc additively manufactured INCONEL 718 superalloy through in-process thermomechanical processing	PAW plasma arc based WAAM process		Inconel 718	current 180 A wfs 4 m/min travel speed 7,5 m/min diameter 1,2 mm
46	2018	Chen Zhanga, Yufei Lib, Ming Gaob,*, Xiaoyan Zengb	Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source	VP-CMT	Variable polarity cold metal transfer the key factors are the low heat input, a fine equiaxed grain structure and effective oxide cleaning of the filler wire.	Al-6Mg alloy	<u>CMT</u> arc current 127 A arc voltage 15,3 V wfs 6 m min-1 <u>CMT-P</u> arc current 159 A arc voltage 19,3 V wfs 9 m min-1 <u>VP-CMT</u> arc current 140-103 A arc voltage 15-11,7

							wfs 7 m min <sup>-1</sup> diameter 1,2 mm	
47	2019	A.E. Davisa,*, C.I. Brehenya, J. Fellowesb, U. Nwankpac, F. Martinac, J. Dingc, T. Machryd,P.B. Prangnella	Mechanical performance and microstructural characterisation of titanium alloy-alloy composites built by wire-arc additive manufacture	WAAM (PAW)		dual alloy titanium: Ti64 and CPTi	current 180 A wfs 2 m min <sup>-1</sup> travel speed 4-4,8 mm s <sup>-1</sup> diameter 1,2 mm	
48	2019	Malcolm Dinovitzer, Xiaohu Chen, Jeremy Laliberte*, Xiao Huang, Hanspeter Frei	Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure	WAAM (TIG)	The Taguchi method and ANOVA were used to determine the effects of travel speed, wire feed rate, current, and argon flow rate on the responses including bead shape and size, bead roughness, oxidation levels, melt through depth, and the the responses including bead shape and size, bead roughness, oxidation levels, melt through depth, and the microstructure.	Hastelloy X alloy	power 80W voltage 24 V wfs 200 230 260 290 mm/min travel speed 84 96 108 120 mm/min current 50 53 56 59 A	
49	2019	Junbiao Shi a, b, Fang Li a, b, Shujun Chen a, b, *, Yun Zhao	T-GMAW based novel Multi-node trajectory planning for fabricating grid stiffened panels: An efficient production technology	T-GMAW	Two programmable GMAW power sources were used to control the welding process and the pulse transfer mode was applied by two power supplies.	ER2325 aluminium alloy	current 101A voltage 20 V diameter 1,2 mm wfs: different experiments	
50	2019	Paul Dryburgha,b,*, Don Pierisa,b, Filomeno Martinac, Rikesh Patela, Steve Sharplesa, Wenqi Lia,Adam T. Clareb, Stewart Williamsc, Richard J. Smitha	Spatially resolved acoustic spectroscopy for integrity assessment in wire-arc additive manufacturing	WAAM (GTAW)		Ti-6Al-4V	average arc voltage 12 V average current 110 A travel speed 270 mm min <sup>-1</sup> wire feed speed 1,6 m min <sup>-1</sup> diameter 1,2 mm	
51	2019	Alistair Ho a, Hao Zhao a, Jon W. Fellowes b, Filomeno Martina c, Alec E. Davis a,Philip B. Prangnell a, *	On the origin of microstructural banding in Ti-6Al4V wire-arc based high deposition rate additive manufacturing	WAAM (TIG)		Ti6Al4V	wfs 1,9 m min <sup>-1</sup> tavel speed 4,5 mm s <sup>-1</sup> 1 average current 110 A pulse duration 0,5 s frequency 10 Hz diameter 1,2 mm	
52	2019	G. Marinelli*, F. Martina, S. Ganguly, S. Williams	Development of Wire + Arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components	TIG	front wire feeding eliminated the occurrence of pores and micro-cracks, when compared to side wire feeding. The wire was smoothly melted and transferred at a controlled rate to the weld pool by keeping a constant liquid bridge transfer, without interfering with the lateral streams of high-velocity plasma gasses.	unalloyed tungsten	current 400 A travel speed 2 mm/s wfs 35 mm/s diameter 1,0 mm	
53	2019	Gianrocco Marinelli, Filomeno Martina, Heather Lewtas, David Hancock,	Functionally graded structures of refractory metals by wire arc additive manufacturing	TIG		refractory metals: molybdenum and tungsten	<u>Molybdenum</u> current 300 A wfs 20 mm s <sup>-1</sup> travel speed 4 mm s <sup>-1</sup> diameter 1,0 mm <u>Tungsten</u> current 300 A wfs 15-20 mm s <sup>-1</sup> travel speed 3-4 mm s <sup>-1</sup> diameter 1,0 mm	
54	2019	G. Marinelli*, a, F. Martinaa, S. Gangulya, S. Williamsa	Grain refinement in unalloyed tantalum structure deposited using Wire + Arc Additive Manufacture and vertical cold rolling	WAAM (TIG)		unalloyed tantalum	current 300 A wfs 40 mm/s travel speed 4 mm/s diameter 1,2 mm	
55	2019	G. Marinelli a, *, F. Martina a, H. Lewtas b, D. Hancock b, S. Mehraban c, N. Lavery c,S. Ganguly a, S. Williams a	Microstructure and thermal properties of unalloyed tungsten deposited by Wire þ Arc Additive Manufacture	WAAM (TIG)	The wire was fed from the front of the weld pool [25], and the direction of deposition was always the same	unalloyed tungsten	current 400 A wfs 35 mm/s travel speed 2 mm/s diameter 1	
56	2019	Tiago A. Rodriguesa,*, V. Duartea, Julian A. Avilab, Telmo G. Santosa, R.M. Mirandaa,J.P. Oliveiraa	Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties	WAAM (MIG)	customized welding torch PRO MIG 3200	High strenght low alloy (HLSA) AWS A5,28 ER110S-G	voltage 21 V current 95 A wfs 3 m/min travel speed 3,9 9 mm/s heat input 511 221 J/mm diameter 1,0 mm	
57	2019	A. N. M. Tanvir1 & Md. R. U. Ahsan1 & Changwook Ji2 & Wayne Hawkins3 & Brian Bates3 & Duck Bong Kim4	Heat treatment effects on Inconel 625 components fabricated by wire + arc additive manufacturing (WAAM)—part 1:microstructural characterization	CMT	The CMT process is used due to its characteristics of saving most energy possible by modifying the droplet transfer process to the weld pool. In this process, the wire feeds in a back-and-forth motion.The power supply is interrupted after the short circuit occurs, and the wire is retracted at the same time. This promotes droplet transfer without the help of electromagnetic force. The arc reinitiates after completion of droplet transfer	Inconel 625	voltage 12,5 V current 130 A moving speed 80 cm/min wfr 6,5 m/min diameter 1,2 mm	

58	2019	Angela Topić1, Ivica Garašić2, Ivan Jurić2, Nikola Knezović1	Investigation of properties of waam produced duplex stainless steel part	WAAM (MIG)	MIG is the welding method which is mostly used in WAAM technology. The wire is coaxial with the welding torch, and it results in an easily generated tool path	duplex stainless steel 2205 1,4462	current 140 125 125 130 A voltage 17 V welding speed 25 22 25 25 cm/min arc energy diameter 1,2 mm
59	2019	F Xu*, L Chen, E G He and L Y Guo	Laser welding 6A02 aluminum alloy with filler wire under high welding speed	laser welding with filler wire	the fiber laser has better beam quality, higher output power and smaller focusing spot	ER4043 aluminum alloy	power 2 kW wfs 2-4 m/min diameter 1 mm
60	2019	Leilei Wang*,*, Jiayang Xuea, Qiang Wangb	Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel	WAAM SpeedPulse SpeedArc	The SpeedPulse mode involves a modified I-I-I-controlled, nonshort-circuiting pulse welding process that operates at a constant frequency and combines the characteristics of a classic pulse arc with those of a classic spray arc to achieve high process reliability. The primary metal transfer mode during SpeedPulse WAAM is a projected spray transfer mode. SpeedArc WAAM is distinguished from the conventional GMAW process by a short and particularly forceful arc in the spray arc range and therefore features exceptional directional stability and high energy density.	316L stainless steel	<u>SpeedPulse WAAM</u> mean current 22,1 A mean voltage 135 V arc power 2984 W scanning speed 10 mm s <sup>-1</sup> wfr 4,5 m min <sup>-1</sup> <u>SpeedArc WAAM</u> mean current 19,5 A mean voltage 140 V arc power 2730 W scanning speed 10 mm s <sup>-1</sup> wfr 4,5 m min <sup>-1</sup> diameter 1,2 mm
61	2020	Thomas bergs, Sebastian Kammann, Gabriel Fraga, Jan Riepe, Kristian Arntz	Experimental investigations on the influence of temperature for Laser Metal Deposition with lateral Inconel 718 wire feeding	LMWD	LMD-W-20-L the wire is fed laterally at 20° relative to the beam central	Inconel 718	laser power 1200 W travel speed 900 mm/min wire speed 990 mm/min diameter 1,2 mm
62	2020	V. Dhinakaran, J. Ajith a, A. Fathima Yasin Fahmidha a, T. Jagadeesha b, T. Sathish c, B. Stalin		WAAM		ATI 718 nickel base superalloy	current 100 A travel speed 0,1 m/min wfs 0,4 m/min
63	2020	Laibo Sun 1, Fengchun Jiang 1, Ruisheng Huang 2, Ding Yuan 1, Chunhuan Guo 1, * and Jiandong Wang 1	Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon High-Strength Steel Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing	WAAM (CMT)	As a modified GMAW process, cold metal transfer (CMT) has some advantages, such as low energy input, high deposition rate, no spattering, and extremely stable arc, therefore this AM technique has become a popular as well as widely used technique. The excellent characteristics of CMT make it to be an ideal process for fabricating a large-scale part, which can overcome common troubles encountered during conventional welding process	A-Fe-W-86	current 14,7 A voltage 152 V wfs 4,5 m/min travel speed 0,25 m/min diameter 1,2 mm
64	2020	Nitish P. Gokhale , Prateek Kala	Thermal analysis of TIG-WAAM based metal deposition process using finite element method	TIG	It is a FEM simulation. The TIG-WAAM process has good dimensional accuracy and ability to produce spatter free metallic structures with better surface finish	low carbon steel	power 800 W torch movement velocity 6 cm/min
65	2020	Chuanbao Jia1, 2*, Wenqiang Liu1, Maoai Chen1, Meng Guo1, Shikai Wu2, Chuansong Wu1	Investigation on Arc Plasma, Droplet, and Molten Pool Behaviours in Compulsively Constricted WAAM	CC-WAAM (Compulsively constricted) (GMAW)	The arc is ignited between a wire and a tungsten electrode. Inside the confined narrow space, the droplets detach from the wire end under complex forces with an initial momentum. Because the nozzle outlet has a much smaller diameter than that of the torch inner space, the gas flow and plasma jet are compulsively constricted and then accelerated when passing through the nozzle	ER70S-G	current 180 200 220 240 260 voltage 18,4 19,4 20,4 21,4 22,4 deposition speeds 15 25 35 45 55 65 cm/min diameter 1,2 mm
66	2020	Vittoria Laghi1 & Michele Palermo1 & Lavinia Tonelli2 & Giada Gasparini1 & Lorella Ceschini1 & Tomaso Trombetti1	Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire- and-arc additive manufacturing	WAAM		ER308LSi stainless steel	current 100-140 A arc voltage 18-21 V welding speed 15-30 mm/s wfr 4-8 m/min diameter 1 mm
67	2020	Yongzhe Lia,b, Xinlei Lia, Guangjun Zhanga,*, Imre Horváthb, Qinglin Hana	Interlayer closed-loop control of forming geometries for wire and arc additive manufacturing based on fuzzy-logic inference	GMAW		copper coated H08Mn2Si	voltage 2 V deposition speed 6 mm/s wfr 3,73 m/min diameter 1,2 mm
68	2020	A. Manoj a, M.A. Rao b, M.M. Basha c, S.M. Basha c, M.R. Sankar	State of art on wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy	WFAM		Ti-6Al-4V	<u>process parameters reported by different researchers for Ti-6Al-4V alloy</u>
69	2020	W. Ou1, Y. Wei1, R. Liu*, W. Zhao, J. Cai	Determination of the control points for circle and triangle route in wire arc additive manufacturing (WAAM)	WAAM (MIG/MAG)		H13	current 100-200 A voltage 18-22 V travel speed 5-12 mm/s wfr 30-65 mm/s
70	2020	Rui Sun, Yongjun Shi *, Xiaogang Wang, Yankuo Guo, Xiaoyu Zhou	Understanding the thermal process during laser assisted ultra-high frequency induction deposition with wire feeding	UHF	Lase assisted ultra high frequency induction deposition. In this method, the UHF induction heat is used as the main heat source to melt the deposited metal, and the laser heat acts as an auxiliary heat source that provides a high-temperature substrate surface for efficient fusion between the deposited metal and substrate.	Inconel 625 alloy	current 30 A power 800 W wfr 410 mm/min travel speed 2,4 mm/s

71	2020	Lei Yuana, Zengxi Pana*, Donghong Dingb, Ziping Yua, Stephen van Duina, Huijun Lia, Weihua Lia, John Norrisha	Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing	Multi-directional GMAW (CMT)	Two different metal transfer modes are investigated: During <u>Free Flight modes</u> , the droplet trajectory from the wire tip to the weld pool is important. In positional free flight transfer, the gravitational force may be sufficient to exceed the axial forces which would normally project the droplet across the arc resulting in displacement of the material from the target position. In <u>short arc transfer</u> , a droplet forms on the wire tip during the arcing phase, but material transfers when the wire tip contacts the base metal. Droplets transfer to the weld pool is influenced by the gravitational force less.	carbon steel ER70S-6	different tests	
72	2020	Zhe Zhang a , Fanrong Kong b , Radovan Kovacevic	Laser hot-wire cladding of Co-Cr-W metal cored wire	LHWC (Laser hot-wire cladding)	It is hybrid deposition process where the wire is preheated by resistant heat during the deposition process. This process can dramatically increase the deposition efficiency and the material utilization rate	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	current 130-150 A laser power 4 kW scanning speed 6-8-10 mm/s wfr 45-55-65 mm/s diameter 1,2 mm	
73	2020	Wenhao Huang, Shujun Chen, Jun Xiao *, Xiaoping Jiang, Yazhou Jia	Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy	LWMAM		Al alloy ER5A06	laser power 2,6 2,8 3,0 3,2 kW traverse speeds 1 1,5 2 2,5 m/min wfs 2 3 4 5 m/min diameter 1,2 mm	
74	2020	Chong Wang*, Wojciech Suder, Jialuo Ding, Stewart Williams	The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V	PTA (PAW)	In PTA-based WAAM, the plasma arc is constricted by a watercooled copper nozzle, which means the nozzle size affects the arc pressure and consequently keyhole formation.	Ti-6Al-4V	diameter 1,2 1,6 2,0 2,4 mm current 200 250 300 A Current 200: wfs (dm 1.2) 4,9 (dm 1,6) 3 (dm 2) 2 (dm 2,4) 1,5 Current 250: wfs (dm 1,2) 7,5 (dm 1,6) 4,5 (dm 2) 3 (dm 2,4) 2,4 Current 300: wfs (dm 1,2) 9,5 (dm 1,6) 6 (dm 2) 4 (dm 2,4) 3 torch travel speed 4,5 mm/s	
75	2020	Gianni Campatella, Davide Campanellab, Antonio Barcellonab, Livan Fratinib, Niccolò Grossia, Giuseppe Ingarao	Microstructural, mechanical and energy demand characterization of alternative WAAM techniques for Al-alloy parts production	CMT CMT Mix Drive	The two processes couple the pulsing of current and voltage, adopted by other deposition technique, with the oscillating movement of the feed wire that is actuated by a small electrical motor located in the torch. The main difference between the two processes is that CMT mix drive switches between pulsed and CMT, whereas the CMT process is initiated by wire movement reversal.	AWS A5,10 ER4043	CMT current 32 A voltage 11,1 V wfs 1,8 m/min torch speed 300 mm/min CMT Mix Drive current 133 A voltage 18,5 V wfs 6 m/min torch speed 300 mm/min diameter 1,2 mm	CMT 3,58 CMT mixDrive 8,78 MJ/kg
76	2020	Gianni Campatelli 1, Filippo Montevecchi 1, Giuseppe Venturini 1, Giuseppe Ingarao 2, and Paolo C. Priarone 3,#	Integrated WAAM-Subtractive versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: an Energy Efficiency Comparison	WAAM		EN S235JR structural steel	current 80 A voltage 18 V welding speed 200 mm/min wire speed 4,6 m/min diameter 0,8 mm	Energy consumption:6,64 MJ (including energy during non productive times)
77	2020	Adrien Da Silva, Sicong Wang, Joerg Volpp, Alexander F.H.Kaplan	Vertical laser metal wire deposition of Al-Si alloys	vertical LMWD	The chosen setup for LMWD enables energy input only into the wire and not on the base material for potential reduction of energy need compared to conventional processes. Thus, the wire was fed vertically and the laser beam was inclined 50° from the vertical axis in front of the wire.	AlSi5 AlSi10Mg AlSi12	power 3500-7000 W wfs 66,7 mm/s scanning speed 10 mm/s diameter 1,6 mm	AlSi5 13,8 AlSi10Mg 9,7 AlSi12 13,8 KJ/g (also reference from other processes)
78	2020	Philipp Henckell *, Maximilian Gierth, Yarop Ali, Jan Reimann and Jean Pierre Bergmann	Reduction of Energy Input in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with Gas Metal Arc Welding (GMAW)	GMAW	Short arc welding regime. In GMAW, a determining factor for the energy input, the process stability and the formation of the arc is the free wire length l <sub>FW</sub> , respectively electrical stickout, which is defined as the distance between the contacting point of the fed wire with the contact tip and the attaching point of the arc on the wire	low-alloyed steel G4Si1/SG3	current 100 200 300 A voltage 20 V wfs 3,5 5 m/min welding speed 0,2 0,4 m/min diameter 1,0 mm	
79	2020	Paolo C. Priaronea, Emanuele Pagoneb, Filomeno Martinac, Angioletta R. Catalanoa, Luca Settineri	Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing	PAW CMT		Ti-6Al-4V titanium ER70s-6 steel AA2319 aluminium		aluminium: 6,3 MJ/kg steel 23,7 MJ/kg titanium 33,4 MJ/kg
80	2020	P. D. C. Assunção R. A. Ribeiro2 & P. M. G. P. Moreira3 & E. M. Braga1 & A. P. Gerlich2	A preliminary study on the double cold wire gas metal arc welding process	DCW-GMAW	double cold wire gas metal arc welding offer higher deposition rates via feeding two cold wires into the weld pool to improve productivity.		voltage 28 V wfs 310 in/min travel speed 25 in/min	

81	2020	Sudeep Kumar Singh, Binesh Kumar Samal, Soumya Ranjan Pradhan, Soumya Ranjan Ojha, M. D. Saffin, and A. M. Mohanty	Sustainable Analysis of TIG Parameters for Welding Aluminum Alloy Considering Joint Gap and Welding Current	TIG	TIG welding is one of the prominent arc welding processes, which produces homogenization of metal by the production of heat using a non-consumable tungsten electrode in an inert atmosphere.	ER5356	current 80 90 100 A voltage 18-22 V welding speed 50-60 mm/min diameter 1,6 mm	
82	2020	Zidong Lin <sup>1,2</sup> & Wei Ya <sup>1,3</sup> & Vignesh Venkata Subramanian <sup>1</sup> & Constantinos Goulas <sup>1,2</sup> & Benedetto di Castri <sup>1</sup> & Marcel J. M. Hermans <sup>2</sup> & Belavendram Pathiraj	Deposition of Stellite 6 alloy on steel substrates using wire and arc additive manufacturing	MAG		cobalt based superalloy Stellite 6	current 180 A wfs 0,5-5 m min <sup>-1</sup> deposition speed 1 1,5 m min <sup>-1</sup> diameter 1,2 mm	
83	2020	Shichun Li <sup>1,*</sup> , Wei Xu <sup>1</sup> , Gang Xiao <sup>1,2,3,*</sup> , Zhenhong Zhou <sup>1</sup> , Fei Su <sup>1</sup> and Jianghua Feng <sup>3</sup>	Effects of Sc on laser hot-wire welding performance of 7075 aluminum alloy	Laser hot wire welding	Laser hot-wire welding is a multi-heat source welding method, combining a laser heat source with a current heating welding wire	7075 aluminium alloy	power 1400 W welding speed 8 mm s <sup>-1</sup> feeding rate 0,6 m min diameter 1,2mm	
84	2020	Zhenwen Yang, Qi Liu, Ying Wang, Zongqing Ma & Yongchang Liu	Fabrication of multi-element alloys by twin wire arc additive manufacturing combined with in-situ alloying	T-WAAM	By T-WAAM, Ti-6Al alloy could be deposited by simply adjusting the relative feeding speed of Ti and Al metal wires; the alloyed element of Nb was added simultaneously into the molten pool of Ti-6Al in the form of foil.	Ti Al	current 120 A welding speed 2 mm/s wfs Ti=170 Al=18 cm/min Ti=156 Al=18 cm/min diameter 1,2 mm	
85	2021	Thomas Feldhausen*, Narendran Raghavan, Kyle Saleeby, Lonnie Love, Thomas Kurfess	Mechanical properties and microstructure of 316L stainless steel produced by hybrid manufacturing	Laser hot wire	Hybrid manufacturing is a combination of additive (deposition) and subtractive (machining) manufacturing in a single machine tool. Such a system can be used for near net shape manufacturing and component repair using either similar or dissimilar materials	316L stainless steel	laser power 2750 W wfs 4445 mm/min surface feed 1067 mm/min diameter 1,4 mm	
86	2021	Shengbin Zhao <sup>a</sup> , Lijun Yang <sup>a,b,*</sup> , Yiming Huang <sup>a,**</sup> , Sai Xu	A novel method to fabricate Ni/WC composite coatings by laser wire deposition: Processing characteristics, microstructural evolution and mechanical properties under different wire transfer modes	LMWD	The insertion of tungsten carbides via the tubular cored wire counteracts a thermal exposure to the laser beam and contributes to a reduced degradation of ceramic particles. When the tubular cored wire is employed and inserted into the molten pool, the wire tubular sheath and molten pool can counteract the direct laser irradiation, the excessive dissolution of the added particles can be effectively avoided.	Ni/WC composite	power 1400 scanning speed 1 mm/s wfs 2-4-6 mm/s diameter 1,6 mm	

## A.2 Dati origine Laser

### Laser - Alluminio

Tabella 10 Laser - Alluminio

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia di laser	Tipo di laser	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
83	Li et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser hot wire welding	Aluminium	7075 aluminium alloy	1400,00	10,00	8,00	1,20	<b>11,31</b>	<b>44,05</b>	123,79
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	16,67	16,67	1,00	13,09	100,71	267,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	16,67	33,33	1,00	13,09	100,71	267,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	16,67	50,00	1,00	13,09	100,71	267,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	16,67	66,67	1,00	13,09	100,71	267,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	16,67	83,33	1,00	13,09	100,71	267,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	16,67	16,67	1,00	13,09	115,10	305,58
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	16,67	33,33	1,00	13,09	115,10	305,58
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	16,67	50,00	1,00	13,09	115,10	305,58
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	16,67	66,67	1,00	13,09	115,10	305,58
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	16,67	83,33	1,00	13,09	115,10	305,58
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	16,67	16,67	1,00	13,09	129,48	343,77
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	16,67	33,33	1,00	13,09	129,48	343,77
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	16,67	50,00	1,00	13,09	129,48	343,77
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	16,67	66,67	1,00	13,09	129,48	343,77
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	16,67	83,33	1,00	13,09	129,48	343,77
59	Xu et al. (2019)	Laser	Fibre	Fiber laser	Aluminium	ER4043 aluminum alloy	2000,00	33,33	100,00	1,00	26,18	28,45	76,39
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	33,33	16,67	1,00	26,18	50,35	133,69
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	33,33	33,33	1,00	26,18	50,35	133,69
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	33,33	50,00	1,00	26,18	50,35	133,69
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	33,33	66,67	1,00	26,18	50,35	133,69
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	33,33	83,33	1,00	26,18	50,35	133,69
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	33,33	16,67	1,00	26,18	57,55	152,79
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	33,33	33,33	1,00	26,18	57,55	152,79

32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	33,33	50,00	1,00	26,18	57,55	152,79
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	33,33	66,67	1,00	26,18	57,55	152,79
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	33,33	83,33	1,00	26,18	57,55	152,79
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	33,33	16,67	1,00	26,18	64,74	171,89
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	33,33	33,33	1,00	26,18	64,74	171,89
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	33,33	50,00	1,00	26,18	64,74	171,89
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	33,33	66,67	1,00	26,18	64,74	171,89
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	33,33	83,33	1,00	26,18	64,74	171,89
73	Huang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LWMAM	Aluminium	ER 5A06 aluminium alloy	2600,00	33,33	16,67	1,20	37,70	25,98	68,97
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	50,00	16,67	1,00	39,27	33,57	89,13
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	50,00	33,33	1,00	39,27	33,57	89,13
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	50,00	50,00	1,00	39,27	33,57	89,13
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	50,00	66,67	1,00	39,27	33,57	89,13
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	50,00	83,33	1,00	39,27	33,57	89,13
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	50,00	16,67	1,00	39,27	38,37	101,86
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	50,00	33,33	1,00	39,27	38,37	101,86
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	50,00	50,00	1,00	39,27	38,37	101,86
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	50,00	66,67	1,00	39,27	38,37	101,86
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	50,00	83,33	1,00	39,27	38,37	101,86
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	50,00	83,33	1,00	39,27	43,16	114,59
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	50,00	16,67	1,00	39,27	43,16	114,59
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	50,00	33,33	1,00	39,27	43,16	114,59
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	50,00	50,00	1,00	39,27	43,16	114,59
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	50,00	66,67	1,00	39,27	43,16	114,59
8	Tao et al. (2013)	Laser	Fibre	double-sided fiber laser	Aluminium	AA4047 alloy	1800,00	45,00	63,33	1,20	50,89	13,60	35,37
59	Xu et al. (2019)	Laser	Fibre	Fiber laser	Aluminium	ER4043 aluminum alloy	2000,00	66,67	100,00	1,00	52,36	14,23	38,20
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	66,67	16,67	1,00	52,36	25,18	66,85
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	66,67	33,33	1,00	52,36	25,18	66,85
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	66,67	50,00	1,00	52,36	25,18	66,85
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	66,67	66,67	1,00	52,36	25,18	66,85
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	3500,00	66,67	83,33	1,00	52,36	25,18	66,85
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	66,67	16,67	1,00	52,36	28,77	76,39







32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4000,00	166,67	83,33	1,00	130,90	11,51	30,56
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	166,67	16,67	1,00	130,90	12,95	34,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	166,67	33,33	1,00	130,90	12,95	34,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	166,67	50,00	1,00	130,90	12,95	34,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	166,67	66,67	1,00	130,90	12,95	34,38
32	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087)	4500,00	166,67	83,33	1,00	130,90	12,95	34,38
77	Da Silva et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser vertical LMWD	Aluminium	AlSi10Mg	3500,00	66,70	10,00	1,60	134,11	9,85	26,10
77	Da Silva et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser vertical LMWD	Aluminium	AlSi10Mg	4000,00	66,70	10,00	1,60	134,11	11,26	29,83
77	Da Silva et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser vertical LMWD	Aluminium	AlSi5	5000,00	66,70	10,00	1,60	134,11	13,86	37,28
77	Da Silva et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser vertical LMWD	Aluminium	AlSi12	5000,00	66,70	10,00	1,60	134,11	14,07	37,28
77	Da Silva et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser vertical LMWD	Aluminium	AlSi5	6000,00	66,70	10,00	1,60	134,11	16,63	44,74
77	Da Silva et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser vertical LMWD	Aluminium	AlSi12	7000,00	66,70	10,00	1,60	134,11	19,70	52,20
31	Froend et al. (2018)	Laser	Fibre	fibre laser LMWD	Aluminium	AlMg4.5MnZr (En AW-5087) in H19 condition	4500,00	166,67	83,33	1,60	335,10	5,06	13,43

## Laser - Cobalto

Tabella 11 Laser - Cobalto

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia di laser	Tipo di laser	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	45,00	6,00	1,20	50,89	9,37	78,60
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	45,00	8,00	1,20	50,89	9,37	78,60
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	45,00	10,00	1,20	50,89	9,37	78,60
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	55,00	6,00	1,20	62,20	7,66	64,31
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	55,00	8,00	1,20	62,20	7,66	64,31
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	55,00	10,00	1,20	62,20	7,66	64,31
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	65,00	6,00	1,20	73,51	6,49	54,41
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	65,00	8,00	1,20	73,51	6,49	54,41
72	Zhang et al. (2020)	Laser	Fibre	fiber laser LHWC	Cobalt	cobalt based alloy WEARTECH WT-6	4000,00	65,00	10,00	1,20	73,51	6,49	54,41

# Laser - Nickel

Tabella 12 Laser - Nickel

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia di laser	Tipo di laser	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
61	Bergs et al. (2020)	Laser	Diode	diode laser LMWD	Nickel	Inconel 718	1200,00	16,50	15,00	1,20	<b>18,66</b>	<b>7,85</b>	64,31
1	Hussein et al. (2008)	Laser	Diode	High power diode laser DMD	Nickel	Waspaloy	2000,00	25,00	1,70	1,20	<b>28,27</b>	<b>8,67</b>	70,74
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1000,00	6,70	8,50	1,20	<b>7,58</b>	<b>15,64</b>	131,97
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1000,00	6,70	1,70	1,20	<b>7,58</b>	<b>15,64</b>	131,97
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1800,00	6,70	8,50	1,20	<b>7,58</b>	<b>28,15</b>	237,54
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1800,00	6,70	1,70	1,20	<b>7,58</b>	<b>28,15</b>	237,54
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1000,00	23,30	1,70	1,20	<b>26,35</b>	<b>4,50</b>	37,95
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1000,00	23,30	8,50	1,20	<b>26,35</b>	<b>4,50</b>	37,95
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1800,00	23,30	1,70	1,20	<b>26,35</b>	<b>8,09</b>	68,31
7	Abioye et al. (2013)	Laser	Fibre	Fibre laser cladding	Nickel	Inconel 625	1800,00	23,30	8,50	1,20	<b>26,35</b>	<b>8,09</b>	68,31
70	Sun et al. (2020)	Laser		UHF	Nickel	Inconel 625	800,00	6,83	2,40	2,00	<b>21,47</b>	<b>4,41</b>	37,27

# Laser - Acciaio

Tabella 13 Laser - Acciaio

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia di laser	Tipo di laser	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm3/s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm3)
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nb powder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	8,33	15,00	1,20	<b>9,42</b>	<b>9,51</b>	74,27
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	8,33	6,67	1,20	<b>9,42</b>	<b>9,51</b>	74,27
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	8,33	15,00	1,20	<b>9,42</b>	<b>9,51</b>	74,27
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	8,33	6,67	1,20	<b>9,42</b>	<b>9,51</b>	74,27
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	8,33	15,00	1,20	<b>9,42</b>	<b>12,23</b>	95,49
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	8,33	6,67	1,20	<b>9,42</b>	<b>12,23</b>	95,49
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	8,33	15,00	1,20	<b>9,42</b>	<b>12,23</b>	95,49
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	8,33	6,67	1,20	<b>9,42</b>	<b>12,23</b>	95,49
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD without Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	8,33	6,67	1,20	<b>9,42</b>	<b>12,23</b>	95,49
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	780,00	10,00	11,67	1,20	<b>11,31</b>	<b>8,83</b>	68,97
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	850,00	11,67	13,33	1,20	<b>13,19</b>	<b>8,25</b>	64,42
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nb powder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	13,33	15,00	1,20	<b>15,08</b>	<b>5,94</b>	46,42
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	13,33	15,00	1,20	<b>15,08</b>	<b>5,94</b>	46,42
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	13,33	6,67	1,20	<b>15,08</b>	<b>5,94</b>	46,42
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	700,00	13,33	6,67	1,20	<b>15,08</b>	<b>5,94</b>	46,42
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nb powder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	13,33	15,00	1,20	<b>15,08</b>	<b>7,64</b>	59,68
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nb powder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	13,33	6,67	1,20	<b>15,08</b>	<b>7,64</b>	59,68
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	13,33	15,00	1,20	<b>15,08</b>	<b>7,64</b>	59,68
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD with Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	13,33	6,67	1,20	<b>15,08</b>	<b>7,64</b>	59,68
41	Teli et al. (2018)	Laser	Diode	WP-LMD without Nbpowder	Steel	H11 steel niobium powder	900,00	13,33	15,00	1,20	<b>15,08</b>	<b>7,64</b>	59,68
29	Demir (2018)	Laser	Fibre	Nd:YAG laser $\mu$ LMWD multylayer	Steel	AISI 301 stainless steel	120,00	3,83	2,70	0,50	<b>0,75</b>	<b>20,36</b>	159,43
29	Demir (2018)	Laser	Fibre	Nd:YAG laser $\mu$ LMWD single layer	Steel	AISI 301 stainless steel	120,00	3,83	15,00	0,50	<b>0,75</b>	<b>20,36</b>	159,43
29	Demir (2018)	Laser	Fibre	Nd:YAG laser $\mu$ LMWD single layer	Steel	AISI 301 stainless steel	120,00	3,83	1,80	0,50	<b>0,75</b>	<b>20,36</b>	159,43
29	Demir (2018)	Laser	Fibre	Nd:YAG laser $\mu$ LMWD single layer	Steel	AISI 301 stainless steel	120,00	3,83	2,25	0,50	<b>0,75</b>	<b>20,36</b>	159,43
29	Demir (2018)	Laser	Fibre	Nd:YAG laser $\mu$ LMWD single layer	Steel	AISI 301 stainless steel	120,00	3,83	2,70	0,50	<b>0,75</b>	<b>20,36</b>	159,43
29	Demir (2018)	Laser	Fibre	Nd:YAG laser $\mu$ LMWD single layer	Steel	AISI 301 stainless steel	120,00	3,83	3,00	0,50	<b>0,75</b>	<b>20,36</b>	159,43

36	Motta et al. (2018)	Laser	Fibre	fiber laser LMWD layer adherence tests	Steel	AISI 308	1000,00	20,00	16,67	1,00	<b>15,71</b>	<b>7,96</b>	63,66
36	Motta et al. (2018)	Laser	Fibre	fiber laser LMWD multilayer	Steel	AISI 308	1000,00	20,00	16,67	1,00	<b>15,71</b>	<b>7,96</b>	63,66
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	1500,00	16,67	4,17	1,20	<b>18,85</b>	<b>9,95</b>	79,58
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	1500,00	16,67	3,33	1,20	<b>18,85</b>	<b>9,95</b>	79,58
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	2000,00	16,67	4,17	1,20	<b>18,85</b>	<b>13,26</b>	106,10
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	2000,00	16,67	3,33	1,20	<b>18,85</b>	<b>13,26</b>	106,10
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	1500,00	23,33	3,33	1,20	<b>26,39</b>	<b>7,11</b>	56,84
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	1500,00	23,33	4,17	1,20	<b>26,39</b>	<b>7,11</b>	56,84
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	2000,00	23,33	3,33	1,20	<b>26,39</b>	<b>9,47</b>	75,79
2	Medrano et al. (2008)	Laser	Fibre	Fibre laser	Steel	Stainless steel 308L	2000,00	23,33	4,17	1,20	<b>26,39</b>	<b>9,47</b>	75,79
85	Feldhausen et al. (2021)	Laser	Fibre	fiber laser hot wire welding	Steel	316L stainless steel	2750,00	74,08	17,78	1,40	<b>114,04</b>	<b>3,01</b>	24,11

## Laser - Titanio

Tabella 14 Laser - Titanio

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia di laser	Tipo di laser	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
3	Mok et al. (2008)	Laser	Diode	High power diode laser	Titanium	Ti-6Al-4V	2060,00	33,33	16,67	1,20	<b>37,70</b>	<b>12,33</b>	54,64
3	Mok et al. (2008)	Laser	Diode	High power diode laser	Titanium	Ti-6Al-4V	2060,00	33,33	3,33	1,20	<b>37,70</b>	<b>12,33</b>	54,64
3	Mok et al. (2008)	Laser	Diode	High power diode laser	Titanium	Ti-6Al-4V	2060,00	33,33	5,00	1,20	<b>37,70</b>	<b>12,33</b>	54,64
27	Caiazza (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	10,00	10,00	1,00	<b>7,85</b>	<b>35,93</b>	159,15
27	Caiazza (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	10,00	10,00	1,00	<b>7,85</b>	<b>43,11</b>	190,99
27	Caiazza (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	12,50	12,50	1,00	<b>9,82</b>	<b>28,74</b>	127,32
27	Caiazza (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	12,50	12,50	1,00	<b>9,82</b>	<b>34,49</b>	152,79
27	Caiazza (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	15,00	10,00	1,00	<b>11,78</b>	<b>23,95</b>	106,10
27	Caiazza (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	15,00	10,00	1,00	<b>11,78</b>	<b>28,74</b>	127,32
27	Caiazza (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	18,75	12,50	1,00	<b>14,73</b>	<b>19,16</b>	84,88

27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	18,75	12,50	1,00	<b>14,73</b>	<b>22,99</b>	101,86
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	20,00	10,00	1,00	<b>15,71</b>	<b>17,96</b>	79,58
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	20,00	10,00	1,00	<b>15,71</b>	<b>21,56</b>	95,49
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	25,00	10,00	1,00	<b>19,63</b>	<b>14,37</b>	63,66
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	25,00	12,50	1,00	<b>19,63</b>	<b>14,37</b>	63,66
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	25,00	10,00	1,00	<b>19,63</b>	<b>17,24</b>	76,39
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	25,00	12,50	1,00	<b>19,63</b>	<b>17,24</b>	76,39
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1250,00	31,25	12,50	1,00	<b>24,54</b>	<b>11,50</b>	50,93
27	Caiazzo (2018)	Laser	Fibre	Yb:YAG fiber laser	Titanium	Ti-6Al-4V	1500,00	31,25	12,50	1,00	<b>24,54</b>	<b>13,80</b>	61,12
5	Baufeld et al. (2011)	Laser	Fibre	Nd:YAG Laser beam SMD	Titanium	Ti-6Al-4V	2200,00	30,00	5,00	1,20	<b>33,93</b>	<b>14,64</b>	64,84
4	Brandl at al. (2008)	Laser	Fibre	Nd:YAG Laser beam	Titanium	Ti-6Al-4V	2625,00	30,00	7,50	1,20	<b>33,93</b>	<b>17,46</b>	77,37
5	Baufeld et al. (2011)	Laser	Fibre	Nd:YAG Laser beam ALM	Titanium	Ti-6Al-4V	3500,00	40,00	10,00	1,20	<b>14,64</b>	<b>17,46</b>	77,37

## A.3 Dati origine WAAM

### CMT

Tabella 15 CMT

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia Arc	Tipo di Arc	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Current (A)	Voltage (V)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
75	Campatelli et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Aluminium	AWS A5,10 ER4043	461,42	32,00	11,10	30,00	5,00	1,20	<b>33,93</b>	<b>5,07</b>	13,60
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1234,87	98,00	9,70	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>2,97</b>	23,29
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1363,99	100,00	10,50	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,29</b>	25,73
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1497,27	102,00	11,30	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,61</b>	28,24
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1590,02	102,00	12,00	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,83</b>	29,99
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1649,78	100,00	12,70	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,97</b>	31,12
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT continuous	Steel	316L stainless steel	2766,95	150,00	14,20	133,33	10,00	1,00	<b>104,72</b>	<b>3,30</b>	26,42
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	CMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	2524,16	127,00	15,30	100,00	0,00	1,20	<b>113,10</b>	<b>8,41</b>	22,32
75	Campatelli et al. (2020)	Arc	CMT	CMT Mix Drive	Aluminium	AWS A5,10 ER4043	3196,28	133,00	18,50	100,00	5,00	1,20	<b>113,10</b>	<b>10,55</b>	28,26
57	Tanvir et al. (2019)	Arc	CMT	CMT	Nickel	Inconel 625	2110,94	130,00	12,50	108,33	13,33	1,20	<b>122,52</b>	<b>2,04</b>	17,23
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT pulsed 1	Steel	316L stainless steel	6027,54	200,00	23,20	156,67	10,00	1,00	<b>123,05</b>	<b>6,12</b>	48,99
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT pulsed 3	Steel	316L stainless steel	7487,66	220,00	26,20	166,67	13,33	1,00	<b>130,90</b>	<b>7,15</b>	57,20
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT pulsed 2	Steel	316L stainless steel	7659,13	220,00	26,80	166,67	16,67	1,00	<b>130,90</b>	<b>7,31</b>	58,51
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	2727,98	140,00	15,00	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>7,79</b>	20,67
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	CMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	3986,36	159,00	19,30	150,00	0,00	1,20	<b>169,65</b>	<b>8,85</b>	23,50

# GMAW (escluso CMT)

Tabella 16 GMAW (escluso CMT)

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia Arc	Tipo di Arc	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Current (A)	Voltage (V)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm3/s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm3)
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	47,50	0,00	1,20	<b>53,72</b>	<b>17,11</b>	48,85
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	56,67	0,00	1,20	<b>64,09</b>	<b>14,34</b>	40,94
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	70,00	0,00	1,20	<b>79,17</b>	<b>11,61</b>	33,15
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	83,33	0,00	1,20	<b>94,25</b>	<b>9,75</b>	27,84
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	91,67	0,00	1,20	<b>103,67</b>	<b>8,87</b>	25,31
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	4364,77	120,00	28,00	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>8,71</b>	23,16
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	4676,54	120,00	30,00	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>9,33</b>	24,81
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	4728,50	130,00	28,00	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>9,43</b>	25,09
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	5066,25	130,00	30,00	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>10,10</b>	26,88
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	9560,92	230,00	32,00	250,00	12,00	1,20	<b>282,74</b>	<b>12,71</b>	33,81
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	9859,70	230,00	33,00	250,00	12,00	1,20	<b>282,74</b>	<b>13,11</b>	34,87
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	9976,61	240,00	32,00	250,00	12,00	1,20	<b>282,74</b>	<b>13,27</b>	35,29
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 alluminium alloy	10288,38	240,00	33,00	250,00	12,00	1,20	<b>282,74</b>	<b>13,68</b>	36,39
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	8,33	25,00	1,20	9,42	<b>29,12</b>	253,06
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	8,33	16,67	1,20	9,42	<b>29,12</b>	253,06
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	8,33	25,00	1,20	9,42	<b>83,37</b>	724,45
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	8,33	16,67	1,20	9,42	<b>83,37</b>	724,45
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	83,33	16,67	1,20	94,25	<b>2,91</b>	25,31
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	83,33	25,00	1,20	94,25	<b>2,91</b>	25,31
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	83,33	16,67	1,20	94,25	<b>8,34</b>	72,44
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	83,33	25,00	1,20	94,25	<b>8,34</b>	72,44
15	Venturini et al. (2016)	Arc	GMAW	MIG	Steel	carbon steel AWS ER70S-6	1234,09	50,00	19,00	76,67	50,00	0,80	<b>38,54</b>	<b>4,09</b>	32,02
22	Montevecchi et al. (2017)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	ER70S-6 steel	1480,00	81,00	19,00	76,67	5,00	0,80	<b>38,54</b>	<b>4,90</b>	38,40
35	Montevecchi et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	ER70S-6 steel	1870,61	80,00	18,00	76,67	5,00	0,80	<b>38,54</b>	<b>6,20</b>	48,54
56	Rodrigues et al. (2019)	Arc	GMAW	MIG	Steel	HLSA AWS A5,28 ER110S-G	2591,58	95,00	21,00	50,00	3,90	1,00	<b>39,27</b>	<b>8,41</b>	65,99
56	Rodrigues et al. (2019)	Arc	GMAW	MIG	Steel	HLSA AWS A5,28 ER110S-G	2591,58	95,00	21,00	50,00	9,00	1,00	<b>39,27</b>	<b>8,41</b>	65,99

21	Lu et al. (2017)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	ER70S-6 steel	3429,46	132,00	20,00	121,67	10,00	0,80	<b>61,16</b>	<b>7,16</b>	56,08
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	63,00	5,00	1,20	71,25	0,84	6,56
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	63,00	11,70	1,20	71,25	0,84	6,56
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	63,00	5,00	1,20	71,25	2,19	17,06
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	63,00	11,70	1,20	71,25	2,19	17,06
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	63,00	5,00	1,20	71,25	9,82	76,57
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	63,00	11,70	1,20	71,25	9,82	76,57
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	63,00	5,00	1,20	71,25	25,52	199,09
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	63,00	11,70	1,20	71,25	25,52	199,09
60	Wang et al. (2019)	Arc	GMAW	SpeedArc	Steel	316L stainless steel	2730,00	19,50	140,00	75,00	10,00	1,20	84,82	4,02	32,18
60	Wang et al. (2019)	Arc	GMAW	SpeedPulse	Steel	316L stainless steel	2984,00	22,10	135,00	75,00	10,00	1,20	84,82	4,40	35,18
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	143,00	5,00	1,20	161,73	0,37	2,89
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	143,00	11,70	1,20	161,73	0,37	2,89
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	143,00	5,00	1,20	161,73	0,96	7,52
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	143,00	11,70	1,20	161,73	0,96	7,52
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	143,00	5,00	1,20	161,73	4,33	33,74
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	143,00	11,70	1,20	161,73	4,33	33,74
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	143,00	5,00	1,20	161,73	11,25	87,71
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	143,00	11,70	1,20	161,73	11,25	87,71
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	11800,00			200,00	6,70	1,20	226,19	6,65	52,17
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	13000,00			233,33	7,50	1,20	263,89	6,28	49,26
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	TGMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	20900,00			458,33	11,70	1,20	518,36	5,14	40,32
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	TGMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	23800,00			583,33	13,30	1,20	659,73	4,60	36,08

# GMAW (compreso CMT)

Tabella 17 GMAW (compreso CMT)

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia Arc	Tipo di Arc	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Current (A)	Voltage (V)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	CMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	2524,16	127,00	15,30	100,00	0,00	1,20	<b>113,10</b>	<b>8,41</b>	22,32
75	Campatelli et all. (2020)	Arc	CMT	CMT	Aluminium	AWS A5,10 ER4043	461,42	32,00	11,10	30,00	5,00	1,20	<b>33,93</b>	<b>5,07</b>	13,60
75	Campatelli et all. (2020)	Arc	CMT	CMT Mix Drive	Aluminium	AWS A5,10 ER4043	3196,28	133,00	18,50	100,00	5,00	1,20	<b>113,10</b>	<b>10,55</b>	28,26
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	CMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	3986,36	159,00	19,30	150,00	0,00	1,20	<b>169,65</b>	<b>8,85</b>	23,50
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	1565,47	103,00	11,70	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>4,47</b>	11,86
46	Zhang et al. (2018)	Arc	CMT	VPCMT	Aluminium	Al-6Mg alloy	2727,98	140,00	15,00	116,67	0,00	1,20	<b>131,95</b>	<b>7,79</b>	20,67
57	Tanvir et al. (2019)	Arc	CMT	CMT	Nickel	Inconel 625	2110,94	130,00	12,50	108,33	13,33	1,20	<b>122,52</b>	<b>2,04</b>	17,23
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1234,87	98,00	9,70	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>2,97</b>	23,29
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1363,99	100,00	10,50	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,29</b>	25,73
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1497,27	102,00	11,30	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,61</b>	28,24
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1590,02	102,00	12,00	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,83</b>	29,99
71	Yuan et al. (2020)	Arc	CMT	CMT	Steel	carbon steel ER70S-6	1649,78	100,00	12,70	83,33	1,67	0,90	<b>53,01</b>	<b>3,97</b>	31,12
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT continuous	Steel	316L stainless steel	2766,95	150,00	14,20	133,33	10,00	1,00	<b>104,72</b>	<b>3,30</b>	26,42
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT pulsed 1	Steel	316L stainless steel	6027,54	200,00	23,20	156,67	10,00	1,00	<b>123,05</b>	<b>6,12</b>	48,99
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT pulsed 2	Steel	316L stainless steel	7659,13	220,00	26,80	166,67	16,67	1,00	<b>130,90</b>	<b>7,31</b>	58,51
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	CMT	CMT pulsed 3	Steel	316L stainless steel	7487,66	220,00	26,20	166,67	13,33	1,00	<b>130,90</b>	<b>7,15</b>	57,20
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	4364,77	<b>120,00</b>	<b>28,00</b>	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>8,71</b>	23,16
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	4676,54	<b>120,00</b>	<b>30,00</b>	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>9,33</b>	24,81
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	4728,50	<b>130,00</b>	<b>28,00</b>	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>9,43</b>	25,09
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	5066,25	<b>130,00</b>	<b>30,00</b>	166,67	22,00	1,20	<b>188,50</b>	<b>10,10</b>	26,88
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	9560,92	<b>230,00</b>	<b>32,00</b>	250,00	12,00	1,20	<b>282,74</b>	<b>12,71</b>	33,81
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	9859,70	<b>230,00</b>	<b>33,00</b>	250,00	12,00	1,20	<b>282,74</b>	<b>13,11</b>	34,87

33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	9976,61	240,00	32,00	250,00	12,00	1,20	282,74	13,27	35,29
33	Horgar et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Aluminium	AA5183 aluminium alloy	10288,38	240,00	33,00	250,00	12,00	1,20	282,74	13,68	36,39
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	47,50	0,00	1,20	53,72	17,11	48,85
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	56,67	0,00	1,20	64,09	14,34	40,94
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	70,00	0,00	1,20	79,17	11,61	33,15
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	83,33	0,00	1,20	94,25	9,75	27,84
49	Shi et al. (2019)	Arc	GMAW	T-GMAW	Aluminium	ER2325 aluminium alloy	2624,06	101,00	20,00	91,67	0,00	1,20	103,67	8,87	25,31
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	83,33	16,67	1,20	94,25	2,91	25,31
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	83,33	25,00	1,20	94,25	2,91	25,31
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	83,33	16,67	1,20	94,25	8,34	72,44
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	83,33	25,00	1,20	94,25	8,34	72,44
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	8,33	25,00	1,20	9,42	29,12	253,06
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	2385,03	180,00	10,20	8,33	16,67	1,20	9,42	29,12	253,06
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	8,33	25,00	1,20	9,42	83,37	724,45
82	Lin et al. (2020)	Arc	GMAW	MAG	Cobalt	cobalt based superalloy Stellite 6	6827,74	180,00	29,20	8,33	16,67	1,20	9,42	83,37	724,45
22	Montevocchi et al. (2017)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	ER70S-6 steel	1480,00	81,00	19,00	76,67	5,00	0,80	38,54	4,90	38,40
35	Montevocchi et al. (2018)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	ER70S-6 steel	1870,61	80,00	18,00	76,67	5,00	0,80	38,54	6,20	48,54
21	Lu et al. (2017)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	ER70S-6 steel	3429,46	132,00	20,00	121,67	10,00	0,80	61,16	7,16	56,08
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	11800,00			200,00	6,70	1,20	226,19	6,65	52,17
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	GMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	13000,00			233,33	7,50	1,20	263,89	6,28	49,26
15	Venturini et al. (2016)	Arc	GMAW	MIG	Steel	carbon steel AWS ER70S-6	1234,09	50,00	19,00	76,67	50,00	0,80	38,54	4,09	32,02
56	Rodrigues et al. (2019)	Arc	GMAW	MIG	Steel	HLSA AWS A5,28 ER110S-G	2591,58	95,00	21,00	50,00	3,90	1,00	39,27	8,41	65,99
56	Rodrigues et al. (2019)	Arc	GMAW	MIG	Steel	HLSA AWS A5,28 ER110S-G	2591,58	95,00	21,00	50,00	9,00	1,00	39,27	8,41	65,99
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	143,00	5,00	1,20	161,73	0,37	2,89
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	143,00	11,70	1,20	161,73	0,37	2,89
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	63,00	5,00	1,20	71,25	0,84	6,56
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	467,65	30,00	12,00	63,00	11,70	1,20	71,25	0,84	6,56
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	143,00	5,00	1,20	161,73	0,96	7,52
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	143,00	11,70	1,20	161,73	0,96	7,52
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	63,00	5,00	1,20	71,25	2,19	17,06
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	1215,90	30,00	31,20	63,00	11,70	1,20	71,25	2,19	17,06
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	143,00	5,00	1,20	161,73	4,33	33,74

37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	143,00	11,70	1,20	161,73	4,33	33,74
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	63,00	5,00	1,20	71,25	9,82	76,57
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	5455,96	350,00	12,00	63,00	11,70	1,20	71,25	9,82	76,57
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	143,00	5,00	1,20	161,73	11,25	87,71
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	143,00	11,70	1,20	161,73	11,25	87,71
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	63,00	5,00	1,20	71,25	25,52	199,09
37	Ou et al. (2018)	Arc	GMAW	MIG/MAG	Steel	H13 tool steel	14185,50	350,00	31,20	63,00	11,70	1,20	71,25	25,52	199,09
60	Wang et al. (2019)	Arc	GMAW	SpeedArc	Steel	316L stainless steel	2730,00	19,50	140,00	75,00	10,00	1,20	84,82	4,02	32,18
60	Wang et al. (2019)	Arc	GMAW	SpeedPulse	Steel	316L stainless steel	2984,00	22,10	135,00	75,00	10,00	1,20	84,82	4,40	35,18
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	TGMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	20900,00			458,33	11,70	1,20	518,36	5,14	40,32
14	Sproesser et al. (2016)	Arc	GMAW	TGMAW	Steel	AWS A5.18 Class ER70S-6	23800,00			583,33	13,30	1,20	659,73	4,60	36,08

## GTAW

Tabella 18 GTAW

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia Arc	Tipo di Arc	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Current (A)	Voltage (V)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	GTAW	TopTIG continuous 5	Steel	316L stainless steel	4429,72	220,00	15,50	100,00	11,67	1,00	78,54	7,05	56,40
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	GTAW	TopTIG continuous 3	Steel	316L stainless steel	4429,72	220,00	15,50	83,33	11,67	1,00	65,45	8,46	67,68
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	GTAW	TopTIG continuous 4	Steel	316L stainless steel	4429,72	220,00	15,50	66,67	11,67	1,00	52,36	10,58	84,60
39	Rodriguez et al. (2018)	Arc	GTAW	TopTIG continuous 1	Steel	316L stainless steel	4429,72	220,00	15,50	48,33	11,67	1,00	37,96	14,59	116,69
17	Donoghue et al. (2016)	Arc	GTAW	GTAW	Titanium	Ti-6Al-4V	1714,73	110,00	12,00	26,67	4,50	1,20	30,16	12,83	56,86
50	Dryburgh et al. (2019)	Arc	GTAW	GTAW	Titanium	Ti-6Al-4V	1714,73	110,00	12,00	26,67	4,50	1,20	30,16	12,83	56,86
4	Brandl et al. (2008)	Arc	GTAW	arc beam (tungsten inert gas) SMD	Titanium	Ti-6Al-4V	2847,91	176,80	12,40	33,30	5,00	1,20	37,66	17,07	75,62
24	Wu et al. (2017)	Arc	GTAW	GTAW	Titanium	Ti-6Al-4V	1714,73	110,00	12,00	16,67	1,58	1,20	18,85	20,53	90,97
44	Wu et al. (2018)	Arc	GTAW	GTAW	Titanium	Ti-6Al-4V	1714,73	110,00	12,00	16,67	1,58	1,20	18,85	20,53	90,97

# PAW

Tabella 19 PAW

ID	Reference	Laser / Arc	Famiglia Arc	Tipo di Arc	Famiglia di materiale	Material	Power scelta (W)	Current (A)	Voltage (V)	Wire feed speed (mm/sec)	Travel speed (mm/sec)	Wire Diameter (mm)	Wire flow rate (mm <sup>3</sup> /s)	SEI (MJ/kg)	SEI (J/mm <sup>3</sup> )
25	Zhang et al. (2017)	Arc	PAW	PAW oscillation	Titanium	Ti-6Al-4V grade 5 e 23	3916,60	150,00	20,10	38,33	79,17	1,20	<b>43,35</b>	<b>20,39</b>	90,34
25	Zhang et al. (2017)	Arc	PAW	PAW single pass	Titanium	Ti-6Al-4V grade 5 e 23	3748,37	145,00	19,90	33,33	75,00	1,20	<b>37,70</b>	<b>22,44</b>	99,43
25	Zhang et al. (2017)	Arc	PAW	PAW parallel	Titanium	Ti-6Al-4V grade 5 e 23	4302,41	160,00	20,70	36,67	75,00	1,20	<b>41,47</b>	<b>23,42</b>	103,75

## Bibliografia

- [1] U. Bhatia, “3D Printing Technology,” *Appl. Geom. Eng. Graph.*, vol. 0, no. 97, pp. 136–148, 2020, doi: 10.32347/0131-579x.2020.97.136-148.
- [2] A. R. Catalano, V. Lunetto, P. C. Priarone, and L. Settineri, “A survey on energy efficiency in metal wire deposition processes,” *Smart Innov. Syst. Technol.*, vol. 155, pp. 311–322, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-9271-9\_26.
- [3] S. K. Singh, B. K. Samal, S. R. Pradhan, S. R. Ojha, M. D. Saffin, and A. M. Mohanty, “Sustainable Analysis of TIG Parameters for Welding Aluminum Alloy Considering Joint Gap and Welding Current,” pp. 316–323, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-30271-9\_29.
- [4] G. Campatelli, D. Campanella, A. Barcellona, L. Fratini, N. Grossi, and G. Ingarao, “Microstructural, mechanical and energy demand characterization of alternative WAAM techniques for Al-alloy parts production,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 2019, pp. 492–499, 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.08.001.
- [5] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. D. M. Espinosa, and M. Domínguez, “Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects,” *Complexity*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/9656938.
- [6] L. Iuliano, “Fabbricazione Additiva / Additive Manufacturing.”
- [7] 3D Printing Industry, “History of 3D Printing: The Free Beginner’s Guide,” *3D Print. Ind.*, 2014, [Online]. Available: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>.
- [8] ISO/CASCO, “(OBP), Online Browsing Platform,” vol. 1994, p. 5725, 2005, [Online]. Available: <http://iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-2:v1:es>.
- [9] B. Dutta and F. H. Froes, “Additive Manufacturing Technology,” *Addit. Manuf. Titan. Alloy.*, pp. 25–40, 2016, doi: 10.1016/b978-0-12-804782-8.00003-3.
- [10] D. Corbin, A. Nassar, and E. W. Reutzel, “Effect of directed energy deposition processing parameters on laser deposited Inconel ® 718: External morphology,” no. May, 2017, doi: 10.2351/1.4977476.

- [11] A. Saboori, D. Gallo, S. Biamino, P. Fino, and M. Lombardi, “An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: Microstructure and mechanical properties,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 9, 2017, doi: 10.3390/app7090883.
- [12] W. R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, and S. J. Skerlos, “Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing,” vol. 15, pp. 932–943, 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.11.030.
- [13] Y. Zhang *et al.*, “Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1007/s11665-017-2747-y.
- [14] 3DMPWIRE, “Project Goals and Objectives,” pp. 1–12, 2016, [Online]. Available: <https://www.3dmpwire.com/project-details/goals-and-objectives/>.
- [15] J. E. Barnes, T. Barnes, and G. Advisors, “Does " Low Cost " Titanium Powder Yield Low Cost Titanium Parts ?,” no. January, 2017.
- [16] O. Yilmaz and A. A. Uгла, “Shaped metal deposition technique in additive manufacturing : A review,” vol. 230, no. 10, pp. 1781–1798, 2016, doi: 10.1177/0954405416640181.
- [17] D. Lehmhus, M. Busse, A. Von Hehl, and E. Jäggle, “State of the Art and Emerging Trends in Additive Manufacturing : From Multi-Material processes to 3D printed Electronics,” vol. 03013, 2018.
- [18] M. A. Domains and T. Environmental, “Environmental Dimensions of Additive,” vol. 21, pp. 49–68, doi: 10.1111/jiec.12629.
- [19] B. A. Szost *et al.*, “A comparative study of additive manufacturing techniques : Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti – 6Al – 4V components,” vol. 89, pp. 559–567, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.115.
- [20] C. Zhang, Y. Li, M. Gao, and X. Zeng, “Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 711, no. August 2017, pp. 415–423, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2017.11.084.
- [21] J. Wang *et al.*, “Characterization of wire arc additively manufactured titanium

- aluminide functionally graded material: Microstructure, mechanical properties and oxidation behaviour,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 734, no. May, pp. 110–119, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.07.097.
- [22] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, “Wire + Arc additive manufacturing,” *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [23] P. Åkerfeldt, M. L. Antti, and R. Pederson, “Influence of microstructure on mechanical properties of laser metal wire-deposited Ti-6Al-4V,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 674, pp. 428–437, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.07.038.
- [24] F. Martina, J. Ding, S. Williams, A. Caballero, G. Pardal, and L. Quintino, “Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel,” *Addit. Manuf.*, vol. 25, no. January, pp. 545–550, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.11.022.
- [25] K. S. Derekar, “A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium ABSTRACT,” vol. 0836, 2018, doi: 10.1080/02670836.2018.1455012.
- [26] K. P. Karunakaran, S. Suryakumar, V. Pushpa, and S. Akula, “Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 5, pp. 490–499, 2010, doi: 10.1016/j.rcim.2010.03.008.
- [27] J. Xiong, Y. J. Li, Z. Q. Yin, and H. Chen, “Determination of Surface Roughness in Wire and Arc Additive Manufacturing Based on Laser Vision Sensing,” *Chinese J. Mech. Eng.*, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1186/s10033-018-0276-8.
- [28] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “Wire-feed additive manufacturing of metal components : technologies , developments and future interests,” pp. 465–481, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7077-3.
- [29] A. Christiansson and B. Lennartson, “Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning,” vol. 50, pp.

- 1230–1241, 2012, doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.03.016.
- [30] Sciaky, “Electron beam additive manufacturing (ebam ® ),” 2021. <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>.
- [31] L. Zhu *et al.*, “Recent research and development status of laser cladding: A review,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 138, no. September 2020, p. 106915, 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2021.106915.
- [32] S. H. Oliari, A. S. C. M. D’Oliveira, and M. Schulz, “Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition,” *Soldag. Inspeção*, vol. 22, no. 4, pp. 466–479, 2017, doi: 10.1590/0104-9224/si2204.06.
- [33] T. E. Abioye, J. Folkes, and A. T. Clare, “A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 12, pp. 2145–2151, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.007.
- [34] W. Tao, Z. Yang, Y. Chen, L. Li, Z. Jiang, and Y. Zhang, “Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 52, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1016/j.optlastec.2013.04.003.
- [35] R. Sun, Y. Shi, X. Wang, Y. Guo, and X. Zhou, “Understanding the thermal process during laser assisted ultra-high frequency induction deposition with wire feeding,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 153, p. 119536, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119536.
- [36] Z. Zhang, F. Kong, and R. Kovacevic, “Laser hot-wire cladding of Co-Cr-W metal cored wire,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 128, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.105998.
- [37] A. da Silva, S. Wang, J. Volpp, and A. F. H. Kaplan, “Vertical laser metal wire deposition of Al-Si alloys,” *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 341–345, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.078.
- [38] A. G. Demir, “Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 100, no. July 2017, pp. 9–17, 2018, doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.07.003.

- [39] M. Teli, F. Klocke, K. Arntz, K. Winands, M. Schulz, and S. Oliari, “Study for Combined Wire + Powder Laser Metal Deposition of H11 and Niobium,” *Procedia Manuf.*, vol. 25, pp. 426–434, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.113.
- [40] T. Feldhausen, N. Raghavan, K. Saleeby, L. Love, and T. Kurfess, “Mechanical properties and microstructure of 316L stainless steel produced by hybrid manufacturing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 290, no. August 2020, p. 116970, 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116970.
- [41] Ivántabernero, A. Paskual, P. Álvarez, and A. Suárez, “Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 68, no. April, pp. 358–362, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.095.
- [42] F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, and A. A. Antonysamy, “Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 968–977, 2013, doi: 10.1007/s11661-012-1444-6.
- [43] B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, and H. Li, “Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 23, no. August, pp. 151–160, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.08.004.
- [44] J. Ding, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, and M. R. Palt, “Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 226, pp. 99–105, 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005.
- [45] M. A. Jackson, A. Van Asten, J. D. Morrow, S. Min, and F. E. Pfefferkorn, “A Comparison of Energy Consumption in Wire-based and Powder-based Additive-subtractive Manufacturing,” *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 989–1005, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.087.
- [46] J. Norrish, *Advanced Welding Processes*. 2021.
- [47] L. Yuan *et al.*, “Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing,” *J. Manuf. Process.*, no. February, pp. 0–1, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.03.018.

- [48] L. Wang, J. Xue, and Q. Wang, “Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 751, no. February, pp. 183–190, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.02.078.
- [49] Z. Yang, Q. Liu, Y. Wang, Z. Ma, and Y. Liu, “Fabrication of multi-element alloys by twin wire arc additive manufacturing combined with in-situ alloying,” *Mater. Res. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 477–482, 2020, doi: 10.1080/21663831.2020.1809543.
- [50] J. Ding *et al.*, “Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 12, pp. 3315–3322, 2011, doi: 10.1016/j.commatsci.2011.06.023.
- [51] A. N. M. Tanvir, M. R. U. Ahsan, C. Ji, W. Hawkins, B. Bates, and D. B. Kim, “Heat treatment effects on Inconel 625 components fabricated by wire + arc additive manufacturing (WAAM)—part 1: microstructural characterization,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, no. 2, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03828-6.
- [52] E. E. Feistauer, “□ □ A review on direct assembly of through - the - thickness reinforced metal–polymer composite hybrid structures,” vol. 59, no. 4, pp. 661–674, 2021, [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pen.25022>.
- [53] N. P. Gokhale and P. Kala, “Thermal analysis of TIG-WAAM based metal deposition process using finite element method,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.756.
- [54] N. Rodriguez, L. Vázquez, I. Huarte, E. Arruti, I. Taberero, and P. Alvarez, “Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel,” *Weld. World*, vol. 62, no. 5, pp. 1083–1096, 2018, doi: 10.1007/s40194-018-0606-6.
- [55] A. Paskual, P. Álvarez, and A. Suárez, “Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 68, no. April, pp. 358–362, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.095.
- [56] D. Wikipedia, “Polverizzazione catodica,” pp. 2–5, 2021, [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Polverizzazione\\_catodica](https://it.wikipedia.org/wiki/Polverizzazione_catodica).

- [57] C. Wang, W. Suder, J. Ding, and S. Williams, "The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 288, no. June 2020, p. 116842, 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116842.
- [58] C. Jia, W. Liu, M. Chen, M. Guo, S. Wu, and C. Wu, "Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM," *Addit. Manuf.*, vol. 34, no. April, p. 101235, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101235.
- [59] A. Medrano, J. Folkes, J. Segal, and I. Pashby, "Fibre laser metal deposition with wire: parameters study and temperature monitoring system," *XVII Int. Symp. Gas Flow, Chem. Lasers, High-Power Lasers*, vol. 7131, no. April 2009, p. 713122, 2008, doi: 10.1117/12.816831.
- [60] S. H. Mok, G. Bi, J. Folkes, and I. Pashby, "Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 202, no. 16, pp. 3933–3939, 2008, doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.02.008.
- [61] F. Caiazza, "Additive manufacturing by means of laser-aided directed metal deposition of titanium wire," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 96, no. 5–8, pp. 2699–2707, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1760-0.
- [62] S. Li, W. Xu, G. Xiao, Z. Zhou, F. Su, and J. Feng, "Effects of Sc on laser hot-wire welding performance of 7075 aluminum alloy," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 10, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/abbd0a.
- [63] M. Froend, S. Riekehr, N. Kashaev, B. Klusemann, and J. Enz, "Process development for wire-based laser metal deposition of 5087 aluminium alloy by using fibre laser," *J. Manuf. Process.*, vol. 34, no. July 2017, pp. 721–732, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.06.033.
- [64] F. Xu, L. Chen, E. G. He, and L. Y. Guo, "Laser welding 6A02 aluminum alloy with filler wire under high welding speed," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 504, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/504/1/012028.
- [65] W. Huang, S. Chen, J. Xiao, X. Jiang, and Y. Jia, "Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy," *Opt. Laser Technol.*, vol. 134, no. June

- 2020, p. 106627, 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106627.
- [66] T. Bergs, S. Kammann, G. Fraga, J. Riepe, and K. Arntz, “Experimental investigations on the influence of temperature for Laser Metal Deposition with lateral Inconel 718 wire feeding,” *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 29–34, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.007.
- [67] N. I. S. Hussein, J. Segal, D. G. McCartney, and I. R. Pashby, “Microstructure formation in Waspaloy multilayer builds following direct metal deposition with laser and wire,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 497, no. 1–2, pp. 260–269, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2008.07.021.
- [68] M. Motta, A. G. Demir, and B. Previtali, “High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition,” *Addit. Manuf.*, vol. 22, no. May, pp. 497–507, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.043.
- [69] E. Brandl, B. Baufeld, C. Leyens, and R. Gault, “Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications,” *Phys. Procedia*, vol. 5, no. PART 2, pp. 595–606, 2010, doi: 10.1016/j.phpro.2010.08.087.
- [70] B. Baufeld, E. Brandl, and O. Van Der Biest, “Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 6, pp. 1146–1158, 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.01.018.
- [71] A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson, and O. M. Akselsen, “Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 259, no. November 2017, pp. 68–74, 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014.
- [72] J. Shi, F. Li, S. Chen, and Y. Zhao, “T-GMAW based novel Multi-node trajectory planning for fabricating grid stiffened panels: An efficient production technology,” *J. Clean. Prod.*, vol. 238, p. 117919, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117919.
- [73] Z. Lin *et al.*, “Deposition of Stellite 6 alloy on steel substrates using wire and arc additive manufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 1–2, pp.

- 411–426, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06116-w.
- [74] V. Laghi, M. Palermo, L. Tonelli, G. Gasparini, L. Ceschini, and T. Trombetti, “Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire-and-arc additive manufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 9–10, pp. 3693–3705, 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04868-8.
- [75] G. Campatelli, F. Montevecchi, G. Venturini, G. Ingarao, and P. C. Priarone, “Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 7, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s40684-019-00071-y.
- [76] G. Venturini, F. Montevecchi, A. Scippa, and G. Campatelli, “Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features,” *Procedia CIRP*, vol. 55, pp. 95–100, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.08.043.
- [77] F. Montevecchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, and G. Campatelli, “Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 18, pp. 145–155, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.10.010.
- [78] F. Montevecchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, and G. Campatelli, “Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique,” *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. December 2017, pp. 479–486, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.01.007.
- [79] X. Lu, Y. F. Zhou, X. L. Xing, L. Y. Shao, Q. X. Yang, and S. Y. Gao, “Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 5–8, pp. 2145–2154, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0636-z.
- [80] T. A. Rodrigues, V. Duarte, J. A. Avila, T. G. Santos, R. M. Miranda, and J. P. Oliveira, “Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties,” *Addit. Manuf.*, vol. 27, no. March, pp. 440–450, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.03.029.
- [81] G. Sproesser, A. Pittner, and M. Rethmeier, “Increasing Performance and Energy Efficiency of Gas Metal Arc Welding by a High Power Tandem

- Process,” *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 642–647, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.148.
- [82] W. Ou, T. Mukherjee, G. L. Knapp, Y. Wei, and T. DebRoy, “Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 127, pp. 1084–1094, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.111.
- [83] J. Donoghue, A. A. Antonysamy, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, and P. B. Prangnell, “The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V,” *Mater. Charact.*, vol. 114, pp. 103–114, 2016, doi: 10.1016/j.matchar.2016.02.001.
- [84] P. Dryburgh *et al.*, “Spatially resolved acoustic spectroscopy for integrity assessment in wire–arc additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 28, no. March, pp. 236–251, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.04.015.
- [85] B. Wu *et al.*, “Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 250, no. July, pp. 304–312, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037.
- [86] X. Zhang, F. Martina, J. Ding, X. Wang, and S. W. Williams, “Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 40, no. 5, pp. 790–803, 2017, doi: 10.1111/ffe.12547.
- [87] W. Li and S. Kara, “An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: A case of turning process,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 225, no. 9, pp. 1636–1646, 2011, doi: 10.1177/2041297511398541.
- [88] L. Quintino, O. Liskevich, L. Vilarinho, and A. Scotti, “Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (GMAW),” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 9–12, pp. 2833–2840, 2013, doi: 10.1007/s00170-013-4862-8.
- [89] W. Engineering and L. P. Centre, “Deformation microstructures and

- strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling Jianglong Gu,” vol. 712, no. January, pp. 292–301, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2017.11.113.
- [90] B. Wu *et al.*, “A review of the wire arc additive manufacturing of metals : properties , defects and quality improvement A review of the wire arc additive manufacturing of metals : properties , defects and quality improvement,” *J. Manuf. Process.*, vol. 35, no. August 2018, pp. 127–139, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [91] G. Bi, A. Gasser, and K. Wissenbach, “Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding,” no. December, 2006, doi: 10.1016/j.optlaseng.2006.01.009.
- [92] L. Song and J. Mazumder, “Sensing and experimental base modeling of direct metal deposition,” pp. 449–454, 2006, doi: <https://doi.org/10.2351/1.5060768>.
- [93] J. Hofman, J. T., De Lange, D. F. and Meijer, “Camera base feedback control of the laser cladding process,” pp. 456–460, 2006, doi: <https://doi.org/10.2351/1.5060769>.
- [94] H. C. Leong, K. H., Ho, K. L. and Man, “Monitoring laser cladding,” pp. 895–899, 2005, doi: <https://doi.org/10.2351/1.5060478>.
- [95] P. Henckell, M. Gierth, Y. Ali, J. Reimann, and J. P. Bergmann, “Reduction of energy input in wire arc additive manufacturing (WAAM) with gas metal arc welding (GMAW),” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/ma13112491.
- [96] G. Sproesser, Y. J. Chang, A. Pittner, M. Finkbeiner, and M. Rethmeier, “Energy efficiency and environmental impacts of high power gas metal arc welding,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, no. 9–12, pp. 3503–3513, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-9996-7.
- [97] P. C. Priarone, E. Pagone, F. Martina, A. R. Catalano, and L. Settineri, “Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing,” *CIRP Ann.*, vol. 69, no. 1, pp. 37–40, 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.010.

- [98] V. Lunetto, P. C. Priarone, M. Galati, and P. Minetola, "On the correlation between process parameters and specific energy consumption in fused deposition modelling," *J. Manuf. Process.*, vol. 56, no. September 2019, pp. 1039–1049, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.06.002.
- [99] M. Froend, V. Ventzke, S. Riekehr, N. Kashaev, B. Klusemann, and J.ENZ, "Microstructure and microhardness of wire-based laser metal deposited AA5087 using an Ytterbium fibre laser," *Mater. Charact.*, vol. 143, no. May, pp. 59–67, 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2018.05.022.
- [100] G. Pardal, F. Martina, and S. Williams, "Laser stabilization of GMAW additive manufacturing of Ti-6Al-4V components," *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 272, no. November 2017, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.036.
- [101] S. Kara and W. Li, "Unit process energy consumption models for material removal processes," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 37–40, 2011, doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.018.
- [102] S. H. Yeo and K. G. Neo, "Inclusion of environmental performance for decision making of welding processes," vol. 82, pp. 78–88, 1998.



