



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di laurea magistrale

In

Advanced Manufacturing Technologies for Automotive Industry

**ANALISI DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA DI PROCESSI  
LASER CLADDING PER APPLICAZIONI INDUSTRIALI**

**Relatore:**

Chiar.mo Prof. Alessandro Fortunato

**Candidato:**

Davide Azzali

---

**Sessione IV**

**Anno accademico 2023/2024**

## Sommario

INTRODUZIONE .....	3
1. I CUSCINETTI A SOSTENTAMENTO .....	5
1.1 La lega antifrizione Babbitt .....	8
1.2 Metallografia e proprietà della lega .....	8
2. L'ATTUALE METODO PRODUTTIVO .....	12
3. L'ADDITIVE MANUFACTURING .....	20
3.1 Pro e contro della stampa 3D.....	21
3.2 Metal additive manufacturing .....	24
3.2.1 Laser Powder Bed Fusion .....	24
3.2.2 Material Jetting.....	26
3.2.3 Direct Energy Deposition .....	26
4. IMPIANTI DI LASER CLADDING ANALIZZATI .....	27
4.1 L'impianto Lincotek.....	27
4.2 L'impianto MELTIO .....	29
4.3 Valutazione degli ingombri .....	31
5. REALIZZAZIONE DEI PROVINI.....	33
5.1 Confronto con la letteratura .....	36
5.2 Prove meccaniche .....	38
5.2.1 Test di trazione - Meltio.....	40
5.2.2 Test di trazione - Lincotek .....	43
6. ANALISI DEI COSTI.....	44
6.1 Stima dei costi orari per Meltio e Lincotek .....	44
6.2 Raccolta dati .....	47
6.2.1 Il processo di saldatura .....	47
6.2.2 Il processo di centrifugazione .....	50
6.2.3 Il processo di colata a gravità.....	57

6.3	Risultati e stima annuale .....	59
7.	VALUTAZIONE DEI TEMPI DI IMPIEGO DEL MACCHINARIO .....	61
7.1	Stime dei tempi di operatività dell'impianto Meltio .....	61
7.2	Stime dei tempi di operatività dell'impianto Lincotek.....	62
8.	POSSIBILE ESPANSIONE DELL'OFFERTA PRODUTTIVA .....	63
9.	SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE .....	66
10.	CONCLUSIONI .....	67
11.	BIBLIOGRAFIA .....	69

## INTRODUZIONE

Il seguente elaborato espone un progetto di fattibilità tecnica ed economica riguardo l'utilizzo di un macchinario di deposizione laser, tra le quali il processo *direct energy deposition* (DED). Questa tesi è il sunto di un tirocinio svolto presso l'azienda EUROBEARINGS, con sede a Cortemaggiore, la quale si occupa della progettazione e produzione di cuscinetti di grandi dimensioni, destinati all'impiego in macchinari industriali voluminosi, spaziando dal settore energia (turbogas, vapore, nucleare ed idroelettrico) a grandi motori navali.

L'obiettivo di questa attività è valutare l'esistenza della convenienza economica nell'adottare un processo di *additive manufacturing*, in particolare il *laser cladding*, per depositare lo strato di materiale di usura all'interno dei cuscinetti. Il confronto verrà attuato tra le tecnologie già presenti all'interno dell'azienda e la tecnologia DED alimentata a polvere metallica o a filo continuo. L'eventuale acquisto di un nuovo macchinario, a seguito del risultato di questa analisi, non sostituirà quelli già presenti in azienda; per questo motivo viene data una importanza minore al tempo di produzione dei componenti che sarà, nella maggior parte dei casi, superiore a quello attuale.

La prima parte dell'elaborato è dedicata alla spiegazione del funzionamento e dei componenti dei cuscinetti trattati, seguita dalla ricerca in letteratura di informazioni riguardo la struttura metallografica e le proprietà superficiali di diverse leghe di Babbitt, il materiale di usura, oltre che l'indagine sull'esistenza di applicazioni di questa tecnologia che si siano rivelate efficaci nell'ambito relativo ai cuscinetti.

Il secondo capitolo descrive nel dettaglio le tre tecnologie adottate in azienda per la creazione del *coating* interno cuscinetti; è infatti necessario comprendere accuratamente le operazioni svolte nel ciclo produttivo per poter produrre un

affidabile studio di fattibilità. L'ultimo paragrafo espone le tecniche utilizzate nel controllo qualità.

Il capitolo successivo tratta un approfondimento sull'*additive manufacturing*, in particolare sulle tecnologie riguardanti la produzione di componenti metallici. Viene brevemente descritto il loro potenziale rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali evidenziando i punti di forza ma anche le principali limitazioni.

Il quarto capitolo espone le componenti e il funzionamento dei due impianti individuati per questo studio di fattibilità, elencando successivamente alcune considerazioni riguardo il possibile posizionamento degli stessi all'interno dei locali dell'azienda.

Nel quinto capitolo viene analizzata l'influenza di alcuni parametri di stampa nei processi di *laser cladding*. In seguito, vengono riportati i risultati delle prove meccaniche eseguite su provini normati per ottenere la conferma della validità tecnica del processo.

Il sesto capitolo è il cuore dell'elaborato: viene eseguito il confronto tra le varie tecnologie analizzando la convenienza dei processi a seconda delle dimensioni dei cuscinetti da realizzare. Come verrà di seguito esposto, i parametri cruciali che determinano la convenienza di una tecnologia rispetto all'altra sono le dimensioni dei manufatti da realizzare unite al volume di metallo bianco da depositare.

Il settimo capitolo espone una valutazione del tempo operativo del futuro impianto basata sull'attuale produzione, mentre nell'ottavo e nel nono paragrafo è brevemente analizzata la possibile espansione dell'offerta produttiva e l'impatto ambientale dell'adozione di una simile tecnologia.

Infine, nell'ultimo capitolo sono esposte le conclusioni di questo studio di fattibilità, evidenziando i miglioramenti ottenibili tramite un processo di ottimizzazione dei parametri e le ulteriori possibili applicazioni di tale tecnologia.

# 1. I CUSCINETTI A SOSTENTAMENTO

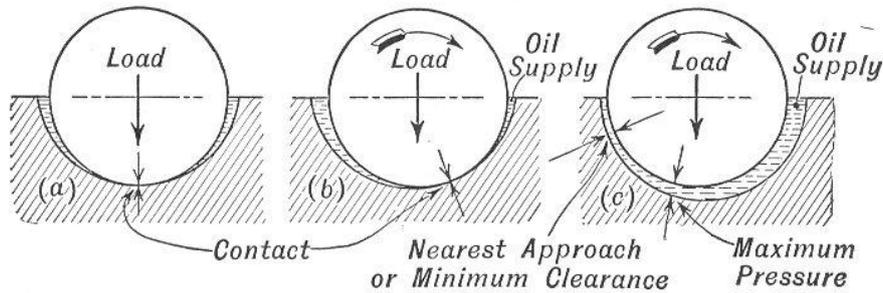
La società EUROBEARINGS s.r.l. è specializzata nella creazione di cuscinetti rivestiti con leghe antifrizione a base di stagno destinati ad applicazioni nel mercato della produzione di energia. L'azienda è in grado di eseguire la revisione e la produzione dei cuscinetti, partendo da disegni tecnici già definiti o progettando integralmente i componenti su specifiche del cliente. Nei macchinari destinati alla produzione di energia vengono principalmente utilizzati cuscinetti a film d'olio, cioè cuscinetti formati da una carcassa esterna, tipicamente in acciaio, e una parte di materiale destinato ad usurarsi in caso di contatto con l'albero per evitare danni a quest'ultimo. In caso di corretto funzionamento, l'albero e il rivestimento antifrizione non entrano mai in contatto, in quanto i due corpi sono separati da uno strato di fluido, tipicamente olio, che sorregge la parte rotante. I cuscinetti possono essere assiali, combinati o radiali a seconda della direzione del carico da sostenere. In figura si possono osservare le 3 tipologie sopra elencate.



**Figura 1:** *Tipologia di cuscinetti*

L'azienda produce due tipi di cuscinetti radiali, idrodinamici e idrostatici, che si differenziano per la presenza o meno di pompe atte a mantenere un film di lubrificante costante anche quando la velocità dell'albero è prossima allo zero. Nei cuscinetti radiali idrodinamici, la spinta fluidodinamica è causata solamente dal

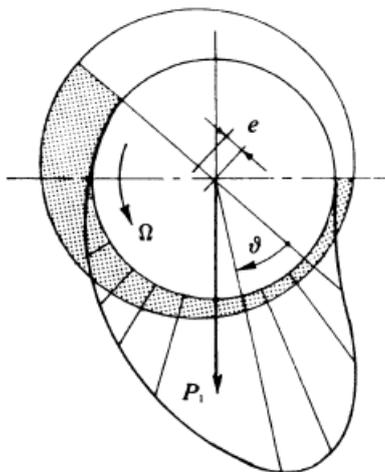
moto relativo tra l'albero e la sua sede. L'organo in movimento trascina con sé il meato creando un gradiente di pressione che supporta il carico.



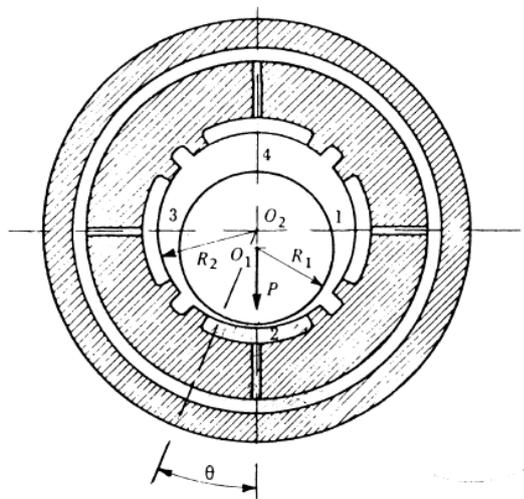
**Figura 2:** Funzionamento dei cuscinetti radiali idrodinamici

Sovente, il meato non avvolge l'albero lungo tutta la sua circonferenza e la distribuzione della pressione assume un andamento simile a quello rappresentato in figura 3. Il lubrificante viene immesso tramite canali in punti in cui vi è bassa pressione, come nella sommità del cuscinetto; le pompe utilizzate in questo caso non sono sufficienti per sviluppare una forza elevata e contribuiscono solo alla adeguata lubrificazione dell'organo in movimento. Per questa tipologia di cuscinetti, l'albero subisce un disassamento rispetto all'asse del supporto; questa eccentricità è proporzionale alla geometria della sede, alle caratteristiche del lubrificante e alla velocità di rotazione.

Nel caso di cuscinetti radiali idrostatici, l'olio viene immesso tramite fori o pozzetti posizionati alla base della sede dell'albero e assicurano la presenza di un film di lubrificante costante, attraverso pompe ad alta pressione. L'olio in eccesso defluisce tramite canali posti tipicamente a metà dell'altezza del cuscinetto. Ad alte velocità la spinta idrodinamica può prevalere quella idrostatica. I cuscinetti idrostatici sono principalmente impiegati in applicazioni in cui l'organo rotante ha velocità angolare prossime o uguali allo zero oppure sono presenti numerosi stop e ripartenze.

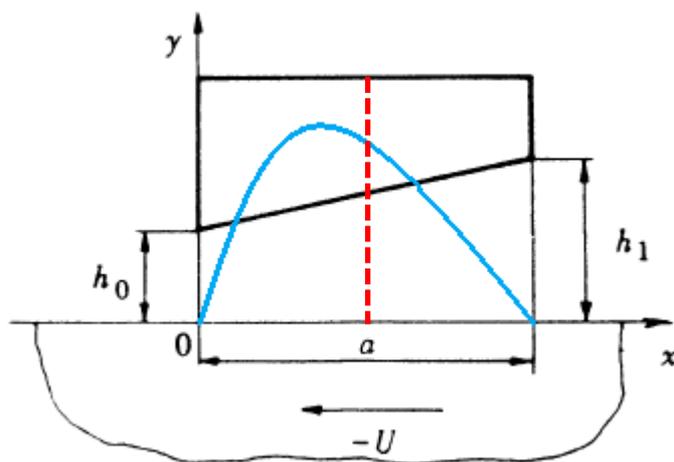


**Figura 3:** *Distribuzione delle pressioni*



**Figura 4:** *Cuscinetto idrostatico*

Nei cuscinetti assiali, i pattini reggispinta sono posizionati sulla circonferenza del foro del cuscinetto e la loro inclinazione determina la differenza di pressione, e di conseguenza la spinta, che riescono a generare. Questo caso è comparabile al modello del meato limitato da due pareti piane, raffigurato in figura 5. La distribuzione della pressione (rappresentata dalla parabola di colore azzurro) presenta il suo picco, equivalente alla posizione della risultante, spostata di una quantità  $e$  rispetto alla mezzeria. Definito  $m$ , pari al rapporto tra la differenza delle altezze  $h_1$  e  $h_0$  e l'altezza  $h_0$ , il valore massimo della risultante delle pressioni si ha quando questo parametro misura all'incirca 1.



**Figura 5:** *Andamento delle pressioni in un pattino ideale*

I pattini possono essere fissi o orientabili tramite perno; in quest'ultimo caso, l'eccentricità è fissata per costruzione e di conseguenza lo è anche la posizione della risultante. Questa soluzione è preferibile in quanto permette un range di adattamento agli errori di esecuzione e di allineamento della coppia, mantenendo un più efficiente comportamento fluidodinamico [1].

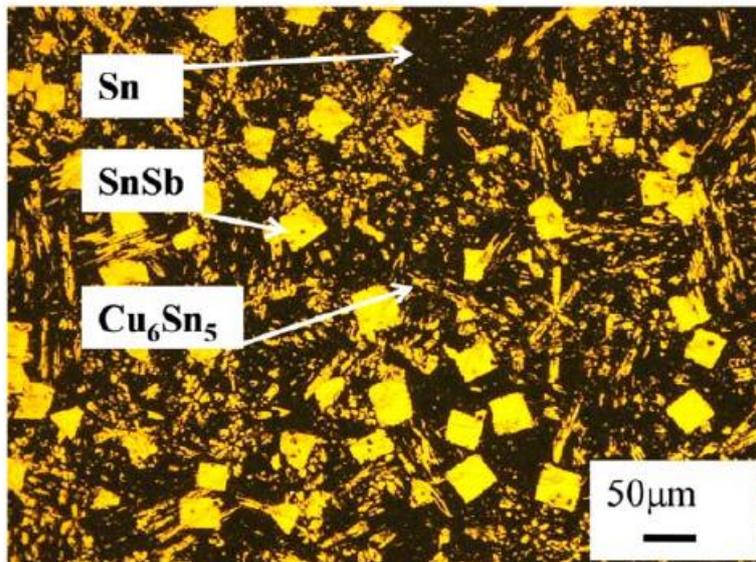
### ***1.1 La lega antifrizione Babbitt***

Il materiale antifrizione depositato sul diametro interno dei cuscinetti o sui pattini di spinta, a seconda della tipologia di cuscinetto, è una lega a base di stagno denominata Babbitt o metallo bianco. Questo materiale prende il nome dal suo inventore, Isaac Babbitt, un ingegnere metallurgico americano che la brevettò nel 1839. La composizione originale corrisponde a quella descritta dalla norma ASTM B-23 Grade 2 Babbitt ed è formata dall'89,3% di stagno, 7,2% di antimonio e dal 3,6% rame [2]. La particolarità di questo materiale è il basso valore di attrito, una ottima duttilità che, unita ad una durezza superficiale moderata, lo rende idoneo all'utilizzo nei cuscinetti. Negli anni sono state create varianti comprendenti altri materiali, quale zinco e nickel, in grado di migliorare certe caratteristiche della lega. Al giorno d'oggi esistono due principali tipologie di metallo bianco: quella in cui il piombo rappresenta almeno l'80% della composizione della lega e quella composta principalmente dallo stagno, nei medesimi rapporti.

### ***1.2 Metallografia e proprietà della lega***

L'azienda Eurobearings utilizza un metallo bianco a base di stagno caratterizzato da un basso punto di fusione, intorno ai 250 gradi centigradi, ed una densità pari a circa 7,35 kg/dm<sup>3</sup>. La microstruttura tipica di questa lega è formata da una matrice

di stagno ( $\alpha$ -Sn) unita a cristalli composti da stagno e antimonio (SnSb) o rame e stagno ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) con una durezza molto più elevata rispetto alla matrice [3].



**Figura 6:** metallografia del Babbitt a base di stagno

La capacità principale da ricercare per creare un ottimo rivestimento antifrizione, oltre al basso coefficiente di frizione, è la resistenza all'usura; questa caratteristica dipende dalla durezza superficiale, dalla struttura metallografica della lega e dalla tenacità del materiale: maggiore è la durezza migliore è la capacità di resistere all'abrasione mentre la duttilità, influenzata anche dal modulo elastico, consente di limitare la propagazione di cricche nel materiale [4].

Per aumentare la durezza superficiale, si può agire intervenendo sulla velocità di raffreddamento della lega oppure attraverso la variazione della composizione della lega; quest'ultima opzione può influire anche su altre caratteristiche meccaniche.

Analizzando la letteratura disponibile è emerso che aumentando la velocità di solidificazione e quindi riducendo i tempi di raffreddamento, i composti SnSb e  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  diminuiscono di dimensione creando una microstruttura più fine e quindi un miglioramento delle proprietà meccaniche [5] [6]. Questa proprietà ben si sposa con la procedura di *laser cladding*, caratterizzata da tempi di solidificazione molto brevi in quanto il materiale viene depositato in piccole quantità e la fonte di calore (il laser) è concentrata in uno spot nell'ordine di qualche millimetro. La tecnologia e

il funzionamento del *direct energy deposition* verrà trattato nel dettaglio in un capitolo successivo. Un aspetto da tenere in considerazione per valutare l'efficacia del laser in questi processi è il rateo di assorbimento (o *absorption rate*) del materiale in lavorazione. Quando un fascio laser colpisce la superficie di un materiale, l'energia dei fotoni può essere assorbita, riflessa o trasmessa, a seconda delle caratteristiche della sostanza, in particolare:

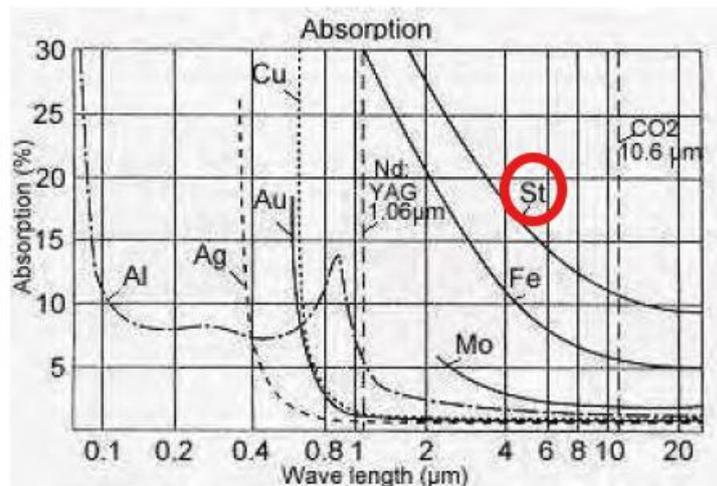
- Per materiali opachi:

$$\text{RIFLETTIVITÀ} = 1 - \text{ASSORBIMENTO}$$

- Per materiali trasparenti:

$$\text{RIFLETTIVITÀ} = 1 - (\text{ASSORBIMENTO} + \text{TRASMISSIONE})$$

Tipicamente un laser con una lunghezza d'onda (indicata con  $\lambda$ ) corta riesce a trasmettere più energia a parità di potenza, ma ogni materiale presenta valori del coefficiente di assorbimento variabile in base a  $\lambda$ . Nel caso del babbitt si può approssimare il suo *absorption rate* con quello dello stagno, l'elemento principale all'interno della lega. L'andamento del valore del coefficiente è osservabile nella figura seguente, dove sono indicati anche i valori degli altri elementi e le lunghezze d'onda tipiche dei laser a diodi e a CO<sub>2</sub>.



**Figura 7:** Andamento dei coefficienti di assorbimento in base al materiale e alla lunghezza d'onda del laser [7]

Per quanto riguarda la composizione chimica, una percentuale di zinco pari all'1,5% è il valore ottimo per poter aumentare la resistenza a trazione e l'adesione ad acciai a basso contenuto di carbonio. Aumentando la quantità di zinco oltre la percentuale riportata, il metallo bianco perde di duttilità diventando più fragile e quindi non più idoneo all'applicazione come materiale di usura all'interno dei cuscinetti [8].

Questa ricerca in letteratura sarà utile per l'orientamento nella scelta del materiale da acquistare per il processo, oltre a fornire un modello con cui confrontare le analisi metallografiche che verranno eseguiti sui provini.

## 2. L'ATTUALE METODO PRODUTTIVO

Prima di procedere con uno studio di fattibilità per l'acquisto di una nuova tecnologia di produzione, è bene comprendere e analizzare i metodi attualmente utilizzati dall'azienda per evidenziare gli aspetti negativi e positivi, oltre a raccogliere dati ed informazioni utili al successivo confronto con l'*additive manufacturing*.

I cuscinetti vengono prodotti, al momento, tramite tre processi di seguito elencati:

- Tramite **centrifugazione**. Utilizzata per diametri interni maggiori di 250 mm e fino a diametri esterni pari a 2230 mm, in questo caso la carcassa del cuscinetto radiale, tipicamente composta da due semicirconferenze, viene assemblata interponendo un laminato di materiale polimerico tra le due metà, così da renderla nuovamente scomponibile una volta eseguito il processo. Il cuscinetto viene poi fissato a due flange di acciaio, uno per ogni lato del medesimo. Per evitare la fuoriuscita di metallo bianco durante la centrifugazione, vengono posti dei cordoni isolanti realizzati in lana di vetro che verranno poi compressi tra i dischi e la carcassa.

Tutto l'insieme viene poi posizionato su di un mandrino con asse di rotazione orizzontale. Nel centro della contropunta è presente un canale di colata che si collega ad un adeguato foro presente in uno dei due dischi di acciaio. Attraverso questa apertura verrà colato il babbitt all'interno del cuscinetto. Il cuscinetto viene riscaldato esternamente tramite l'utilizzo di vari cannelli alimentati a propano fino a raggiungere una temperatura prestabilita. Questo processo è necessario per poter attivare il composto chimico precedentemente depositato sulla superficie che ospiterà il metallo bianco, aumentando così l'adesione tra il materiale base e quello depositato. Il periodo di riscaldamento è discretamente lungo ed è l'attività che occupa più tempo all'interno dell'intero processo. Una volta raggiunta la temperatura desiderata, i lingotti di metallo bianco precedentemente fusi nel

crogiolo a bordo macchina vengono trasferiti all'interno del cuscinetto, il quale ruota ad una velocità dipendente dalla dimensione del suo diametro e in ogni caso mai superiore ai 450 rpm. La forza centrifuga permette al materiale di disporsi in egual misura sulla superficie creando uno spessore uniforme e compatto. Una volta concluso il processo di colata, il manufatto viene raffreddato esternamente da numerosi getti d'acqua per ridurre al minimo i tempi di solidificazione. Infine, viene rimosso l'eccesso di babbitt con una tornitura interna.

Di seguito viene riportato un fotogramma del sinottico della centrifuga, in cui è possibile individuare tutte le componenti elencate precedentemente.

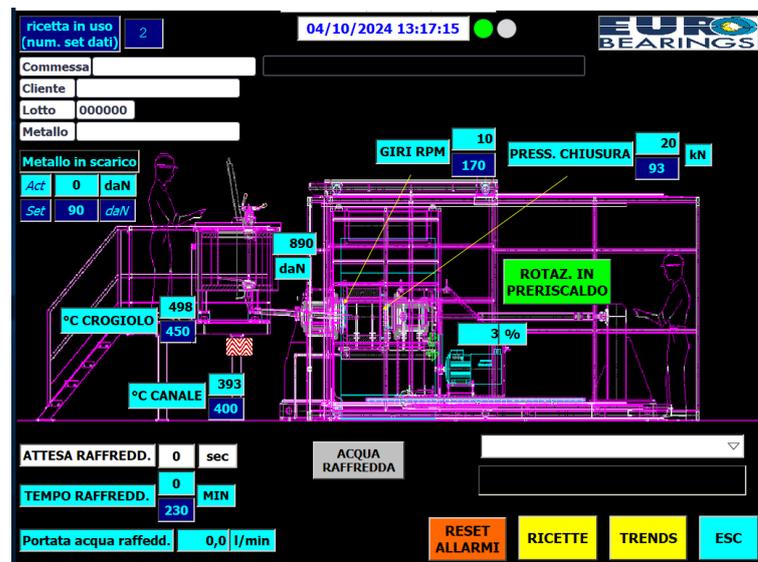


Figura 8: Sinottico della centrifuga

- Tramite **colata per gravità**. Questo processo viene principalmente utilizzato nel caso di cuscinetti radiali con diametro inferiore ai 250 millimetri o per la realizzazione dei pattini dei cuscinetti assiali. Il processo di preparazione dei cuscinetti radiali è il medesimo rispetto a quello della centrifuga, con la differenza che la struttura interposta tra le due semicirconferenze è coesa ad un cilindro in modo da diminuire la quantità di metallo bianco necessario e permettere la successiva tornitura del

diametro interno. Viene successivamente colato il metallo bianco mantenendo la base del cuscinetto esposta ad una fiamma; in questo modo la parte inferiore impiega più tempo per solidificare e le impurità presenti nel materiale colato possono salire verso la superficie dove poi verranno rimosse. Infine, la struttura viene raffreddata nel modo più uniforme possibile utilizzando l'acqua.

Nel caso di pattini, viene saldato un lamierino lungo il perimetro del componente che fungerà da contenimento per il babbitt. Anche in questo caso tutta la superficie viene cosparsa con l'agente attivante, dopodiché tutto il corpo viene riscaldato ad una determinata temperatura. Viene effettuata la colata e sopra al pattino viene appoggiata una lastra spessa di acciaio preriscaldata alla temperatura di 600 gradi. Questa lastra consente di ritardare la solidificazione della superficie superiore, consentendo alle impurità di risalire in superficie attraverso il metallo bianco mentre l'insieme viene raffreddato flussando acqua dal basso. Successivamente viene asportata parte della superficie inquinata dalle impurità raccolte in superficie.



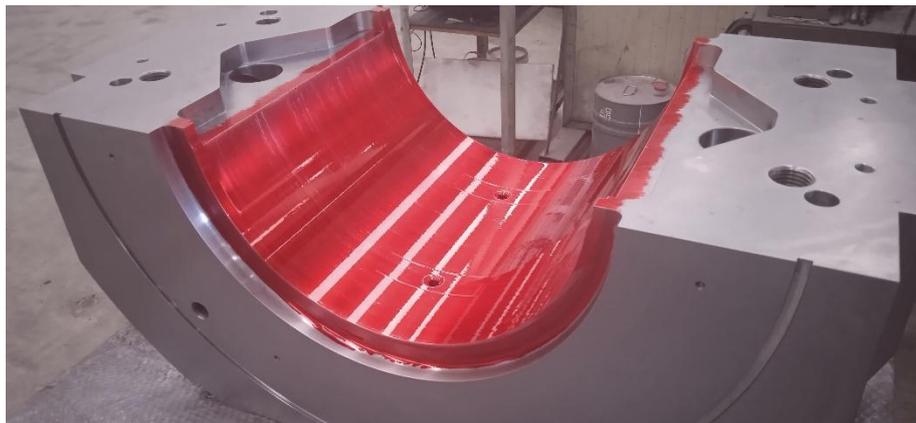
**Figura 9:** *Parte del processo di produzione dei pattini*

- Tramite **saldatura manuale**. Per i cuscinetti radiali con diametri oltre i 2,2 metri, spesso la superficie a contatto con l'albero viene suddivisa in più parti, tipicamente da cinque a salire. Queste parti vengono chiamate anch'esse pattini, pur non appartenendo a cuscinetti assiali. Ogni pattino può pesare fino a otto tonnellate e viene movimentato all'interno dell'azienda tramite l'utilizzo di un carro ponte. Un operatore specializzato, utilizzando una particolare saldatrice, fonde il metallo bianco direttamente sulla superficie da rivestire. Il materiale antifrizione utilizzato in questo caso è sottoforma di barre lunghe e dal diametro di circa un paio di centimetri, in pratica come se fosse un elettrodo nel tipico processo di saldatura. Il pattino viene inclinato durante il processo per mantenere la superficie da saltare il più orizzontale possibile, evitando così che il materiale coli e che lo spessore depositato sia il più possibile costante. Essendo un processo manuale, lo strato di rivestimento depositato necessita spesso di correzioni e aggiustaggi, rendendolo un metodo dispendioso in termini di tempo e particolarmente gravoso fisicamente per l'operatore.



**Figura 10:** *Pattini prodotti per saldatura in rapporto alle dimensioni di un operaio*

Ogni cuscinetto realizzato viene sottoposto a rigorosi controlli di qualità per verificare, oltre alle tolleranze geometriche e dimensionali, la presenza di difetti o vuoti all'interno dello strato di materiale antifrizione depositato. Per controllare la difettosità superficiale nello strato di babbitt depositato, viene utilizzato un particolare liquido penetrante di colore rosso che viene distribuito sulla superficie da analizzare.



**Figura 11:** *Test al liquido penetrante*

Trascorso un determinato periodo di tempo, il liquido viene rimosso e la superficie pulita. Nel caso della presenza di pori superficiali, il liquido penetrante rende quest'ultimi visibili ad occhio nudo e più facilmente individuabili grazie anche all'utilizzo di un rivelatore composto da una polvere bianca. La verifica risulta superata se le dimensioni e la numerosità delle imperfezioni risultano inferiori ad un valore stabilito tramite normativa o dalla azienda cliente.



**Figura 12:** *Difetti evidenziati a seguito dell'analisi di qualità*

Per analizzare la parte interna viene utilizzato uno strumento che sfrutta le onde sonore: queste onde hanno una precisa frequenza all'interno del materiale ma varia quando incontrato un vuoto o una superficie non uniforme; il sensore rileva l'eco di queste onde e rende fattibile l'individuazione dei difetti. Non è possibile eseguire il controllo nelle zone di bordo delle superfici di scorrimento, sui lati delle flange, nelle aree di giunzione, nei fori dell'olio, nelle scanalature, ecc., in un raggio inferiore alla metà del diametro della sonda ultrasonica a causa di riflessioni non definite. Lo stesso vale per i cuscinetti che presentano una lavorazione a coda di rondine nell'interfaccia tra acciaio e metallo bianco: il controllo ultrasonico della giunzione non si applica lungo i bordi delle scanalature. La superficie del campione deve essere precedentemente lavorata per ottenere una rugosità superficiale Ra pari o inferiore a 0,5 micrometri e adeguatamente sgrassata e pulita da eventuali residui di lavorazione. Prima di eseguire la misurazione, lo strumento viene tarato usando un campione di materiale privo di difetti; passando il sensore sulla superficie, il segnale di eco causato dalla superficie di giunzione visualizzato sullo schermo deve avere un picco con altezza pari all'incirca al 20% dell'altezza dello schermo. In caso di rilevazione della presenza di difetti, si visualizzeranno a schermo numerosi picchi di altezza decrescente [9].



**Figura 13:** *Strumento per l'analisi ad ultrasuoni*

Nella normativa ISO 4386-1:2019(E) è riportata anche una classificazione della possibile difettosità (Tabella 1). Il range di tolleranza è tipicamente specificato dall'azienda cliente.

Defect group	Maximum areal dimension of single defects	Maximum total defect
	mm <sup>2</sup>	Percentage of bonding area <sup>a</sup> %
A	0	0
B1	0,75b <sup>b</sup>	1
B2	2b <sup>b</sup>	1
C	2b <sup>b</sup>	2
D	4b <sup>b</sup>	5

<sup>a</sup> The bonding area is the lined area of a journal bearing or a thrust plain bearing element.

<sup>b</sup> The width, *b*, in millimetres represents, in case of journal bearing, the functional cylindrical length and, in the case of thrust segments or rings, the distance between the inner and outer diameter. The summary of single defects may not exceed the maximum total defect size.

**Tabella 1:** *Differenziazione dei difetti in base alla normativa*

### 3. L'ADDITIVE MANUFACTURING

Con il termine *additive manufacturing* si intende un tipo di processo di produzione che crea il manufatto finale aggiungendo materiale, a differenza delle più comuni tecnologie di produzioni in cui si ottiene l'oggetto finale asportando materiale in eccesso da una forma di partenza. Questa tecnica viene comunemente chiamata "Stampa 3D" ed è spesso utilizzata per la prototipazione rapida, cioè nei casi in cui si vuole ottenere una prima bozza del prodotto finito senza dover affrontare i costi che comporterebbe una realizzazione in grande serie. Il punto di forza di questa tecnologia risiede nella semplicità di realizzazione del manufatto e nel risparmio di materiale. Tutto il processo parte spesso da un modello 3D realizzato tramite CAD (*computer aided design*) che viene poi esportato in un file in formato .STL, cioè viene creata una mesh chiusa composta da punti collegati tra loro per formare tipicamente triangoli (o raramente quadrilateri). Maggiore è il numero di punti sulla superficie e maggiore è il grado di approssimazione del modello. Il file in questo formato è successivamente elaborato con un software che lo approssima ulteriormente creando strati paralleli al piano di stampa. Questi software prendono il nome di *slicer*, letteralmente "affettatrice", e ultimamente vengono incorporati negli stessi programmi CAD, sintomo della sempre maggiore diffusione. Anche in questo caso, minore è lo spessore di questi strati e maggiore è la qualità della discretizzazione. Aumentando il numero di strati aumenta proporzionalmente il tempo di realizzazione del componente e bisogna prestare attenzione a non superare i vincoli tecnologici del macchinario in uso. Bisogna evidenziare anche che livelli con spessore maggiore creano tipicamente un manufatto con una qualità superficiale inferiore, contribuendo ad accentuare l'aspetto "a gradini" tipico di alcune stampe 3D [10].

### ***3.1 Pro e contro della stampa 3D***

Rispetto al processo tradizionale, l'*additive manufacturing* consente spesso di svolgere tutto il processo di lavorazione all'interno dello stesso macchinario. Solo in pochi casi il manufatto necessita di ulteriori lavorazioni, in particolare:

- Utilizzo di resine e necessità di completare il processo di reticolazione con apporto di calore. Questo processo prende il nome di *curing* ed è comune per i manufatti realizzati in materiale polimerico;
- Per la rimozione di eventuale supporto necessario durante la stampa;
- Per aumentare la qualità superficiale riducendo l'effetto "a scalini" creato con la suddivisione a strati;
- Creazione di filettature e rispetto di altre tolleranze dimensionali non raggiungibili con la qualità della stampa.

Il maggiore vantaggio di questa tecnologia è la possibilità di creare geometrie complesse non realizzabili con altre tecnologie. Si può produrre, ad esempio, canali interni per il passaggio di fluidi, come quelli visibili in foto:

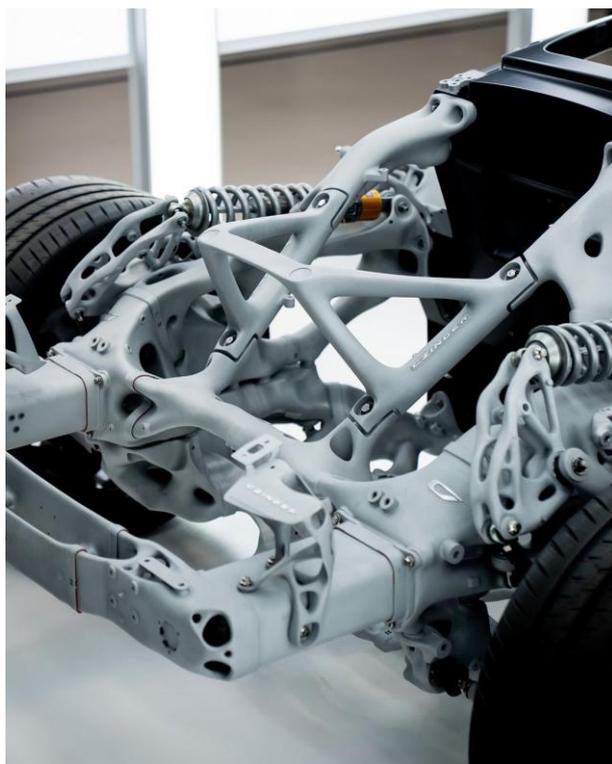


**Figura 14:** *Condotti di raffreddamento realizzati tramite stampa 3D (foto di proprietà di Meltio)*

L'unico vincolo da rispettare per creare queste forme interne è l'inclinazione delle pareti: esiste un valore massimo dell'inclinazione in cui non è necessaria la creazione di supporti per sorreggere il materiale; per questo motivo i fori in foto hanno la forma simile a gocce.

Si può modellare la superficie del manufatto ottenendo trame con funzionalità specifiche, come consentire una miglior adesione con eventuali materiali da applicare come riporto.

Questa tecnologia esprime il suo massimo potenziale se utilizzata per realizzare componenti soggetti ad un processo di ottimizzazione topologia. L'ottimizzazione topologica è una tecnica che consente, attraverso simulazioni agli elementi finiti, di utilizzare la minore quantità possibile di materiale, andando a disporlo solo dove è necessario, in base ai vincoli e alle forze applicate in fase di progettazione. Il prodotto di questo metodo è tipicamente un solido con forme trabecolari, difficilmente ottenibile con i classici metodi di produzione. Il manufatto risulta quindi il più leggero possibile; ne è un esempio l'automobile 21C prodotta dalla Czinger, con diverse parti strutturali create attraverso l'*additive manufacturing*. Nel campo automobilistico la leggerezza è una caratteristica sempre ricercata per aumentare il rapporto peso-potenza, migliorare la dinamica di guida e diminuire i consumi.



**Figura 15:** *L'innovativo telaio della Czinger 21C*

Infine, un aspetto positivo da non trascurare è la quantità di materiale risparmiato rispetto ad un processo tradizionale e la quasi totale assenza di scarti di lavorazione. Questo aspetto consente di ridurre i costi di produzione e prototipazione, oltre a rendere il processo nel complesso meno impattante sull'ambiente, coerentemente con gli obiettivi recenti di ridurre le emissioni globali e diminuire lo spreco di risorse.

Esistono comunque lati negativi di questa tecnologia, come ad esempio il grado di tolleranza massimo ottenibile, a causa della forma approssimata per strati. Anche il costo dell'impianto e della sua manutenzione può essere una barriera all'utilizzo di questi macchinari per aziende con una insufficiente capacità di investimento ma si prevede una diminuzione dei prezzi con la maggiore diffusione, come accade per ogni altra tecnologia.

La limitazione principale della stampa 3D è la velocità di realizzazione degli oggetti. A causa della logica stessa di funzionamento, il rateo di materiale depositato e la velocità di creazione degli strati dipende fortemente dallo spessore di questi

ultimi. La produttività di questa tecnologia inizialmente non era in grado di reggere il confronto con le tradizionali tecniche di asportazione di truciolo quindi il campo di applicazione era tipicamente limitato alla prototipazione rapida o alla produzione di piccoli lotti. Negli ultimi anni, grazie all'ottimizzazione e allo sviluppo di questa tecnologia, la stampa 3D può essere utilizzata anche nelle produzioni in serie ma rimane specialmente adatta quando il prodotto necessita di una forte personalizzazione in base alle richieste del cliente. È questo il caso della azienda Eurobearings, in cui non esistono prodotti standardizzati a catalogo ma ogni commessa è diversa dalle altre, in base ai vincoli imposti dall'utente finale.

Essendo un settore recente e ancora in fase di ricerca, è molto probabile che in futuro le performance degli impianti migliorino, permettendo così di ampliare il range di applicazione di questa tecnologia ad ulteriori settori e di incrementare la produttività nei campi in cui l'*additive manufacturing* è già utilizzato.

Nell'ultimo decennio la proliferazione di questa tecnologia è merito anche della scadenza di alcuni brevetti, come accaduto per la FDM (*Fused Deposition Modeling*); in futuro si prevede una possibile ulteriore diffusione quando decadranno ulteriori diritti di proprietà intellettuale.

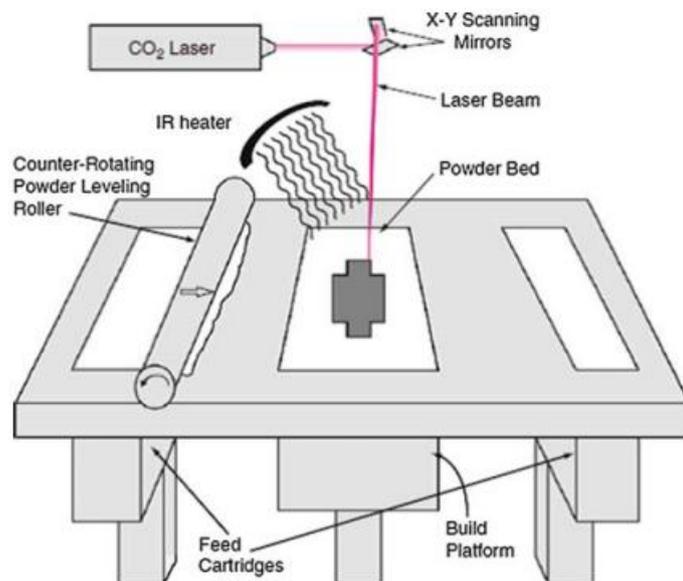
### ***3.2 Metal additive manufacturing***

L'ambito di interesse dell'AM di questa tesi è quello rilegato all'utilizzo di materiali metallici, denominata metal additive manufacturing. Le tipologie principali di processi in questo settore sono tre e verranno di seguito esposte [11].

#### ***3.2.1 Laser Powder Bed Fusion***

Il *Laser Powder Bed Fusion* (L-PBF) è una variante del PBF in cui la fonte di energia per creare il manufatto è fornita da un laser. Il macchinario è tipicamente composto da tre regioni ed utilizza polvere metallica; la prima parte funge da contenitore per la polvere, può essere preriscaldato e durante la stampa un pistone posto sul fondo del recipiente sposta il materiale verso l'alto. Sulla superficie, un rullo porta il materiale dalla prima zona a quella di stampa, depositando uno strato con una altezza precisa e calibrata. L'eccesso viene trascinato fino alla terza regione, dove un ulteriore contenitore lo raccoglie e ne consente il futuro riutilizzo.

Il laser sinterizza una porzione delle polveri presenti nella superficie di stampa, creando una sezione del componente da realizzare. Alla fine dell'operazione, il piano si abbassa di una altezza pari a quella del *layer* successivo e il processo ricomincia. In questo processo bisogna recare molta attenzione alla diffusione e allo smaltimento del calore prodotto durante la sinterizzazione; infatti, la principale via di raffreddamento è rappresentata dal contatto con l'iniziale piano di stampa mentre il raffreddamento per conduzione attraverso la polvere circostante non sempre è sufficiente a causa dei gas intrappolati all'interno che hanno una conduttività termica decisamente inferiore al metallo. Questo aspetto comporta due importanti conseguenze: la necessità di creazione di supporti per favorire lo smaltimento di calore e il possibile effetto di ritiro del materiale causato dall'espulsione dell'aria. Se non vengono adeguatamente considerate queste conseguenze, si può incorrere in problemi di delaminazione e cricche derivati dalla presenza di tensioni residue nel manufatto. Infine, se esistono geometrie interne chiuse vuote nel modello di partenza, queste rimarranno piene di polvere metallica.



**Figura 16:** *Schema del processo L-PBF*

### 3.2.2 Material Jetting

Il processo di *material jetting* consiste nella deposizione di piccole quantità di materiale fuso attraverso ugelli, concettualmente simile alla stampa a getto di inchiostro. Tipicamente questa tecnica viene usata per materiali polimerici, ma ci sono casi di applicazione che utilizzano metalli o leghe basso fondenti. La temperatura massima del fuso non può superare certe soglie limite per evitare il danneggiamento del sistema di alimentazione e del delicato ugello, limitando i materiali utilizzabili. Con il *material jetting* si possono creare oggetti con una risoluzione elevata, tra le più alte nell'ambito *additive manufacturing*, ma ciò comporta tempi di stampa considerevoli e dimensioni molto ridotte.

### 3.2.3 Direct Energy Deposition

Con il termine *direct energy deposition* (DED) si indicano quei processi che utilizzano una fonte di energia (come laser, arco elettrico o plasma) per depositare il materiale su di un substrato. A differenza del PBF, non è necessario creare un *layer* che solo in seguito verrà fuso, infatti il materiale viene convogliato direttamente nel punto di deposizione. Questa tecnologia può essere alimentata tramite polvere metallica o filo. La descrizione dettagliata dei componenti tipici di questi macchinari e il loro funzionamento verrà trattata nel successivo capitolo, in quanto lo studio di fattibilità confronterà due impianti appartenenti a questa categoria.

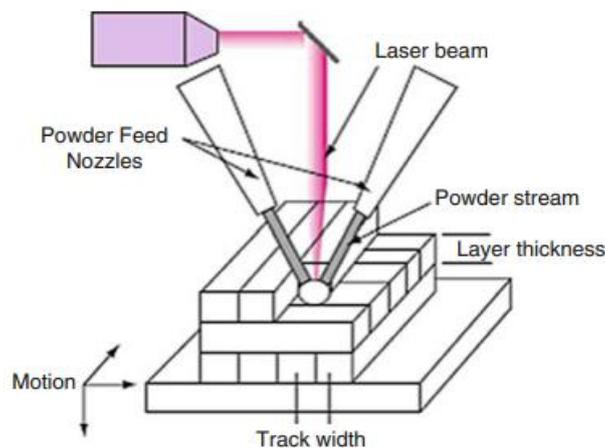


Figura 17: Schema del processo DED

## 4. IMPIANTI DI LASER CLADDING ANALIZZATI

In questa analisi di fattibilità verranno analizzate due tipologie di impianto di *laser cladding*, entrambe fornite di laser come fonte di energia ma con leggere differenze.

Dopo una iniziale valutazione delle offerte presenti sul mercato, si è deciso di approfondire quella dell'azienda Lincotek, con sede produttiva a Collecchio (PR), e l'offerta di Overmach (PR), rivenditore della tecnologia spagnola MELTIO 3D

### 4.1 L'impianto Lincotek

Lincotek propone un impianto che utilizza polvere metallica come materiale d'apporto. L'apparato che si occupa di fornire alla testa di deposizione il quantitativo di polvere necessario è chiamato dosatore ed è composto da un cabinet metallico sul quale sono collocati due corpi cilindrici che fungono da serbatoio per il materiale d'apporto. Entrambi i cilindri sono riscaldati tramite una fascia ad una temperatura che può variare tra i 40 e gli 80 gradi centigradi, necessario per diminuire al minimo l'umidità e limitare difetti nello strato depositato. Alla base dei due cilindri è presente un disco rotante di materiale plastico che preleva una quantità di materiale proporzionale alla velocità di rotazione dello stesso.



Figura 18: Alimentatore delle polveri

La polvere viene successivamente inviata agli iniettori tramite tubi flessibili antistatici per evitare aggregazioni di materiale e rendere più omogeneo il flusso. Gli iniettori sono posizionati attorno al fascio laser in modo da creare un cono che lo avvolga e che concentri il getto nello spot di deposizione. Se si adottasse un solo iniettore, il materiale d'apporto depositato varierebbe in base alla propria posizione rispetto alla direzione del laser: un flusso che anticipa il laser avrebbe un rateo di deposizione differente in confronto al caso in cui lo seguisse. Aumentando la velocità del getto è possibile depositare il materiale anche su superfici inclinate, fino a 45 gradi nel caso in analisi.

Una unità ausiliaria si occupa di fornire il gas di protezione durante il processo, in questo caso Argon. Questo gas inerte ha un peso specifico maggiore di quello dell'aria, permettendogli di avvolgere lo spot di deposizione ed evitando possibili reazioni di ossidazione.

La sorgente laser è fornita dall'azienda IPG Photonics, serie YLS 6000, composta da un laser allo stato solido, pompata attraverso i diodi e trasportata in una fibra di diametro pari a 50  $\mu\text{m}$ , in grado di produrre un fascio con una lunghezza d'onda pari a 1,07  $\mu\text{m}$  avente BPP (*Beam Parameter Product*) uguale a 2 mm\*mrad. Il fascio laser ha una potenza modulabile e può raggiungere i 6 kW.

Il fascio laser, le polveri e il gas si uniscono in un flusso concentrico nella testa di deposizione. All'interno di questo elemento ci sono le lenti di collimazione e focalizzazione, necessarie per settare la distanza del focus e il diametro dello spot laser. In questo caso la distanza focale è pari a circa 25 mm e lo spot ha un raggio di variabile tra 1,8 e 3,2 mm. Nel punto di focalizzazione convergono anche i flussi delle polveri metalliche e del gas di protezione. Tipicamente il focus è posto leggermente al di sotto del piano di deposizione per aumentare la quantità di materiale base fuso e consentire una migliore aggregazione con il materiale d'apporto che fonde una volta raggiunta la *melt pool*; l'unico caso in cui lo spot laser non è in questa posizione è all'inizio del processo perché è necessario una maggior quantità di calore per liquefare la prima zona di metallo. Il fascio laser può avere un moto di *wobbling*, cioè un percorso assimilabile ad un otto che aiuta a distribuire meglio l'energia durante il processo. Per impostare al meglio i parametri

di stampa, bisogna tenere in considerazione la sovrapposizione delle passate, tipicamente pari al 25%, necessaria per evitare la formazione di “gobbe” ed ottenere uno strato il più piano possibile.



**Figura 19:** *Testa di deposizione*

Il calore prodotto durante la lavorazione dalla sorgente laser è smaltito attraverso un macchinario denominato *chiller*, mentre la polvere metallica che non viene depositata (il processo di deposizione ha una efficienza del 85%) e che si libera in cabina viene filtrata attraverso un impianto posto all'esterno del capannone e con una portata massima possibile pari a 5000 m<sup>3</sup>/h. Sono presenti altri apparati ausiliari al di fuori della cabina, come il quadro elettrico, il sistema PLC e la console di controllo da cui l'operatore può impostare i parametri di processo e controllare il braccio Robot.

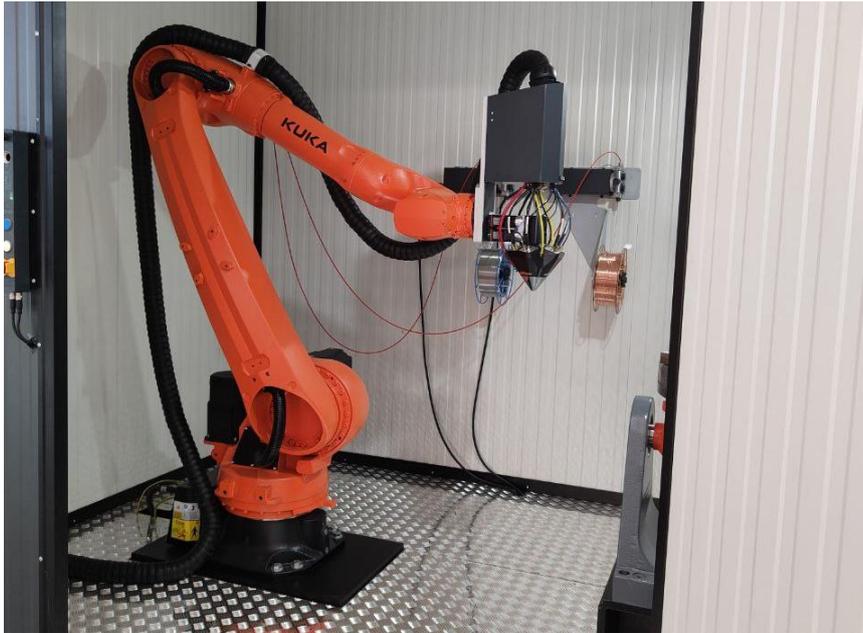
#### ***4.2 L'impianto MELTIO***

L'azienda spagnola Meltio ha recentemente creato una testa di stampa per *laser cladding* che utilizza una alimentazione a filo. L'estremità da fissare al polso del

robot pesa circa 15 Kg ed ha un sistema integrato di controllo del materiale da deposizione che lo rende più preciso rispetto ad una configurazione in cui il filo viene spinto dal macchinario che ospita la bobina. Il processo è inoltre più efficiente nell'utilizzo del materiale arrivando ad efficienze del 98%. Essendo variata la tipologia di alimentazione risulta superfluo e non più necessario l'impiego di un sistema di filtraggio dell'aria all'interno della cabina di lavorazione, consentendo così un risparmio sul costo della manutenzione e sull'investimento iniziale necessario ad acquistare l'impianto stesso; questa differenza riduce anche l'inquinamento acustico prodotto durante il funzionamento del macchinario filtrante, pari ad un impatto sonoro massimo di 83 dBA .

La fonte del fascio laser è composta da sei diodi, ciascuno della potenza di 200 W, caratterizzati da una lunghezza d'onda pari a 976 nm.

Questo sistema ha una caratteristica molto importante che può essere determinante nel prossimo confronto sull'analisi economica: il processo non necessita di supervisione durante il suo funzionamento. Questa peculiarità consente di estendere il suo utilizzo fino alle 24 ore giornaliere se viene avviata una operazione sufficientemente lunga. Un'ulteriore particolarità risiede nel sistema di alimentazione: esso è infatti configurabile per gestire anche due materiali diversi, ampliando la tipologia di manufatti realizzabili e consentendo di sviluppare nuovi prodotti in vista di una espansione futura dell'offerta.



**Figura 20:** *Macchinario di Meltio*

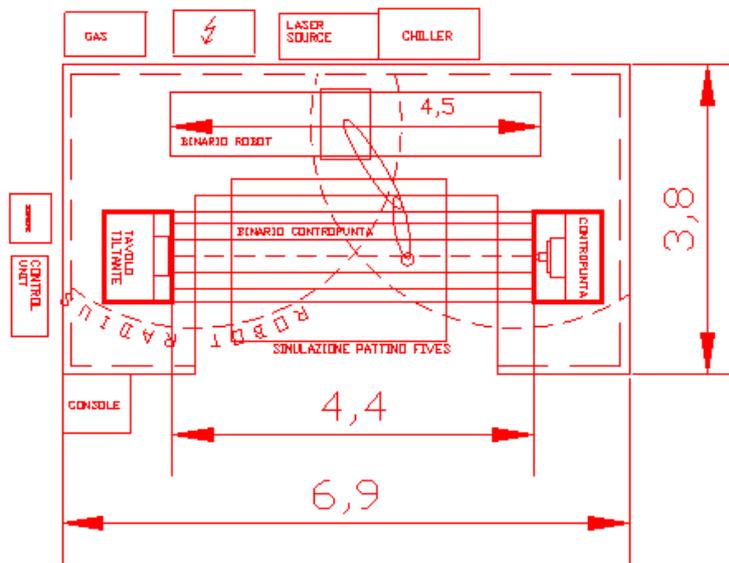
### ***4.3 Valutazione degli ingombri***

Uno step fondamentale nell'analisi di fattibilità è la valutazione degli ingombri dell'impianto, lo studio della disposizione degli organi ausiliari e la facilità di accesso durante l'utilizzo. Il principale vincolo da rispettare in questo caso è dover posizionare il macchinario nel campo di azione del carro ponte, in quanto alcune taglie di cuscinetti non sono movimentabili a mano o con l'utilizzo dei muletti.

La differenza di layout tra l'impianto di *laser cladding* alimentato a polvere e quello a filo consiste solo nella differenza degli organi ausiliari posizionati esternamente rispetto alla cabina di lavorazione, cioè la presenza di un filtro per le polveri posto all'esterno del capannone e presente solo per il primo caso. Nella seconda tipologia di impianto, il dosatore delle polveri è sostituito da un macchinario di dimensioni paragonabili che svolge la bobina su cui è avvolto il filo di metallo bianco. La cabina di lavoro presenta un'apertura di 3,6 metri per consentire la lavorazione dei prodotti più ingombranti.

All'interno dell'area di lavoro ipotizzata è presente un tavolo basculante su cui verranno posizionati i cuscinetti in lavorazione. Nel caso di lavorazioni future in

cui fosse necessario porre oggetti cilindrici in rotazione, il supporto basculante può inclinarsi di 90 gradi e fungere da mandrino, mentre una contropunta può muoversi su di un binario per adattarsi alla lunghezza del manufatto in lavorazione. Nella rappresentazione schematica è presente anche il braccio robot e il suo binario, oltre ad essere evidenziato, con una linea tratteggiata, l'arco d'azione quando il robot è posto ai 2 estremi. Quando l'impianto è in funzione e la porta di accesso è serrata, il processo è supervisionabile da fotocamere poste all'interno della cabina che consentono anche un controllo remoto; è comunque presente un piccolo vetro appositamente schermato per l'osservazione diretta della lavorazione.



**Figura 21:** Schema degli ingombri dell'impianto

## 5. REALIZZAZIONE DEI PROVINI

Per valutare la fattibilità tecnica del processo sono stati realizzati due serie di provini, uno per ogni impianto. I migliori provini realizzati sono stati poi analizzati con un microscopio elettronico a scansione (SEM) ed un rivelatore a dispersione di energia (EDS) in grado di fornire una immagine della metallografia, oltre a fornire una rilevazione della presenza di difetti nella zona di interfaccia tra i due materiali. Quest'ultima regione di confine tra le due leghe presenta una zona termicamente alterata, nota con il nome inglese di *Heat-Affected Zone* (HAZ); essa si forma a seguito della creazione della *melt zone* al passaggio del laser ed altera la struttura metallografica del materiale di base. In questa zona possono crearsi composti intermetallici a seguito della migrazione e successiva solidificazione di elementi dei due materiali [12]. Misurando il rapporto tra le altezze delle zone fuse è possibile calcolare rapporto di diluizione, un utile parametro per valutare l'adesione del metallo d'apporto al substrato. Come già anticipato in un precedente capitolo, le velocità elevate di raffreddamento del fuso a seguito di un processo DED consentono di creare strutture cristalline fini e migliorare le proprietà meccaniche del componente; questi grani crescono tipicamente allineati rispetto alla direzione di movimento dello spot laser, conosciuta con il termine scansione.

Durante la realizzazione dei provini sono stati affinati i parametri di stampa dei due impianti a confronto, ricavando dati essenziali per i prossimi confronti e analisi. Con il sistema di Lincotek è stato possibile raggiungere un rateo di deposizione pari a 3,6 Kg/h, mentre con Meltio questo parametro ha raggiunto il valore massimo di soli 2 Kg/h. Questo divario è causato dalla differenza tra le potenze laser installate e dalla capacità di portata dei macchinari di alimentazione. La testa di stampa Meltio è stata modificata durante i test per poter ospitare fili di babbitt di diametro fino a 1,6 mm, un incremento del 33% rispetto alla capacità iniziale. Nonostante questo miglioramento, la portata di materiale è ancora l'elemento di saturazione della capacità produttiva della macchina; in ogni caso la potenza del laser installato è sfruttata quasi appieno e un ulteriore incremento della capacità del macchinario di alimentazione imporrebbe anche una modifica della sorgente di energia,

operazione onerosa e non realizzabile in un periodo di tempo sufficientemente breve. Nelle foto seguenti sono riportati i provini realizzati tramite *laser cladding* alimentato a polvere.

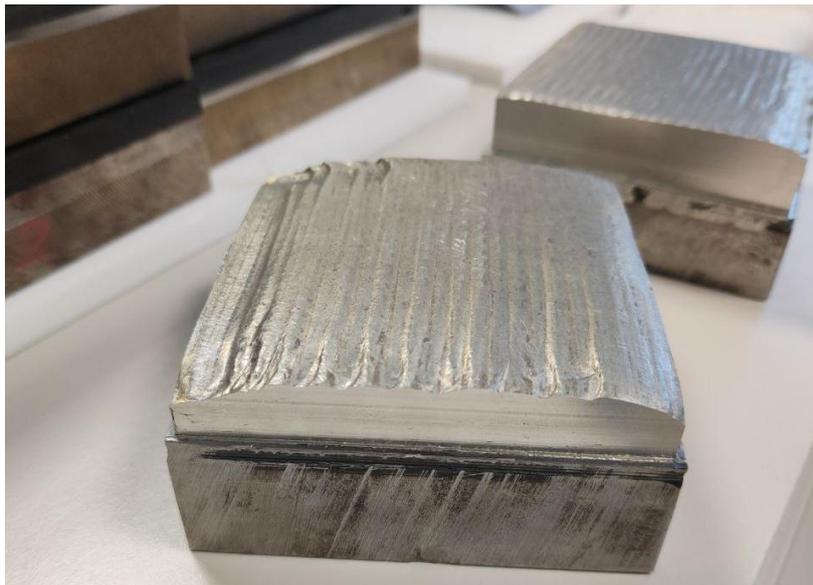


**Figura 22:** *Provini realizzati per testare i parametri di stampa*

Nei provini 1-5 si è tenuta costante la portata di alimentazione pari a 1,6 kg/h e si è variata la potenza del laser, in un range da 2 a 0,8 kW. Il cordone di deposizione numero 1 è possibile notare un colore bluastro, sintomo di una potenza eccessiva della sorgente laser. Nei cordoni 6-10 è stata testata la velocità movimentazione della testa di deposizione, variando tra 8 e 15 mm/s; la numero 10, quella eseguita più velocemente, risulta avere lo strato più sottile tra i campioni eseguiti. Nei cordoni 11-14 è stata testata la larghezza dello spot di deposizione. Infine, nei provini 15-19, è stata variata la portata di materiale, passando da 2,2 a 3 Kg/h.

All'inizio e alla fine di ogni cordone è possibile vedere la traiettoria del laser; in questo caso la tecnica di scansione adottata crea uno *swirl* mentre il laser si muove lungo il piano. Questo metodo consente di avere un buon equilibrio tra surriscaldamento della superficie (il laser percorre una distanza maggiore a parità di mm di avanzamento), una larghezza del cordone (data dalla larghezza dello *swirl*) ed una maggiore uniformità di passata (il fascio laser ripassa nello stesso punto due volte durante la sua traiettoria).

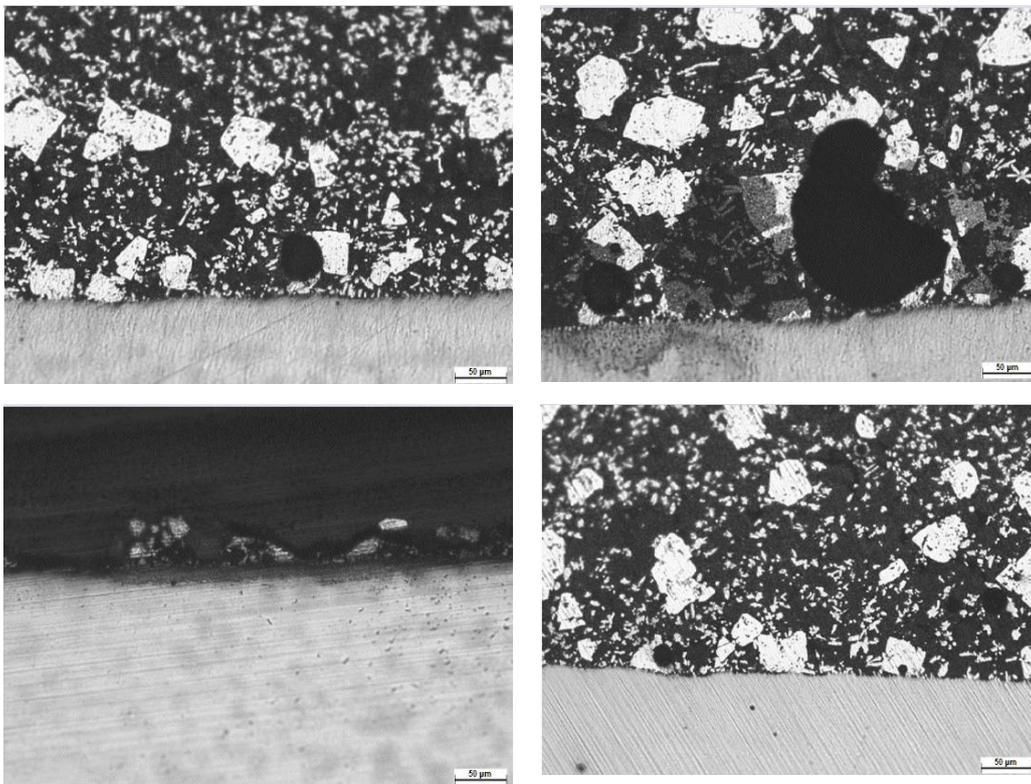
Per quanto riguarda i provini di Meltio, nella foto seguente si possono osservare i due blocchi da cui verranno in seguito estratti i campioni da sottoporre ai test meccanici. I parametri usati per realizzare queste due stampe sono gli stessi, fatta eccezione per la temperatura di preriscaldamento del metallo base.



**Figura 23:** *Provini Meltio*

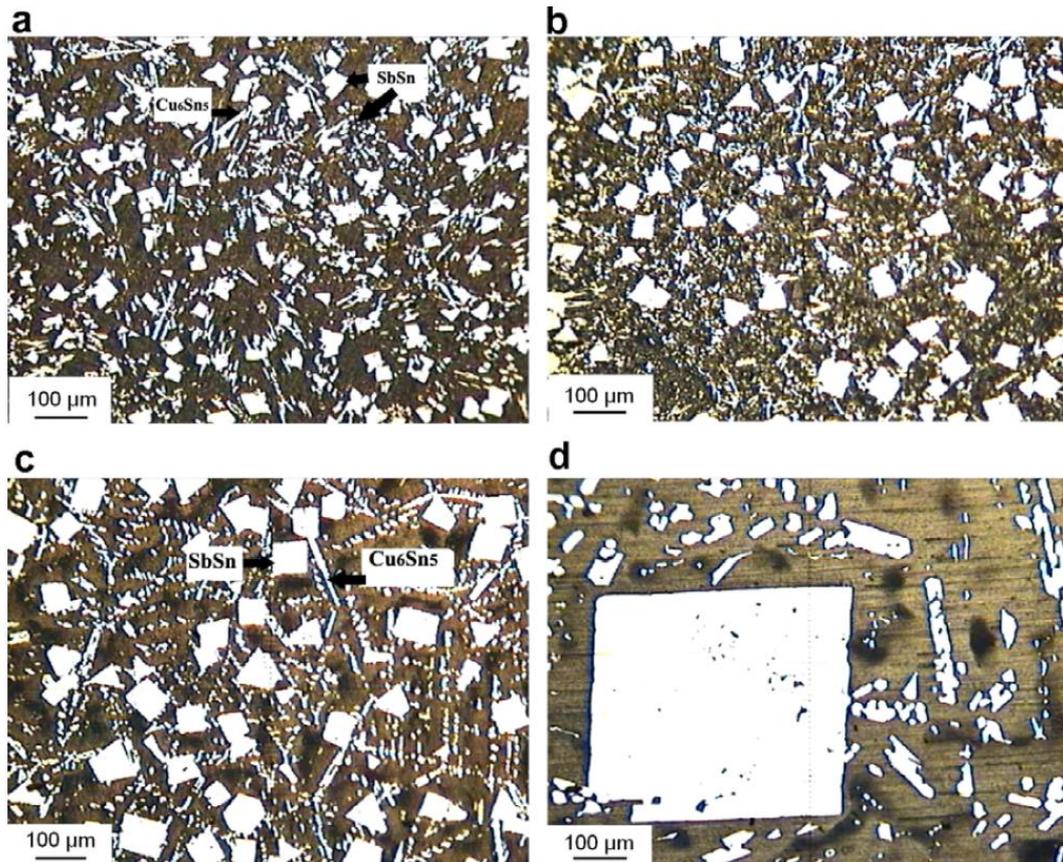
### 5.1 Confronto con la letteratura

Il campione realizzato con il *laser cladding* alimentato a polvere è stato analizzato con un ingrandimento 200X. Precedentemente, la superficie è stata trattata con un reagente chimico, il Nital 2%, composto da alcol e acido nitrico e necessario ad evidenziare le diverse strutture cristalline. Le analisi della metallografia eseguite sul campione realizzato con il *laser cladding* alimentato a polvere hanno fornito queste immagini:



**Figura 24:** Metallografia di un provino Lincotek

Dopo una ricerca in letteratura, è stata individuata una ricerca sperimentale sull'analisi di una lega di babbitt depositata su di un substrato metallico; la lega analizzata ha una composizione assimilabile a quella utilizzata per la realizzazione dei provini.



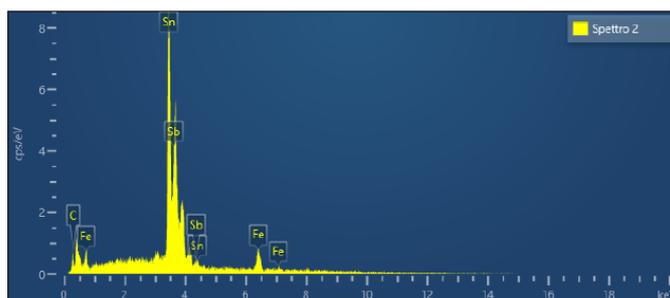
**Figura 25:** Metallografia di confronto [3]

Le quattro immagini corrispondono a provini realizzati con diversi metodi e lasciati raffreddare in diversi ambienti:

- a) Stampo metallico immerso in acqua
- b) Stampo metallico lasciato raffreddare in aria
- c) Stampo in sabbia
- d) Stampo lasciato raffreddare in forno

Conoscendo la scala delle foto, è stato possibile comparare le dimensioni dei grani dei test. Come intuibile, il processo di *laser cladding* consente la formazione di grani più fini rispetto al raffreddamento in stampo metallico immerso in acqua ed è prevedibile che la durezza superficiale e la resistenza all'usura siano migliori rispetto ai valori ottenibili tramite il processo attualmente adottato in azienda.

In seguito, sono state svolte analisi attraverso l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione per analizzare la composizione della matrice e dei precipitati cristallini in prossimità della superficie di congiunzione.



Spettro 2				
Elemento	Tipo di linea	% peso	Sigma % peso	% atomico
Fe	Serie K	7.51	0.46	10.68
Sn	Serie L	63.30	0.88	42.33
Sb	Serie L	24.49	0.81	15.96
C	Serie K	4.70	0.57	31.03
Totale		100.00		100.00

**Figura 26:** Risultato delle analisi al SEM del provino di Lincotek

Dalla composizione ricavabile dai dati ottenuti attraverso il SEM si può supporre che il punto analizzato includesse un composto cristallino SbSn avvolto dalla matrice di stagno, data l'assenza del rame. Si può notare anche la presenza del ferro pari al 7% del peso complessivo; questo dimostra una diffusione di questo elemento all'interno del metallo bianco, cosa che non accade nel processo tradizionale.

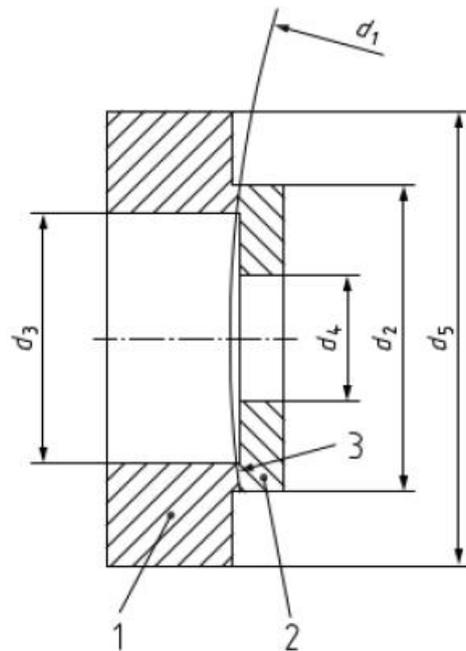
Da una ulteriore analisi della letteratura, è stato riscontrato che la diffusione del ferro è proporzionale alla potenza del laser e quindi alla porzione di materiale base che viene fuso durante la deposizione. Questo elemento può legarsi allo stagno formando un composto che può essere sia luogo di nucleazione per  $Cu_6Sn_5$  sia fungere da ostacolo per l'accrescimento dei cuboidi SbSn. In piccole quantità questi effetti consentono un maggior legame con il metallo di base ma oltre un determinato limite il comportamento si inverte rendendo più facile la possibilità di frattura lungo l'interfaccia tra i due materiali.

## 5.2 Prove meccaniche

Per verificare che i componenti realizzati tramite *laser cladding* soddisfino i requisiti meccanici minimi imposti dall'azienda, vengono realizzati due provini utilizzando come metallo base un acciaio al carbonio laminato a caldo tipo S355J0 EN10025 di dimensioni 165 x 150 x 20 mm. La superficie da rivestire avrà una

rugosità Ra 6,3. Entrambi i campioni avranno uno strato di metallo bianco depositato di altezza pari a 25 mm. I provini verranno realizzati con una curvatura di raggio pari a 250 mm, per simulare l'applicazione su di un cuscinetto.

Da ogni piastra verranno poi ricavati tre provini di questa forma:



**Figura 27:** Sezione del provino sottoposto al test

Con le seguenti dimensioni:

d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	d4 [mm]	d5 [mm]
>200	28.85	24	12.1	38

La procedura di realizzazione dei campioni deve essere in accordo con la norma ISO 4386-2.

Si esegue un test di trazione per valutare la forza di adesione, con un pistone che spinge dal basso lo strato di metallo bianco fino a distaccarlo dal metallo base.

In base all'applicazione finale del cuscinetto, i requisiti minimi dei test variano. Per eseguire questa analisi si è deciso di considerare il caso con i valori più elevati, cioè

quello in cui i cuscinetti realizzati verranno applicati in impianti nucleari. Esistono vari gradi di accettabilità, in base al risultato dei provini. In particolare:

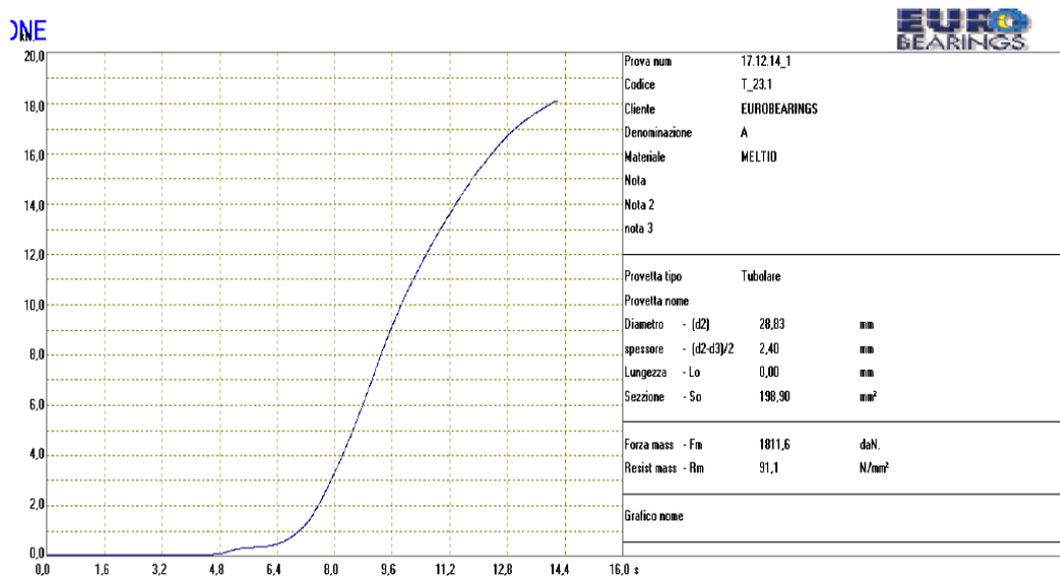
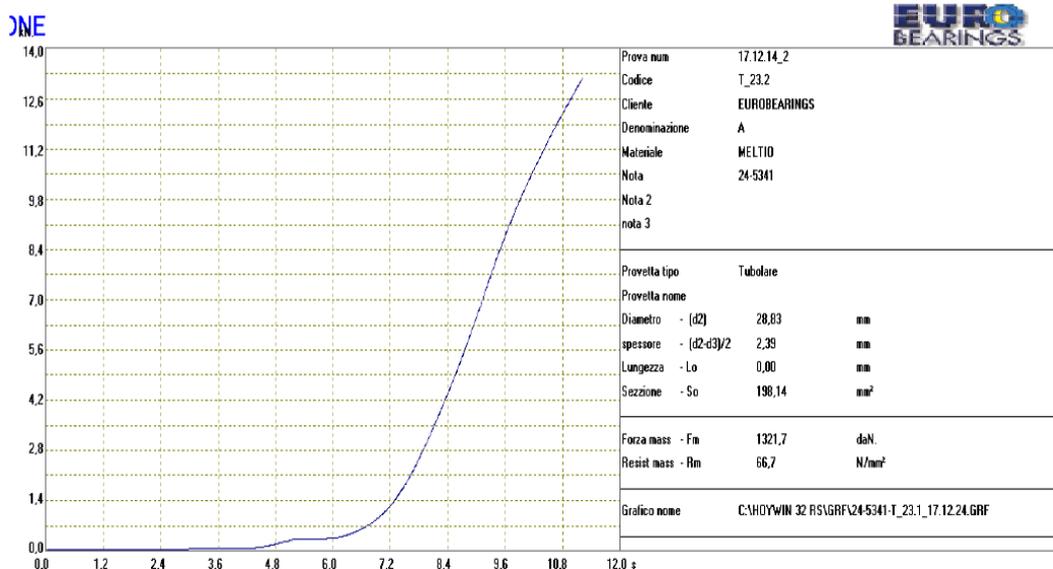
- Il valor minimo di ogni provino deve essere maggiore di 63 MPa
- Se la media dei tre provini è pari o superiore a 90 MPa, il cuscinetto è conforme
- Se la media fosse compresa tra 80 e 90 MPa, bisogna eseguire analisi micrografiche per la validazione
- Se la media fosse minore di 80 MPa, l'azienda cliente accetta i cuscinetti a sua discrezione, in base anche alle analisi micrografiche. Bisogna sottolineare infatti che durante il funzionamento non è previsto il raggiungimento di valori molto elevati, ma si è deciso di prendere come valore minimo il 70% di 90 MPa in seguito a test di fatica.

Dopo aver creato i provini, sono stati eseguiti i test.

### ***5.2.1 Test di trazione - Meltio***

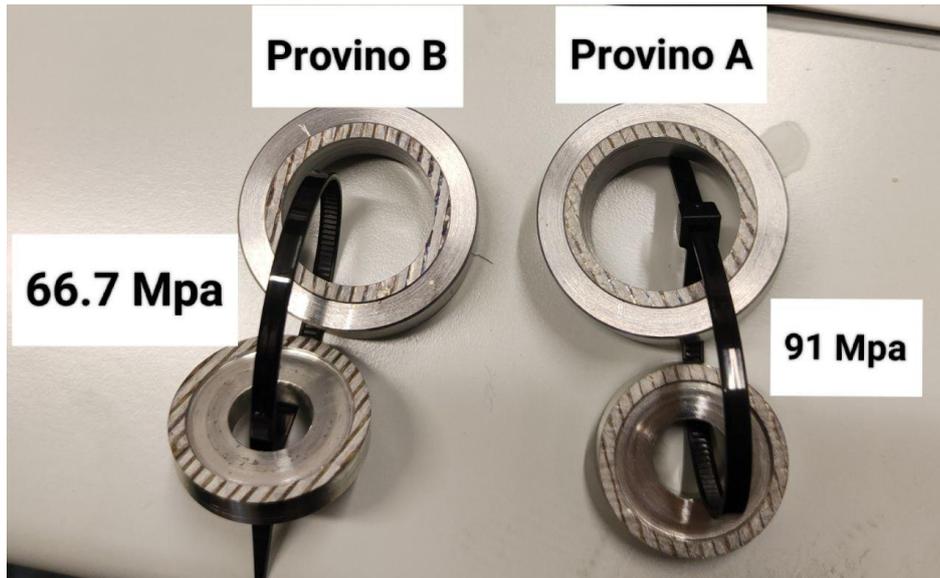
Per creare i campioni sfruttando la tecnologia di Meltio, è stata utilizzata una potenza laser pari a 1000 W per il primo layer e 800W per i successivi. Ogni strato misura 2 mm di altezza e larghezza e la velocità della testa di deposizione è uguale a 5 mm/s. L'unico parametro differente è la temperatura di preriscaldamento della superficie.

I grafici delle prove meccaniche più significative eseguite sui provini sono i seguenti:



**Figura 28:** Grafici della prova di strappo dei provini Meltio

Il valore rilevato è stato pari a 66,7 MPa per il peggiore e 91 MPa per il migliore. Dall'osservazione della superficie di strappo è visibile l'orientazione del percorso eseguito dal laser, oltre ad una differenza nella larghezza del tratto più scuro, causato dai diversi parametri di stampa utilizzati durante la realizzazione; questo ci permette di apprezzare quanto le proprietà meccaniche siano sensibili al settaggio del macchinario di stampa e alla preparazione della superficie.



**Figura 29:** Zona di rottura dei provini realizzati tramite laser cladding

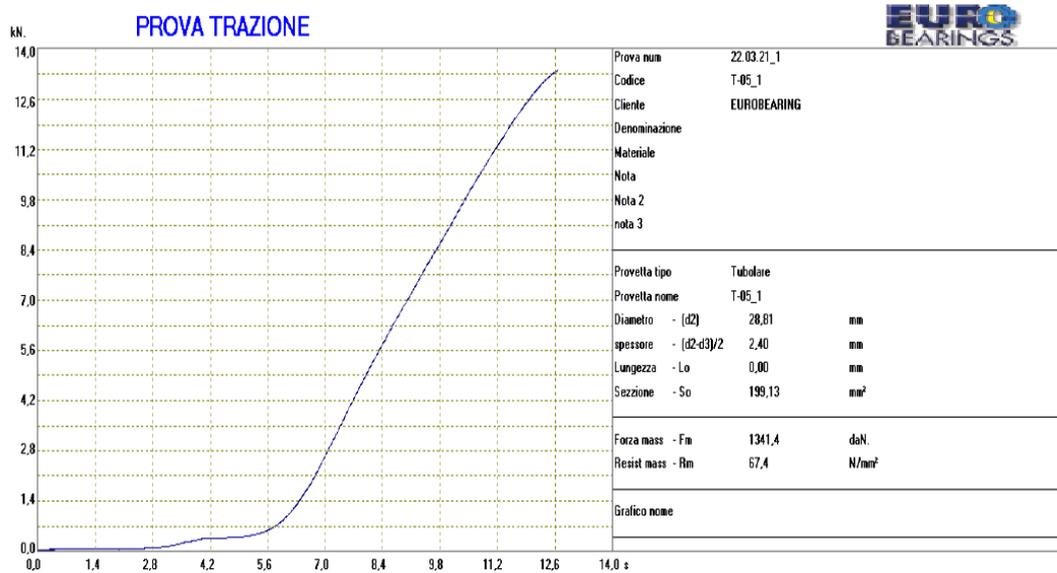
La superficie di rottura di un provino realizzato con il metodo della centrifugazione è riportata nella foto numero 30.



**Figura 30:** Zona di frattura di provini realizzati tramite colata

## 5.2.2 Test di trazione - Lincotek

Anche i provini realizzati con la tecnologia fornita dall'azienda Lincotek sono stati sottoposti a trazione:



**Figura 31:** Grafici della prova di strappo dei provini Lincotek

In questo caso sono stati testati quattro campioni ed il range dei risultati è compreso tra 65,7 e 67,9 MPa, una variazione pressoché nulla ma che soddisfa solamente i requisiti minimi esposti nel precedente paragrafo.

Vengono eseguiti anche test non distruttivi, come l'analisi agli ultrasuoni, al liquido penetrante, analisi metallografica e test di durezza Brinell (soglia minima: 28 HB @ 20 °C). Queste verifiche sono necessarie per contribuire ad appurare la fattibilità tecnica del processo.

## 6. ANALISI DEI COSTI

Avendo ora la sicurezza che è possibile creare riporti di metallo bianco usando una tecnologia DED soddisfacendo i requisiti minimi imposti dalle normative standard, si è eseguita una analisi finalizzata a confrontare i tempi necessari per realizzare i manufatti e la convenienza di una tecnologia piuttosto che un'altra. Come primo step si è stimato il costo orario degli impianti di Meltio e Lincotek, oltre ad eseguire una preventivazione del costo al Kg per il metallo bianco nel formato filo e polvere. In seguito, si è eseguita una raccolta dati degli attuali processi produttivi in quanto non vi era un database storico sufficientemente dettagliato per lo svolgimento di questa analisi.

### *6.1 Stima dei costi orari per Meltio e Lincotek*

Una delle componenti principali nella quantificazione del costo orario per i macchinari è l'ammortamento. Con ammortamento contabile si intende il procedimento di redistribuzione dell'investimento affrontato su più anni al fine di ridurre il carico fiscale [13]. Per il settore in cui opera l'azienda Eurobearings e la tipologia di impianto analizzata, la percentuale di ammortamento è pari al 15,5 % annuo, traducendosi in un periodo di tempo di 7 anni. A questo parametro si deve sommare il consumo orario di elettricità, dei materiali di processo consumabili (in questo caso argon) e dei costi di manutenzione ordinaria prevista.

- *Impianto Lincotek*

Dal preventivo fornito dall'azienda, il prezzo dell'impianto specificato è di 980000 €. La quota annua ammortizzabile è quindi 140000 € che corrisponde ad un costo orario di 58 €, considerando 304 giorni lavorativi e un tempo di utilizzo possibile di 8 ore al giorno, in quanto il processo dev'essere sempre supervisionato da un operatore. Per quest'ultimo l'esborso da sostenere è pari a 54 €/h, assumendo una paga simile a quella che percepisce un operaio di pari specializzazione in azienda.

Il costo della manutenzione annua è stato stimato dall'azienda fornitrice ed è quantificabile in 40000 €/anno, corrispondente al 4% del valore dell'impianto e ad un costo orario di 16,5 €/h.

Gli interventi di manutenzione e i relativi tempi sono i seguenti:

- Sostituzione del piatto dosatore in plastica 1 volta a settimana (1h)
- Sostituzione della guaina alimentazione polveri 1 volta ogni 2 mesi (1h)
- Pulizia della testa laser 1 volta ogni 3 settimane (2h)
- Sostituzione iniettori delle polveri 1 volta mese(4h)
- Manutenzione ottica laser 1 volta anno (1 giorno intero)

Da questi dati è possibile stimare un tempo di fermo macchina di 2,83 ore a settimana.

Per la stima del consumo orario di corrente elettrica e del gas di assistenza (Argon), si è utilizzata una simulazione di processo fornita da Meltio in quanto l'azienda Lincotek non ha fornito dati a sufficienza. Si è considerato un consumo di gas uguale al processo di *laser cladding* alimentato a filo, pari a 0,6 m<sup>3</sup>/h e un costo di acquisto dell'Argon equivalente a 3,5 €/m<sup>3</sup>, risultante in un costo di 2,1 €/h. La stima dell'assorbimento di elettricità è di 8,15 kW/h, tenendo presente la differente potenza del laser e i macchinari accessori non presenti nell'impianto di Meltio. Questo dato, unito ad un costo per l'energia di 0,24 €/kW, si traduce in un costo orario di 1,2 €.

Il costo orario stimato, dato dalla somma di quelli appena elencati, è quindi pari a 132 €/h.

Riguardo il prezzo unitario del metallo bianco, dopo l'analisi di diversi preventivi, è stato stimato in un valore cautelativo di 45 €/Kg.

Le voci che compongono i costi orari vengono riassunte nella tabella di seguito per una maggior chiarezza.

<b>Voce di costo</b>	<b>Costo</b>
Quota ammortamento	58 €/h
Costo operatore	54 €/h
Manutenzione	16,5 €/h
Argon	2,10 €/h
Consumo di corrente	1,2 €/h
Costo MB in polvere	45 €/Kg

**Tabella 2:** Riassunto dei costi operativi dell'impianto Lincotek

- ***Impianto Meltio***

Il prezzo di acquisto preventivato è di 500000 € ma potrebbe variare di qualche decina di migliaia di euro perché, nel momento della stesura di questo elaborato, l'azienda rivenditrice ha comunicato un range di prezzo e non una cifra definitiva. In ogni caso, il range di variazione è ristretto e non influenza in modo decisivo la stima in questione. La quota ammortizzabile annua corrisponde a circa 71500€ che, trasformato in costo orario, è circa 19,50 €/h.

Per quanto riguarda il consumo orario di corrente, è stato stimato dalla azienda produttrice che il macchinario utilizzi in media 2,5 kW/h, che moltiplicato per un prezzo di acquisto di 0,24 €/kW, risulta pari ad un costo orario di 0,6 €/h.

Anche in questo caso il consumo di Argon comporta una spesa di 2,1 €/h.

Per quanto riguarda la manutenzione, gli organi ausiliari sono inferiori rispetto al caso di *laser cladding* alimentato a polvere; infatti, non c'è bisogno di filtri per l'aria e la gestione dell'alimentazione del materiale risulta più semplice. Si è deciso di mantenere sempre la proporzionalità del 4% tra i costi stimati della manutenzione e il prezzo dell'impianto; così facendo, la spesa annuale da affrontare corrisponde a 20000€.

Come già precedentemente accennato, l'impianto di Meltio non necessita di supervisione durante il funzionamento. Le operazioni che richiedono l'intervento umano sono il posizionamento del pezzo in macchina e il settaggio della stessa, procedure che durano non più di un'ora in totale. Considerando i tempi di stampa spesso superiori alle 50 ore e i costi del materiale da depositare, è ragionevole trascurare questa voce di costo.

Il macchinario in analisi può potenzialmente lavorare 24 ore su 24 e le ore settimanali di fermo macchina per manutenzione sono stimate in 4,5.

Le quote relative alla manutenzione e all'ammortamento sono state ridistribuite considerando un giorno lavorativo pari a 12 ore e non 8 come nel caso di Lincotek.

Il costo orario stimato è pari a 28 €/h.

Il prezzo al chilogrammo del metallo bianco in bobine composte da un filo di diametro 1,6 mm è stato stabilito essere di 52 €/Kg.

Anche in questo caso i costi vengono riassunti nella tabella 3.

<b>Voce di costo</b>	<b>Costo</b>
Quota ammortamento	19,50 €/h
Manutenzione	5,5 €/h
Argon	2,10 €/h
Consumo di corrente	0,6 €/h
Costo MB in polvere	52 €/Kg

**Tabella 3:** Riassunto dei costi operativi dell'impianto Meltio

## ***6.2 Raccolta dati***

Il fine di questa prima fase di analisi è duplice: il primo obiettivo è riuscire a stimare i tempi e i costi necessari per realizzare il riporto di metallo bianco all'interno dei cuscinetti per procedere successivamente con il confronto con i due impianti di Meltio e Lincotek. Il secondo obiettivo è trovare, per i casi in cui non ci sia una netta prevalenza economica tra i metodi produttivi analizzati, un parametro e un valore associato che possa essere usato come confine per stabilire la convenienza del processo tradizionale rispetto a quello che utilizza la tecnologia laser.

### ***6.2.1 Il processo di saldatura***

Come già descritto in precedenza, questa operazione è svolta da un operaio che fonde localmente una barretta di babbitt depositando uno strato su un pattino di grandi dimensioni. A causa della natura manuale del processo, spesso bisogna correggere e riparare dei vuoti che si creano durante la lavorazione e che vengono rilevati solamente con l'ausilio di un macchinario che sfrutta gli ultrasuoni; per

eeguire questo controllo bisogna effettuare una sgrossatura della superficie perché la rugosità deve essere minore di una determinata soglia per consentire allo strumento di funzionare. Risulta ovvio che diminuendo il numero di errori si riesce ad abbattere considerevolmente il tempo necessario alla realizzazione di un pattino.

A conseguenza della rarità di questa tipologia di ordini, circa 6/7 all'anno, le stime dei tempi di realizzazione vengono calcolate in base all'esperienza acquisita dai saldatori. Le informazioni raccolte tramite il personale sono state utilizzate per validare i dati estratti dai consuntivi delle commesse completate. Il parametro che influenza direttamente le ore necessarie per realizzare un pattino di grandi dimensioni è la quantità di metallo bianco da depositare, lo stesso metro di misura dei processi di *laser cladding*. Questa caratteristica faciliterà il confronto tra i due processi. Per ricavare il rateo di deposizione del metallo bianco è stata divisa la quantità di materiale utilizzato per la durata totale del processo ed è stata fatta una media dei valori trovati per ogni caso analizzato. Questo valore è quindi già comprensivo dei possibili ritardi provocati da eventuali errori e conseguenti riparazioni. Questa quantità calcolata è pari a 1,138 Kg/h. Per la realizzazione di questi componenti il processo di saldatura vero e proprio ricopre in media il 70% del tempo totale, mentre il rimanente 30% è dedicato alla correzione di porosità e difetti che si verificano ogni volta, essendo un processo manuale e non perfettamente ripetibile. Per aumentare l'adesione del metallo bianco viene utilizzata una pasta attivante dal costo di 60 €/Kg e con un chilogrammo si può rivestire fino a 1,5 m<sup>2</sup> di superficie, con un costo per pattino che varia dai 120 ai 150 €. Con i processi di *additive manufacturing* sarebbe possibile ridurre sensibilmente la presenza di difetti (e quindi ridurre i relativi interventi di correzioni), eliminare il bisogno di pasta attivante e, cosa più importante, i saldatori non sarebbero più costretti a svolgere una mansione che prova stress fisico alle articolazioni degli arti.

In sintesi, i dati utilizzati per eseguire il confronto tra le due tecnologie sono le seguenti:

DATI		
Prezzo MB Stick	30,70	[€/Kg]

Prezzo MB filo	52	[€/Kg]
Prezzo MB polvere	45	[€/Kg]
Costo orario saldatura	78	[€/h]
Costo orario Meltio	33	[€/h]
Costo orario Lincotek	132	[€/h]
Costo pasta attivante	60	[€/Kg]
Consumo	0,667	[Kg/m <sup>2</sup> ]
Rateo deposizione Meltio	2	[Kg/h]
Rateo deposizione Lincotek	3,6	[Kg/h]
Sovrametallo laser cladding	3	[mm]

**Tabella 4:** Dati utilizzati per svolgere l'analisi nel processo di saldatura

I risultati del confronto sono i seguenti:

Commessa	Tempo saldatura [h]	Tempo Meltio [h]	Tempo Lincotek [h]	Costo saldatura [€]	Costo Meltio [€]	Costo Lincotek [€]	Differenza di tempo [h]	Risparmio economico [€]
5050	250,5	171,2	102,7	35632	24877	29924	147,8	10754,7
4927 - 1	252,57	197,0	118,3	36343	26496	31609	134,3	9847,2
4927 - 2	211,5	187,0	108,3	29701	24549	30288	103,2	5152,0
4927 - 3	212,08	189,2	110,5	32817	24622	30582	101,6	8194,6

**Tabella 5:** Risultati dell'analisi del processo di saldatura

In verde sono evidenziati i valori minimi di tempo impiegato e costo del processo.

Considerando che le dimensioni di questi manufatti sono sempre molto simili e che ne vengono prodotti in media sei all'anno, facendo una media del potenziale risparmio di costi e di tempo è possibile eseguire queste stime:

Macchinario	Tempo annuo risparmiato [h]	Euro annui risparmiati [€]
-------------	-----------------------------	----------------------------

Lincotek	730	18135
Meltio	273	50923

**Tabella 6:** Confronto del potenziale risparmio nel caso del processo di saldatura

### 6.2.2 Il processo di centrifugazione

Con questo metodo vengono realizzati solamente cuscinetti radiali (o la parte cilindrica dei cuscinetti combinati) di raggio interno non inferiore a 250 mm e raggio esterno non superiore a 1115 mm. Questo processo è tendenzialmente più rapido rispetto a quello che impiega tecnologie di *additive manufacturing*, soprattutto se le quantità di metallo bianco da depositare sono ingenti. Il limite della centrifugazione consiste in due aspetti: il primo è la necessità di avere uno strato di sovrametallo di babbitt molto maggiore per consentire alle impurità e all'eccesso di pasta attivante di risalire verso il centro del cuscinetto e depositarsi negli strati che poi verranno asportati tramite tornitura interna. Il secondo aspetto è il tempo necessario per scaldare il cilindro di metallo fino a raggiungere la temperatura necessaria richiesta dalla tipologia di aggrappante, in particolare 255 gradi per cuscinetti standard e 280 per quelli utilizzati in impianti nucleari. Una conseguenza da tenere in considerazione relativa alla quantità di sovrametallo da asportare è anche il tempo di tornitura: meno millimetri bisogna asportare e maggiore è il risparmio di tempo e costo.

Per eseguire il confronto con i macchinari forniti da Meltio e Lincotek, sono stati utilizzati gli stessi dati del caso precedente, a parte il costo del metallo bianco utilizzato nel processo che è acquistato in forma di lingotti e non barrette.

DATI		
Prezzo MB Lingotto	30,81	[€/Kg]
Prezzo MB filo	52	[€/Kg]
Prezzo MB polvere	45	[€/Kg]
Costo orario saldatura	78	[€/h]
Costo orario Meltio	33	[€/h]
Costo orario Lincotek	132	[€/h]

Costo pasta attivante	60	[€/Kg]
Consumo	0,667	[Kg/m <sup>2</sup> ]
Rateo deposizione Meltio	2	[Kg/h]
Rateo deposizione Lincotek	3,6	[Kg/h]
Sovrametallo laser cladding	3	[mm]

**Tabella 7:** Dati utilizzati per svolgere l'analisi nel processo di centrifugazione

I risultati del confronto sono i seguenti:

Commessa	Tempo centrifuga [min]	Tempo Meltio [min]	Tempo Lincotek [min]	Costo centrifuga [€]	Costo Meltio [€]	Costo Lincotek [€]	Differenza di tempo [min]	Risparmio economico [€]
5426	312	1526,9	869,3	2263	3297	4526	-557,1	-1034,6
5315	607	3665,6	2065,1	7930	7985	10902	-1457,9	-55,3
5413	235	699,2	410,1	2485	1479	2049	-174,8	1006,2
5319	653	2239,0	1266,4	4103	4859	6652	-613,5	-756,3
5350	501	390,5	245,5	1430	778	1116	255,8	652,1
5389	255	1537,5	885,3	2503	3293	4539	-630,1	-790,1
5119	286	1458,7	840,7	2698	3121	4306	-554,4	-423,2
5393	307	1852,8	1059,9	3656	3987	5484	-753,1	-330,3
5394	385	2273,7	1295,4	5158	4909	6738	-910,9	249,0
5409-1	389	1378,4	798,4	4238	2942	4059	-409,3	1295,5
5409-2	364	1234,0	717,6	3585	2626	3629	-353,7	959,0

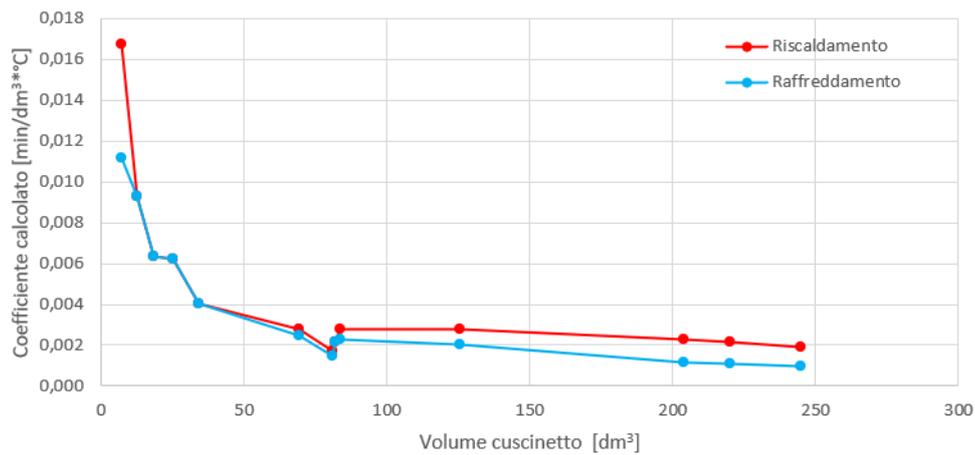
**Tabella 8:** Risultati dell'analisi del processo di centrifugazione

In questa tabella è possibile osservare che raramente il processo di *laser cladding* conviene in termini di tempo ma può ridurre i costi di produzione di diverse commesse. In questo caso avrebbe consentito di abbassare la spesa di circa 4000 €.

La maggior parte dei manufatti venduti dall'azienda vengono realizzati attraverso la centrifugazione quindi in questo mese di analisi è stato possibile raccogliere molti dati necessari a valutare in quali casi convenga o meno l'*additive manufacturing*. In particolare, sono stati registrati i tempi necessari al riscaldamento, al

raffreddamento, il tempo di preparazione, il numero di ugelli del gas e dell'acqua utilizzati e la quantità di metallo bianco utilizzata. Questi valori sono stati poi graficati ed è stata eseguita una analisi per trovare quale fosse il parametro ottimale per creare una funzione che prevedesse i tempi necessari alla realizzazione dei cuscinetti.

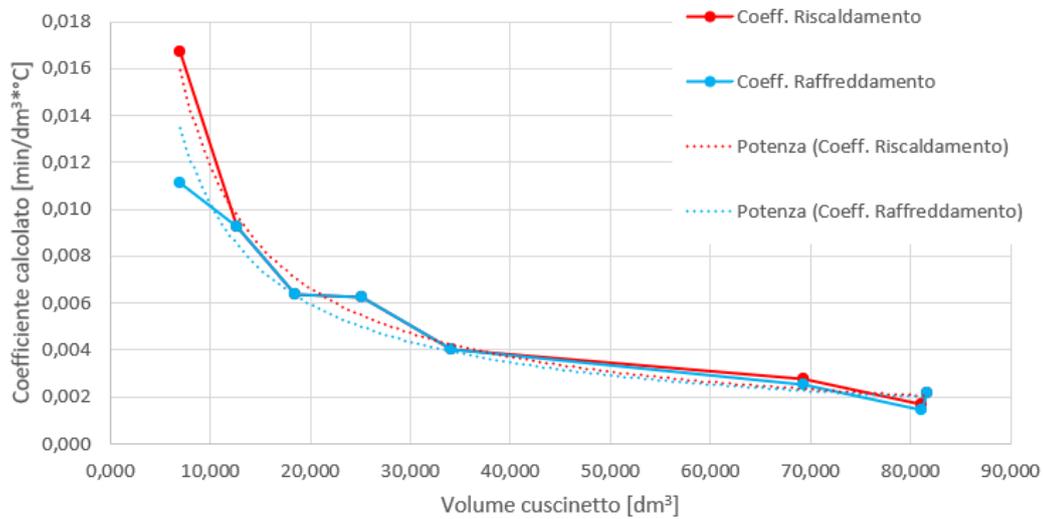
Per quanto riguarda le procedure di riscaldamento e raffreddamento, le durate ottimali delle operazioni sono state messe a punto basandosi su test effettuati in passato e non è stato possibile stimare i tempi necessari con l'utilizzo di qualche formula empirica. Si è quindi ottenuto un coefficiente calcolato dividendo il tempo impiegato al riscaldamento/raffreddamento per il volume del cuscinetto e la temperatura da raggiungere. Questo è il grafico ottenuto:



**Figura 32:** Grafico rappresentante i coefficienti calcolati in funzione del volume del cuscinetto

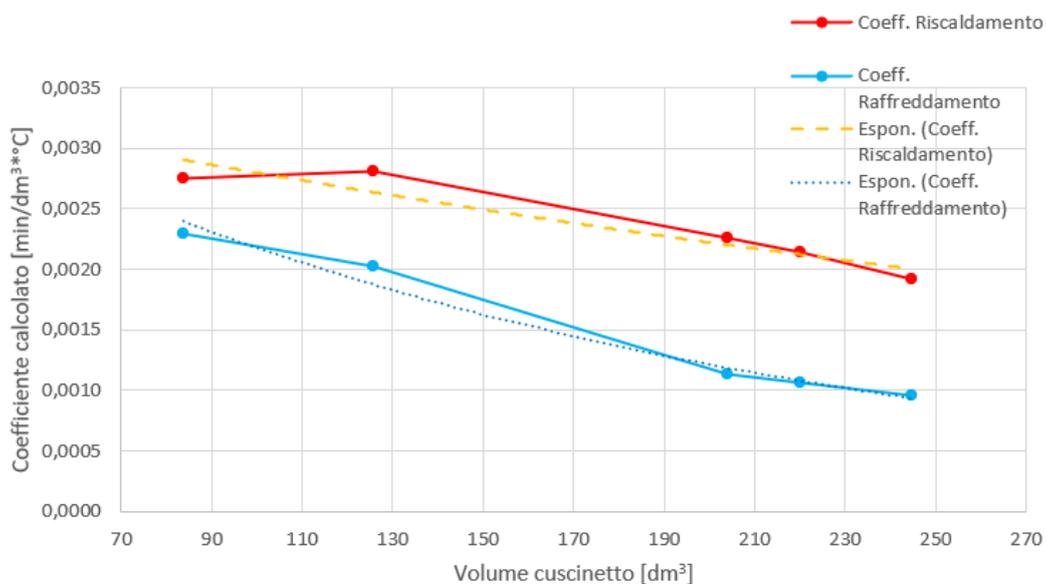
Per eseguire una interpolazione e creare una funzione che meglio rappresentasse l'andamento dei valori, si è scelto di dividere in due parti il grafico al valore di 85 dm<sup>3</sup>, suddividendo i dati in altrettanti grafici:

### Andamento coefficienti temperatura



**Figura 33:** Interpolazione della prima metà del grafico

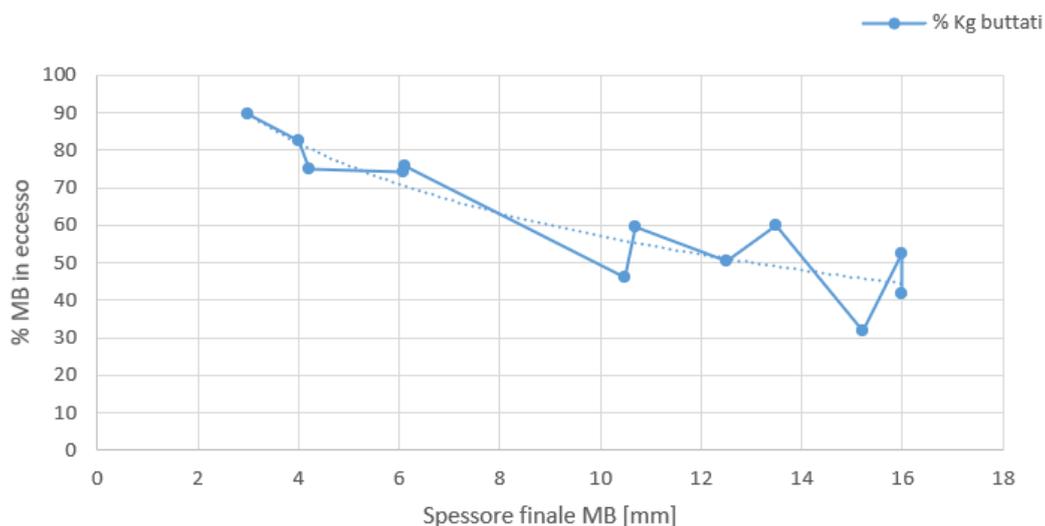
In questa prima metà le due curve di riscaldamento e raffreddamento sono state approssimate attraverso una funzione potenza di equazione rispettivamente  $y = 0,0818x^{-0,838}$  e  $y = 0,0615x^{-0,77}$ . Gli  $R^2$  delle due funzioni sono pari a 0.987 e 0.936, un valore più che accettabile considerando il processo analizzato.



**Figura 34:** Interpolazione della seconda metà del grafico

Nella seconda metà la curva arancione di interpolazione ha equazione  $y=0,0035e^{-0,002x}$  e un  $R^2$  uguale a 0,897 mentre l'interpolazione dei dati relativi al raffreddamento ha equazione  $y = 0,0039e^{-0,006x}$  e un  $R^2$  pari a 0.976. Una funzione polinomiale avrebbe approssimato meglio la curva rossa ma non avrebbe avuto un significato fisico perché avrebbe raggiunto il valore zero per un volume sufficientemente grande. Per ottenere una funzione più affidabile sarebbe necessario avere uno storico di dati maggiore ma la produzione di cuscinetti durante il periodo di svolgimento del tirocinio non è stata sufficientemente elevata.

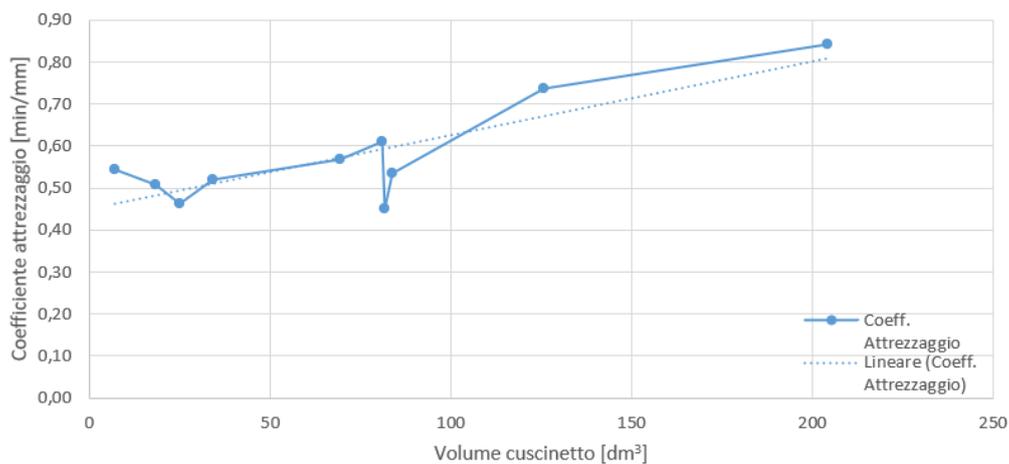
Con la stessa logica è stato stimato quanto metallo bianco deve essere asportato in funzione dello spessore dello stesso a fine lavorazione. Bisogna precisare che l'altezza del sovrmetallico che viene aggiunta di base è pari a 10 mm ma può capitare che questo valore venga aumentato a seconda della superficie su cui verrà eseguito il coating: possono essere presenti lavorazioni a code di rondine o alloggiamenti per condotti di raffreddamento che necessitano di una quantità maggiore di metallo bianco per garantire un deposito privo di impurità e difetti.



**Figura 35:** Interpolazione dei dati riguardanti la quantità di sovrmetallico di MB in base allo spessore finale dello stesso

In questo caso la funzione interpolante risultante è  $y = -27,03\ln(x) + 119,4$  con un  $R^2$  uguale a 0,834.

L'ultima operazione per cui è necessario stimarne i tempi è la preparazione del grezzo del cuscinetto al processo di centrifugazione. Si è deciso di ricavare un coefficiente dividendo i minuti dell'operazione per il diametro del cuscinetto in quanto le dimensioni delle piastre da saldare e la quantità della guarnizione da applicare sono proporzionali a questo parametro. Spesso, oltre alle manovre appena elencate, è necessario eseguire la sabbiatura della superficie su cui eseguire la *coating* e livellare la superficie su cui verrà applicata la piastra contenitiva costruendo appositi *filler* che verranno poi rimossi dopo la deposizione del metallo bianco; questa operazione varia in base al modello del cuscinetto e non è prevedibile se non analizzando caso per caso il disegno tecnico.



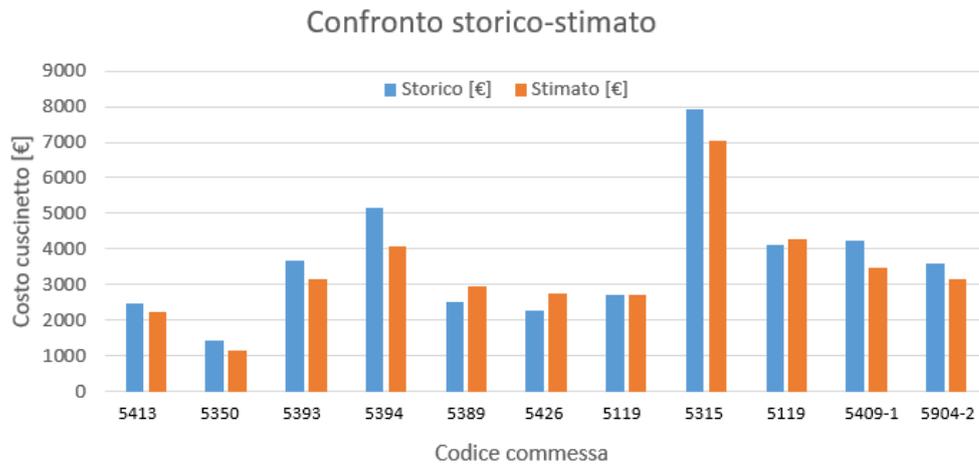
**Figura 36:** Interpolazione dei dati riguardanti i tempi di attrezzaggio

La funzione interpolante risultante da questa analisi presenta un  $R^2$  con un valore di 0,71 ma si è deciso di tenere l'equazione calcolata in quanto l'errore sulla stima finale dei tempi è accettabile.

Infine, sono stati anche registrati i valori dei parametri utilizzati durante il processo di tornitura interna per calcolare l'eventuale risparmio in termini di tempo e costo.

Unendo le precedenti equazioni è stato possibile mettere a punto un algoritmo che stimasse i costi del processo in esame in base a cinque parametri in input: il diametro interno ed esterno, la lunghezza, lo spessore del metallo bianco e la

temperatura fino a cui deve essere scaldato il cuscinetto. I dati registrati in questo mese sono stati poi confrontati con gli output calcolati.

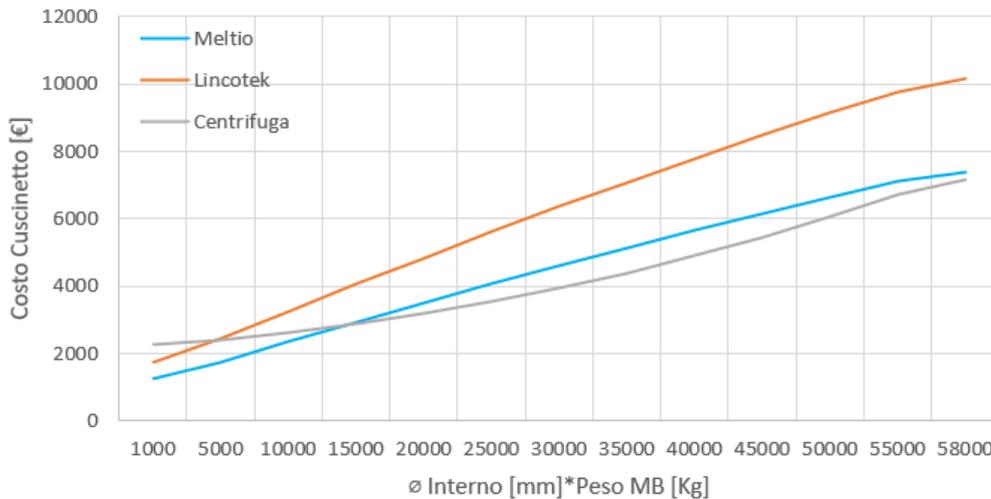


**Figura 37:** Confronto dei dati storici con quelli calcolati dal simulatore

L'errore massimo tra i valori stimati e quelli reali è stato del 21%, il minimo dell'1% e la media degli errori è pari al 14 %.

Per stimare quando convenga la produzione utilizzando la centrifuga piuttosto che gli altri due macchinari, è stato individuato un nuovo parametro che fosse proporzionale sia al costo del processo di centrifugazione (dipendente dalle dimensioni del cuscinetto) sia dei processi di *laser cladding*. Dopo vari tentativi si è ritenuto che il criterio di valutazione che consentisse di ottenere la migliore approssimazione ( $R^2$  maggiore di 0,90) fosse il risultato della moltiplicazione tra il diametro interno del cuscinetto e la quantità di metallo bianco da depositare. Graficando questo parametro insieme ai relativi costi di processo e interpolando i punti, è possibile ricavare le equazioni che meglio approssimano i valori sperimentali.

## Interpolazione costo



**Figura 38:** Interpolazione dei dati riguardanti i costi di realizzazione attraverso i tre macchinari

La curva “Meltio” intercetta la curva “Centrifuga” nel punto di coordinate (13815;2808), mentre la curva “Lincotek” la intercetta a (4800;2402). Sono stati analizzati i disegni tecnici delle commesse evase nei precedenti quattro mesi, calcolando per ogni ordine il valore del coefficiente “diametro interno \* peso MB”, il costo di produzione utilizzando l’impianto Meltio o Lincotek o la centrifuga. Da questo confronto è emerso che sono stati prodotti 26 cuscinetti con valore del parametro inferiore a 13815 e solo 11 con un valore inferiore a 4800. Se si fosse utilizzata la tecnologia di *laser cladding* si è stimato che sarebbe stato possibile risparmiare circa 31000 € con l’impianto fornito da Meltio, mentre circa 10000 € con l’impianto di Lincotek.

In sostanza, il metodo tradizionale di produzione risulta conveniente solo quando lo strato di materiale da depositare è elevato e la massa del cuscinetto è considerevole; agli estremi opposti, l’*additive manufacturing* consente un elevato risparmio in termini economici.

### **6.2.3 Il processo di colata a gravità**

Il riporto di metallo bianco dei pattini reggispinta viene depositato colando direttamente il materiale sulla superficie piana del pattino. Tipicamente lo strato di *coating* ha dimensioni che variano da 1,5 a 3 mm su superfici molto ridotte rispetto

a quelle dei cuscinetti radiali. Queste caratteristiche suggeriscono che ci sia la possibilità di sfruttare la tecnologia del *laser cladding* con buoni risultati. Per confermare l'ipotesi sono state analizzate le commesse eseguite negli ultimi quattro mesi ed è stata eseguita la stima dei possibili costi di produzione utilizzando i due impianti di Meltio e Lincotek, considerando gli stessi dati usati per i processi precedentemente trattati. Il numero di commesse analizzate è contenuto, ma per ogni commessa vengono prodotti dagli 8 ai 22 pattini. Con questo processo vengono realizzati anche cuscinetti radiali con un diametro interno inferiore ai 250 mm; nel periodo analizzato solo una commessa (5168) consisteva nella realizzazione di un componente rientrante nel caso appena descritto. Nella tabella di seguito sono riportati i risultati delle analisi.

Commessa	Tempo colata [min]	Tempo Meltio [min]	Tempo Lincotek [min]	Costo colata [€]	Costo Meltio [€]	Costo Lincotek [€]	Differenza tempo [min]	Risparmio economico [€]
5168	90	159,8	116,8	612	269	424	-27,0	343,0
5418	396	751,9	711,0	3904	1101	1732	-315,0	2802,7
5353	656	2047,4	1244,1	5782	4296	5937	-588,1	1486,2
5368	1072	1858,7	1245,9	6323	3682	5184	-173,9	2641,4
5380	816	2160,3	1306,8	10304	4544	6274	-490,8	5759,8
5391	576	1846,1	1132,3	5062	3854	5335	-556,3	1208,1

**Tabella 9:** Risultati dell'analisi del processo di colata

L'*additive manufacturing* risulta conveniente in termini economici per tutti i casi analizzati, mentre la durata del processo è sempre maggiore del metodo di colata per gravità. Come già esposto nell'introduzione, l'azienda non mira a sostituire gli attuali macchinari per ridurre i tempi di produzione, l'obiettivo è ridurre le spese

della produzione. In caso di urgenza rimarrà possibile utilizzare il metodo tradizionale.

Il potenziale risparmio economico in questo periodo di tempo analizzato è pari a circa 14000 €.

### ***6.3 Risultati e stima annuale***

Con i dati ricavati dai confronti dei tre metodi produttivi, è possibile stimare la riduzione dei costi di produzione lungo un arco temporale. Le informazioni sono state raccolte in un lasso di tempo pari a quattro mesi, più precisamente tra gli inizi di settembre e le prime settimane di dicembre. La frequenza degli ordini dei cuscinetti non è influenzata da fenomeni stagionali ed è circa la stessa per tutto l'anno, per cui è ragionevole supporre che il periodo di tempo preso in analisi possa ben rappresentare la produzione di un anno. Questi sono i valori stimati:

Impianto	Risparmio processo saldatura	Risparmio processo centrifugazione	Risparmio processo colata	Totale
Lincotek	18.135 €	30.231 €	22.583 €	70.950 €
Meltio	56.520 €	93.906	42.724 €	193.149 €

**Tabella 10:** *Risultati dell'analisi economica*

Per entrambe le cifre bisogna sottrarre il costo delle licenze dei software necessari per impostare il macchinario e modificare i modelli CAD qual ora ce ne fosse il bisogno; questa spesa è ipotizzabile pari a 10000 €/anno.

Oltre a questi valori bisognerebbe aggiungere la diminuzione di costi causata dalla potenziale riduzione degli errori durante il processo. Può capitare che alcuni cuscinetti presentino difetti che ne compromettano il funzionamento, causati da un errore di distribuzione della pasta stagnante, un'errata sabbiatura delle superfici oppure da un raffreddamento non eseguito correttamente. In questi casi è necessario fondere nuovamente lo strato di coating depositato e ripetere tutto il procedimento

di preparazione. Nell'anno 2024, la percentuale di metallo bianco scartato a seguito di non conformità è stato pari al 6% della quantità annua utilizzata, corrispondente ad un valore economico di 43000 €. In un processo automatizzato come quello analizzato in questo elaborato, è ragionevole supporre una diminuzione della difettosità con conseguente risparmio in termini economici. Non avendo però dati a sufficienza, non è stato possibile stimare la riduzione di questa spesa.

## **7. VALUTAZIONE DEI TEMPI DI IMPIEGO DEL MACCHINARIO**

Come è già stato specificato nei precedenti paragrafi, l'obiettivo di questa analisi è verificare se è possibile ridurre i costi di produzione, tralasciando in prima approssimazione l'incremento di produttività e i tempi per cui questi impianto saranno occupati durante la produzione. È opportuno calcolare questi parametri per confermare se la distribuzione della quota di ammortamento durante un anno sia plausibile e corretta.

### ***7.1 Stime dei tempi di operatività dell'impianto Meltio***

Sfruttando i dati raccolti durante l'analisi, è possibile stimare le ore mensili necessarie per completare le commesse medie di un mese, suddividendole in base al processo tradizionale che sarebbe stato utilizzarli per realizzarle. Prendendo in considerazione i cuscinetti per cui conviene economicamente l'utilizzo del *laser cladding*, sono necessarie circa 100 h per produrre quelli che sarebbero stati realizzati tramite centrifuga e 147 h per i pattini altrimenti prodotti tramite colata. Per i componenti di grandi dimensioni realizzati tramite saldatura manuale del babbitt, sarebbero necessarie in media circa 1100 h annuali, cioè poco più di 90 ore mensili. Considerando un tempo di operatività giornaliero della macchina pari a 20 ore, sottraendo le 4,5 ore settimanali necessarie alla manutenzione e considerando 20 giorni lavorativi in un mese, risultano disponibili circa 380 h. Da questi dati di prima approssimazione si intuisce che l'impianto ha sufficiente carico di lavoro per occupare tutte le ore disponibili e la ripartizione della quota di ammortamento precedentemente stimata è plausibile. Bisogna infine precisare che l'impianto di Meltio può lavorare fino a 24 h al giorno, compreso i fine settimana, se si adotta una corretta pianificazione della produzione.

Per massimizzare il profitto, sarebbe opportuno dare la precedenza alle commesse più convenienti. Conoscendo le ore mensili e i costi di realizzazione per ogni tipologia di cuscinetto, risulta preferibile produrre con l'impianto di Meltio parte dei cuscinetti attualmente creati con il processo di centrifugazione. Infatti, rispetto

al metodo attuale, in media si riuscirebbe a ridurre i costi di circa 234 € per ogni ora.

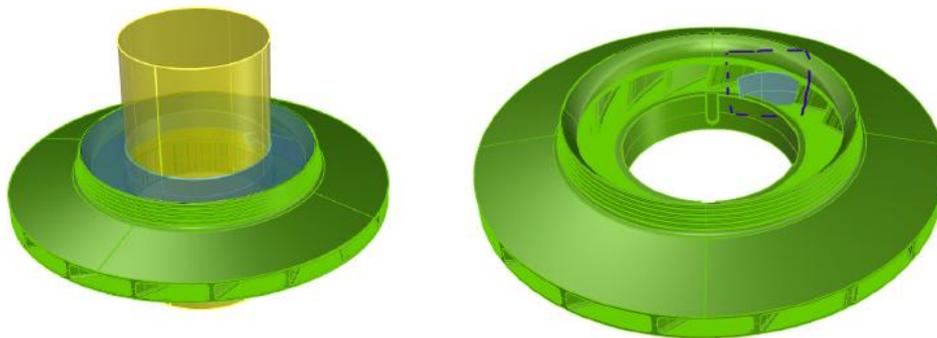
### ***7.2 Stime dei tempi di operatività dell'impianto Lincotek***

Ripetendo l'analisi per l'impianto di Lincotek, le ore necessarie per produrre i cuscinetti sono in totale 135: 24 ore per quelli altrimenti prodotti tramite centrifuga, 56 ore per quelli tramite colata e 55 per la realizzazione dei pattini di grandi dimensioni. Questi valori risultano inferiori rispetto al caso precedente per due principali motivi: la maggior produttività dell'impianto alimentato a polvere e il minor numero di componenti per cui risulta più economicamente conveniente la realizzazione tramite il sistema Lincotek.

Il tempo di operatività disponibile in un mese, tolte le circa 11 ore necessarie alla manutenzione, risulta essere di 160 ore, sempre considerando 20 giorni lavorativi al mese e 8 ore al giorno. Anche in questo caso l'impianto risulta ben sfruttato. Replicando gli stessi calcoli per capire quali ordini conviene preferire, emerge essere più vantaggioso produrre parte dei cuscinetti attualmente creati con il processo di centrifugazione.

## 8. POSSIBILE ESPANSIONE DELL'OFFERTA PRODUTTIVA

La tecnologia DED ha una flessibilità produttiva elevata e la possibilità di essere facilmente riadattabile per creare oggetti di materiale e forme differenti. La capacità produttiva sarà sempre limitata a poche unità ma la vastità di materiali utilizzabili e geometrie realizzabili permettono di ampliare i settori di mercato in cui l'azienda è presente e può garantire un rientro dell'investimento più rapido. In particolare, è stato eseguito dall'azienda Meltio un breve studio di fattibilità sulla possibile realizzazione di una girante chiusa realizzata in una lega a base di Nickel, più precisamente Inconel 718. Per permettere di creare l'*impeller* in questione, è stato necessario eseguire alcune modifiche alle superfici e alle geometrie. Il punto di partenza è un cilindro pre-lavorato di diametro leggermente inferiore al diametro del foro centrale del componente su cui verrà depositato il primo strato di materiale di Inconel; le superfici sono state inspessite di 1,5 mm a causa della maggior rugosità che procura il processo di *laser cladding* e parte delle geometrie interne sono state estese fino ad entrare in contatto con l'albero centrale. Tutte queste parti necessiteranno di una lavorazione alle macchine utensili dopo la fase di stampa.



**Figura 39:** Modifiche geometriche necessarie per realizzare l'*impeller*



**Figura 40:** *Impeller realizzato tramite laser cladding*

I costi di stampa stimati sono i seguenti:

Consumable	Quantity	Price	Cost
Material	85.36 kg	69.67 € €/kg	5,947.20 €
Shield Gas	181.70 m <sup>3</sup>	3.50 €/m <sup>3</sup>	635.95 €
Inertization	8.00 m <sup>3</sup>	3.50 €/m <sup>3</sup>	0.00 €
Electricity	1241.62 kWh	0.24 €/kWh	297.99 €
<b>Print cost</b>			<b>6,881.14 €</b>

**Tabella 11:** *Riassunto dello studio di fattibilità*

Le proprietà meccaniche del materiale stampato dipendono dall'orientamento dei piani di stampa. In questo caso, i valori minori sono comparabili alle caratteristiche che si otterrebbero con un processo di fonderia, come evidenziato nella seguente tabella:

		UNE EN ISO 6892-1						
	Cast Properties (AMS 5383)	Wrought Properties (AMS 5662)	Meltio XY properties (S.A. + A.H.)	Meltio XZ properties (S.A. + A.H.)	Meltio XY properties (S.A.)	Meltio XZ properties (S.A.)	Meltio XZ Properties (As printed)	
Ultimate Tensile strength (UTS) [MPa]	802	1241	1256 ± 11	1208 ± 49	1016 ± 28	925 ± 86	833 ± 50	IR
			Published in Q4					Blue
Yield strength [MPa]	758	1034	1025 ± 7	980 ± 2	660 ± 10	631 ± 10	537 ± 32	IR
			Published in Q4					Blue
Elongation [%]	5	10	11 ± 1	10 ± 5	18 ± 6	15 ± 2	25 ± 3	IR
			Published in Q4					Blue
*Test Carried Out In CETEMET <a href="mailto:i+d+i@cetemet.es">i+d+i@cetemet.es</a>								

**Tabella 12:** Confronto delle proprietà meccaniche di manufatti realizzati con lo stesso materiale

## 9. SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

L'opportunità di limitare gli sprechi di metallo bianco tramite l'uso di *additive manufacturing* consente di diminuire ulteriormente i costi di produzione alleggerendo anche il carico di lavoro che grava sugli operai e contribuendo a ridurre i rischi sul luogo di lavoro, soprattutto nel caso in cui il materiale d'apporto sia fornito sottoforma di filo e non polvere. Non è da trascurare anche la riduzione dell'impatto ambientale derivante dal minor spreco di risorse, aspetto su cui sempre più aziende investono in questi anni.

## 10. CONCLUSIONI

Il progetto di tesi esposto elenca tutti i punti necessari per eseguire uno studio di fattibilità economica e tecnica per l'acquisto di un macchinario con tecnologia *direct energy deposition*. Dall'analisi della letteratura di settore è emerso come la struttura metallurgica del babbitt possa beneficiare dell'utilizzo di un macchinario di *laser cladding* confermando la possibilità di creare *coating* per i cuscinetti utilizzando questo processo. Le informazioni ricavate dai report sono state validate tramite la realizzazione e i test dei provini, evidenziando però come possano variare considerevolmente le caratteristiche meccaniche in base ai parametri e alla velocità di stampa, pur depositando lo stesso materiale.

Con l'analisi dei costi di produzione si è potuto notare come la possibilità di mantenere l'impianto Meltio in funzione senza la necessità di supervisione sia stato un fattore chiave per la prevalenza rispetto a quello del competitor, anche a fronte di un rateo di deposizione molto modesto a causa della potenza limitata del laser installato. I risultati di questa analisi sono fortemente influenzati dal costo al chilogrammo del metallo bianco: nei 48 mesi precedenti a questa analisi esso è passato da un valore di 26 €/Kg ad un costo attuale di 36 €/Kg, un incremento del 38%; ne consegue che un risparmio di questo materiale diventa sempre più fondamentale all'aumentare del prezzo di acquisto per ridurre il più possibile i costi di produzione.

Per quanto riguarda i tempi di produzione, essi sono in alcuni casi risultati maggiori rispetto al processo tradizionale ma, come già esposto all'interno dell'elaborato, questo aspetto non rappresenta un problema in quanto l'impianto di *laser cladding* verrà affiancato agli attuali macchinari senza sostituirli e parecchi cuscinetti verranno prodotti ancora tramite i processi già adottati.

L'azienda Meltio è una impresa aperta nel 2019 che sta investendo fortemente nella ricerca e nell'ottimizzazione del suo macchinario alimentato tramite filo, testando nuovi materiali stampabili ogni anno e aumentando la potenza del laser che è in grado di ospitare nella testa di stampa; proprio durante il periodo di conclusione di

questa tesi è stato presentato dalla ditta in questione un nuovo modello denominato *Engine Blue* che adotta un laser con una lunghezza d'onda inferiore e una potenza di 1,4 kW, un incremento del 15%. Risulta logico supporre che tramite upgrade sarà possibile negli anni futuri incrementare la produttività del macchinario, riducendo ulteriormente i costi e i tempi.

Infine, l'ultimo aspetto affrontato in questo elaborato è la capacità di riconfigurare il macchinario per eseguire operazioni differenti, come ad esempio la riparazione dei supporti di acciaio dei cuscinetti nei punti di usura oppure sondare nuovi mercati con l'utilizzo dell'*additive manufacturing*, come nel caso esaminato della girante realizzata in Inconel 718. Questa opportunità potrebbe consentire di raggiungere in tempi minori il *break even point* dell'investimento.

## 11. BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Funaioli, A. Maggiore, U. Meneghetti, *Lezioni di meccanica applicata alle macchine*, Pàtron (2009)
- [2] Babbitt, Isaac, Ely, A.B, Whiting, William, *A Mode of Making Boxes for Axles and Gudgeons*, U.S. Patent 1252, (1839)
- [3] M. Moazami Goudarzi, S.A. Jenabali Jahromi, A. Nazarboland, *Investigation of characteristics of tin-based white metals as a bearing material*, *Materials and Design* 30 (2009)
- [4] D. Dewei, W. Junyu, M. Fanmin, W. Hongming, S. Qi, Z. Yong (2023), *Laser remelting effect on casting and CMT surfacing Babbitt metal*, *Laser & Optoelectronics Progress*, vol. 16, no. 15, p. 1514010.
- [5] Yuquan Ni, Guangneng Dong, Zhe Tong, Xing Li and Wei Wang, *Effect of laser remelting on tribological properties of Babbitt alloy* (2019)
- [6] Wenrui Luo, Danyang Lin, Xin Xi, Yaokun Wang, Yan Liu, Duo Liu, Bo Chen, Hong Bian, Yanyu Song, Fuyun Liu, Xiaoguo Song, *High-strength and wear-resistant Babbitt alloy coatings prepared through in-situ alloying*, *Surface & Coatings Technology* (2024)
- [7] David Bergström, *The Absorptance of Metallic Alloys to Nd:YAG and Nd:YLF Laser Light*, Luleå University of Technology, , Luleå (2005)
- [8] Jingyu Zhao, Kai Sun, Gang Liang, Congcong Xu, Jiahui Zhao, Feng Xue, Jian Zhou, *Effect of Zn additions on the microstructure and mechanical properties of Sn-Babbitt alloys fabricated by arc deposition*, *journal of materials research and technology* (2021)
- [9] International Organization for Standardization, *Plain bearings - Metallic multilayer plain bearings - Part 1: Non-destructive ultrasonic testing of bond of thickness greater than or equal to 0,5 mm*, ISO 4386-1:2019(E) (2019)
- [10] K. Rajaguru, T. Karthikeyan, V. Vijayan, *Additive manufacturing – State of art* (2019)

[11] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, Additive Manufacturing Technologies, Springer (2016)

[12] Chan Kyu Kima, Si Geun Choib, Jong Hyoung Kimb, Hyeon Jun Joc, Young-Cheon Joc, Seong-pil Choic, Young Tae Choa (2020), Characterization of surface modification by laser cladding using low melting point metal, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 87, the Korean society of Industrial and Engineering Chemistry

[13] A. Pareschi, Impianti industriali, Esculapio (2007)