

# Ricerca di Sistema elettrico



Progettazione e realizzazione di scambiatori di calore  
mediante processi di AM (LA3.2)

Daniele Mirabile Gattia, Giuseppe Corallo, Luciano Pilloni

Ugo De Angelis, Angelo Tati

## Progettazione e realizzazione di scambiatori di calore mediante processi di AM

PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI SCAMBIATORI DI CALORE MEDIANTE PROCESSI DI AM  
(LA 3.2)

Daniele Mirabile Gattia, Giuseppe Corallo, Luciano Pilloni, Ugo De Angelis, Angelo Tati

ENEA – SSPT-TIMAS-MADD – Laboratorio Tecnologie e Materiali per la Manifattura Additiva

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano  
Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: *1.4 Materiali di frontiera per usi energetici*

Linea di attività: LA 3.2

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile del Work Package: Daniele Mirabile Gattia

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

## Indice

1	Risultati attesi .....	5
2	Risultati ottenuti .....	5
2.1	Produzione di una lega ferritica, su composizione di ENEA, con granulometria indicativamente compresa tra 15 e 45 micron, adeguata per processi di stampa di tipo laser in quantità almeno pari a 50kg; .....	5
2.2	Produzione della nuova lega ferritica in forma di laminati, a partire da processo VIM5	
2.3	Realizzazione di campioni per prove di trazione e di resilienza con la nuova lega per studiarne le caratteristiche meccaniche .....	6
2.4	Realizzazione di scambiatori di calore con la nuova lega ferritica mediante processi AM; 6	
2.5	Realizzazione di campioni di prova con la nuova lega ferritica mediante processi AM laser; 6	
2.6	Realizzazione di uno scambiatore di calore mediante EBM in lega di Titanio (assemblato) - Da verificare la realizzazione dello scambiatore, privo di polvere all'interno e la sua funzionalità; .....	6
2.7	Realizzazione di spaccati dello scambiatore in altre leghe metalliche ad elevata conducibilità termica. Indagini microstrutturali; spessore degli strati < 1 mm; conducibilità termica della lega utilizzata superiore a 100 W/mK; densità della lega utilizzata < 3 g/cm <sup>3</sup> ..6	
2.8	Redazione di un rapporto tecnico per LA con tutti i principali risultati sperimentali ottenuti.....	7
3	Prodotti attesi .....	7
4	Prodotti sviluppati .....	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati .....	8
6	Sintesi delle attività svolte.....	8
7	Dettaglio delle attività svolte .....	8
7.1	Lega ferritica per lo scambio termico in forma di laminati e di polvere .....	9
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte .....	24
9	Pubblicazioni scientifiche.....	25
10	Eventi di disseminazione .....	25
11	Riferimenti bibliografici .....	28

## Indice delle figure

Figura 1: scambiatori di calore, a 2 e 7 canali, realizzati in acciaio inox nel PTR 2019-2021 mediante processi DMLS .....	9
Figura 2: campioni ottenuti dai laminati e trattati termicamente .....	10
Figura 3: micrografia di alcuni campioni trattati termicamente .....	11
Figura 4: campioni in lega ferritica per prove di trazione e resilienza .....	11
Figura 5: immagine SEM della superficie di frattura del campione per resilienza ottenuto da laminati (sinistra) e di quello ottenuto mediante manifattura additiva (destra) .....	12
Figura 6: distribuzione granulometrica della lega Fe16Cr1Ti ottenuta mediante gas atomizzazione .....	14
Figura 7: immagine SEM delle particelle di polvere in lega ferritica. ....	15
Figura 8: diffrattogramma X della lega ferritica prodotta. ....	15
Figura 9: immagini dello scambiatore di calore durante l'installazione e i test su banco prova. In basso a destra è visibile un'immagine acquisita con termocamera durante le prove. ....	17
Figura 10: perdite di carico nei due canali dello scambiatore di calore realizzato in lega ferritica mediante processi additivi .....	18
Figura 11: risultati misure di scambio termico relative allo scambiatore in lega ferritica in confronto con quello in acciaio inox .....	18
Figura 12: spaccati dello scambiatore realizzati mediante processi additivi a letto di polvere in lega AlSi10Mg .....	20
Figura 13: a sinistra, stampante EBM A2X della GE presente presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA. A destra è visibile la schermata del software di controllo della macchina durante la stampa. ....	21
Figura 14: le immagini riportano le varie fasi del processo di stampa 3D per metalli EBM, utilizzato per la realizzazione dello scambiatore di calore a spirale in lega di titanio. a) fase di fusione delle particelle; b) sabbiatura dello scambiatore dopo la stampa; c) scambiatore a spirale sul piatto di stampa con i supporti; d) supporti rimossi dallo scambiatore; e) scambiatore a spirale pronto per i test su banco prova (lato canali); f) scambiatore a spirale lato inferiore. ....	23
Figura 15: lo scambiatore a spirale prima (a sinistra) e durante i test su banco prova (a destra, immagine acquisita con termocamera). ....	24
Figura 16: perdite di carico e scambio termico relativo allo scambiatore a spirale realizzato mediante EBM. A destra è riportata la simulazione dello scambiatore in condizioni analoghe a quelle relative ai risultati in Figura 10, destra. ....	24
Figura 17: partecipazione al MAKER FAIRE edizione ottobre 2023, con presentazione prototipi .....	26
Figura 18: partecipazione alla conferenza Zero Emission Mediterranean 2024 .....	26
Figura 19: Poster con le attività del progetto presentato alla conferenza Zero Emission Mediterranean 2024. ....	27

Figura 20: partecipazione alla fiera MAKER FAIRE 2024 .....	27
---	----

## Indice delle tabelle

Tabella 1: composizione chimica lega metallica realizzata in forma di laminati .....	10
Tabella 2: risultati delle prove di trazione .....	11
Tabella 3: composizione della lega Fe16Cr1Ti .....	13
Tabella 4: proprietà reologiche lega Fe16Cr1Ti in forma di polvere .....	14
Tabella 5: composizione lega AlSi10Mg utilizzata per la realizzazione mediante processi additivi a letto di polvere degli spaccati dello scambiatore .....	19

# 1 Risultati attesi

Gli obiettivi prefissati per le LA 3.2 sono:

- Produzione di una lega ferritica, su composizione di ENEA, con granulometria indicativamente compresa tra 15 e 45 micron, adeguata per processi di stampa di tipo laser in quantità almeno pari a 50kg;
- Produzione della nuova lega ferritica in forma di laminati, a partire da processo VIM;
- Realizzazione di campioni per prove di trazione e di resilienza con la nuova lega per studiarne le caratteristiche meccaniche;
- Realizzazione di scambiatori di calore con la nuova lega ferritica mediante processi AM laser;
- Realizzazione di campioni di prova con la nuova lega ferritica mediante processi AM laser;
- Realizzazione di uno scambiatore di calore mediante EBM in lega di Titanio (assemblato) - Da verificare la realizzazione dello scambiatore, privo di polvere all'interno e la sua funzionalità;
- Realizzazione di spaccati dello scambiatore in altre leghe metalliche ad elevata conducibilità termica;
- Indagini microstrutturali; spessore degli strati < 1 mm; conducibilità termica della lega utilizzata superiore a 100 W/mK; densità della lega utilizzata < 3 g/cm<sup>3</sup>;
- Redazione di un rapporto tecnico per LA con tutti i principali risultati sperimentali ottenuti.

## 2 Risultati ottenuti

### 2.1 Produzione di una lega ferritica, su composizione di ENEA, con granulometria indicativamente compresa tra 15 e 45 micron, adeguata per processi di stampa di tipo laser in quantità almeno pari a 50kg;

Nella LA 3.1, propedeutica alla presente LA 3.2, era stata progettata una lega ferritica per applicazioni nel cambio dello scambio termico. La lega è stata infatti concepita per la produzione di scambiatori di calore per applicazioni in ambiente corrosivo alcalino, quale quello presente in macchine ad assorbimento. La lega è stata prodotta in quantità superiore a quanto previsto nel progetto (> 50kg), in forma di particelle sferiche con distribuzione granulometrica compresa tra 15 e 45 micron. Questo ha consentito il successivo processamento all'interno di stampanti 3D a letto di polvere con sorgente laser.

### 2.2 Produzione della nuova lega ferritica in forma di laminati, a partire da processo VIM

Tra risultati del progetto era prevista la produzione della lega ferritica in forma di laminati mediante processi di Vacuum Induction Melting (VIM). La lega prodotta in forma di laminati è stata utilizzata per la realizzazione di campioni per prove meccaniche, indagini microstrutturali e funzionali.

### 2.3 Realizzazione di campioni per prove di trazione e di resilienza con la nuova lega per studiarne le caratteristiche meccaniche

La lega prodotta durante il progetto è stata utilizzata per la realizzazione di campioni per prove meccaniche, al fine di valutare le proprietà meccaniche, mediante prove di trazione e di resilienza.

### 2.4 Realizzazione di scambiatori di calore con la nuova lega ferritica mediante processi AM;

La nuova lega ferritica prodotta in forma di particelle sferiche mediante gas atomizzazione è stata utilizzata per la realizzazione di uno scambiatore di calore a due canali (lato caldo e lato freddo). Lo scambiatore è stato testato sul banco prova per la misura delle perdite di carico e del comportamento termofluidodinamico. Le prove sono state condotte tra 2.5 e 60°C e con portate inferiori a 1000 l/h.

### 2.5 Realizzazione di campioni di prova con la nuova lega ferritica mediante processi AM laser;

Sono stati realizzati, mediante processi a letto di polvere, campioni di prova utilizzando la nuova lega ferritica. I campioni sono stati realizzati con opportuna geometria per l'effettuazione del comportamento meccanico e termico.

### 2.6 Realizzazione di uno scambiatore di calore mediante EBM in lega di Titanio (assemblato) - Da verificare la realizzazione dello scambiatore, privo di polvere all'interno e la sua funzionalità;

Il processo EBM consente un maggiore tasso di produzione rispetto ai processi Laser, ma presenta il problema della rimozione della polvere da canali chiusi e non accessibili. La presente attività ha quindi previsto la stampa di un primo prototipo di scambiatore mediante processi EBM. Il prototipo è il punto di partenza per una futura attività sperimentale che vede la possibilità di realizzare scambiatori di calore con processi a maggiore produttività e minore consumo di materiali. Oltre alla semplice verifica della funzionalità, lo scambiatore è stato anche testato sul banco prova per la misura delle perdite di carico e del comportamento termofluidodinamico. Le prove sono state condotte tra 2.5 e 60°C e con portate inferiori a 1000 l/h.

### 2.7 Realizzazione di spaccati dello scambiatore in altre leghe metalliche ad elevata conducibilità termica. Indagini microstrutturali; spessore degli strati < 1 mm; conducibilità termica della lega utilizzata superiore a 100 W/mK; densità della lega utilizzata < 3 g/cm<sup>3</sup>

Nel precedente PTR erano stati realizzati alcuni scambiatori di calore per macchine ad assorbimento in acciaio inossidabile. I risultati ottenuti hanno permesso di valutare le potenzialità della tecnologia nella realizzazione di scambiatori di calore in materiali diversi dall'acciaio inox. La scelta è ricaduta su una lega di alluminio AlSi10Mg che può essere

utilizzata nel caso di fluidi non corrosivi. I campioni realizzati permettono di verificare la possibilità di realizzare canali con geometria altamente convoluta con spessori fino a 0.5 mm, utilizzando una lega con conducibilità pari a circa 160 W/mK, in confronto ai 13-15 W/mK dell'acciaio inox AISI 316, e una densità pari a circa 1/3 di quella dell'acciaio citato. Sono stati realizzati in tutto 5 spaccati dello scambiatore con spessore di parete differente.

## 2.8 Redazione di un rapporto tecnico per LA con tutti i principali risultati sperimentali ottenuti.

Il presente rapporto tecnico descrive tutti i risultati sperimentali ottenuti nella presente linea di attività e indicazioni per quelle future.

## 3 Prodotti attesi

Di seguito si riporta la lista dei prodotti attesi nella LA:

- Produzione di una lega ferritica, su composizione di ENEA, con granulometria indicativamente compresa tra 15 e 45 micron, adeguata per processi di stampa di tipo laser in quantità almeno pari a 50kg;
- Produzione della nuova lega ferritica in forma di laminati, a partire da processo VIM;
- Scambiatori di calore con la nuova lega ferritica mediante processi AM e comportamento scambio termico;
- Scambiatore di calore mediante realizzato mediante processi EBM in lega di Titanio (assemblato) e verifica funzionalità;
- Realizzazione di spaccati dello scambiatore in altre leghe metalliche ad elevata conducibilità termica;
- Redazione di un rapporto tecnico per LA con tutti i principali risultati sperimentali ottenuti.

## 4 Prodotti sviluppati

Si riporta di seguito la lista dei prodotti sviluppati:

- Lega ferritica in forma di polvere, con composizione Fe16Cr1Ti sviluppata da ENEA, ottenuta mediante processo di gas atomizzazione, con granulometria compresa tra 15 e 45 micron, che è stata successivamente utilizzata in processi additivi laser a letto di polvere. Quantità prodotta superiore a 50kg;
- Lega ferritica in forma di laminati di 15 mm di spessore, con composizione Fe16Cr1Ti sviluppata da ENEA, prodotti mediante processo VIM. I laminati sono stati utilizzati per la realizzazione di campioni per prove meccaniche (trazione e resilienza). Quantità superiore a 50kg;
- Scambiatori di calore con la nuova lega ferritica realizzato mediante processo additivo laser a letto di polvere. E' stato studiato il comportamento termofluidodinamico dello scambiatore utilizzando il banco prova sviluppato nel triennio precedente [i];
- Scambiatore di calore mediante realizzato mediante processo additivo Electron Beam Melting (EBM) in lega di Titanio (assemblato). L'attività prevedeva una semplice verifica della funzionalità dello scambiatore. Oltre a questa attività è invece stato studiato il

comportamento termofluidodinamico dello scambiatore: scambio termico e perdite di carico;

- Realizzazione di spaccati dello scambiatore in altre leghe metalliche ad elevata conducibilità termica. Sono stati realizzati diversi spaccati dello scambiatore di calore nella lega AISi10Mg che presenta una conducibilità termica un ordine di grandezza superiore e una densità circa tre volte inferiore a quelle dell'AISI 316, ma ridotte proprietà meccaniche;
- Redazione di un rapporto tecnico per LA con tutti i principali risultati sperimentali ottenuti. Report tecnico con misure e risultati sperimentali, descrizione dei prodotti e dei setup sperimentali.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono presenti scostamenti rispetto a quanto riportato nella proposta di progetto. Le attività hanno visto invece alcuni ulteriori approfondimenti. Nel caso dello scambiatore di calore realizzato mediante tecnologia Electron Beam Melting, era prevista una semplice verifica delle funzionalità dello scambiatore. L'attività ha visto invece la messa a punto del prototipo finale che è stato possibile testare sul banco prova sviluppato nel PTR precedente [i]. Questo risultato consente di valutare per il futuro importanti ulteriori sviluppi e ottimizzazioni della geometria realizzata, utilizzando un processo, quale quello EBM, ad elevata produttività.

## 6 Sintesi delle attività svolte

L'attività sperimentale condotta in questa LA ha permesso di raggiungere pienamente i risultati e gli obiettivi attesi. Oltre a tutte le misure funzionali e le caratterizzazioni microstrutturali e meccaniche effettuate sui materiali prodotti, sono stati realizzati 2 prototipi di scambiatori di calore con due processi differenti: uno scambiatore in lega ferritica Fe16Cr1Ti, realizzato mediante un processo additivo laser a letto di polvere; uno scambiatore in lega di titanio, realizzato mediante un processo additivo a fascio di elettroni su letto di polvere. E' stato studiato il comportamento termofluidodinamico dei due scambiatori. Nel secondo caso è stato possibile dimostrare come una tecnologia, quale quella EBM, che difficilmente consente la realizzazione di componenti con canali lunghi e con geometrie interne convolute, ma ad elevata produttività, possa essere utilizzato per la realizzazione di scambiatori di calore in materiali, quali le leghe di titanio, ad elevata resistenza meccanica e alla corrosione e a bassa densità. E' stato inoltre dimostrato come sia possibile ottenere scambiatori di tipo compatto in leghe a elevata conducibilità termica ( $> 100\text{W/mK}$ ) e bassa densità ( $< 3\text{g/cm}^3$ ).

## 7 Dettaglio delle attività svolte

L'attività sperimentale prevedeva da una parte la produzione di nuovi materiali per processi additivi, dall'altra la realizzazione, mediante questi processi, di componenti di interesse per il settore energetico. L'attività, incentrata sulla tematica dello scambio termico, ha visto la realizzazione di prototipi funzionali e lo sviluppo di materiali non attualmente presenti in

commercio, ma ha visto anche risultati che integrano la conoscenza dei processi additivi e le loro potenzialità applicative nel settore energetico.

## 7.1 Lega ferritica per lo scambio termico in forma di laminati e di polvere

Nel PTR 2019-2021 era stata studiata una nuova lega che potesse essere utilizzata in processi additivi per la realizzazione di scambiatori di calore per macchine ad assorbimento. L'attività finale ha visto la realizzazione di scambiatori di calore in acciaio inox a 2 e a 7 canali, lato caldo e lato freddo, visibili in Figura 1.



Figura 1: scambiatori di calore, a 2 e 7 canali, realizzati in acciaio inox nel PTR 2019-2021 mediante processi DMLS

Gli scambiatori sono stati realizzati partendo da uno equivalente realizzato in passato in ENEA mediante saldobrasatura.

Nella LA 3.1 è stata realizzata una versione alleggerita, del 20%, di questo scambiatore di calore, modificando la geometria esterna, eliminando il materiale dove non necessario e creando delle strutture alleggerite, ma lasciandone invariata la funzionalità. L'obiettivo finale del progetto era quindi quello di realizzare uno scambiatore di calore, analogo a quello della LA 3.1, ma nella lega ferritica progettata in ENEA.

La lega è stata progettata con l'intento di aumentare la conducibilità termica, rispetto al materiale di riferimento, l'AISI 316, eliminare dalla composizione materie prime critiche o strategiche, o limitarne la concentrazione, quale il nichel e altri elementi in lega, e mantenere una buona resistenza alla corrosione. In ultimo l'approccio è stato quello di considerare una lega che potesse essere utilizzata in processi additivi laser a letto di polvere.

E' stata quindi prima di tutto prodotta una lega ferritica, in quantità superiore ai 50 kg, in forma di laminati. Al fine di produrre i laminati, è stato utilizzato un processo di fusione a induzione sottovuoto (Vacuum Induction Melting -VIM), seguito da un preriscaldamento per la laminazione, per ottenere un'adeguata omogeneizzazione chimica a temperatura superiore a 1000°C. I lingotti sono stati laminati a caldo fino allo spessore di 15 mm.

L'impianto VIM è il processo di fusione più versatile per la produzione di varie leghe a base di Fe, Ni, Co, Al e Cu. Inoltre, questo processo è anche l'unico consentito per molte applicazioni nei settori energetico, aerospaziale e nucleare, grazie alle sue caratteristiche di fusione.

Infatti, attraverso questo tipo di impianto è possibile sia produrre leghe con specifiche chimiche molto stringenti sia ridurre alcuni elementi chimici indesiderati sfruttando le pressioni di esercizio, in particolare il grado di vuoto ottenibile.

Nel processo, una bobina di rame, raffreddata ad acqua e alimentata a corrente alternata, che contiene un crogiolo refrattario (allumina, zirconia o grafite), contenuto in una camera in grado di mantenere un elevato grado di vuoto o atmosfere inerti. L'induzione magnetica generata dal passaggio di corrente nella bobina crea correnti parassite nella carica metallica contenuta nel crogiolo che fonde per effetto Joule. I processi VIM presentano alcune caratteristiche quali: flessibilità produttiva; riduzione delle contaminazioni; controllo della pressione e della temperatura in camera; omogeneità grazie all'agitazione elettromagnetica; rimozione di gas disciolti come idrogeno e azoto. In

Tabella 1 è riportata la composizione chimica del laminato ottenuta mediante ICP-MS (AGILENT 7700), LECO e XRF (Panalytical MAG Xpro).

Tabella 1: composizione chimica lega metallica realizzata in forma di laminati

<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>	<b>W</b>	<b>Mo</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>
Bal	<0.01	<0.01	15.72	<0.05	<0.01	0,0059	0,004	0,0019

Dopo il processo di laminazione sono stati effettuati alcuni trattamenti termici al fine di modificare e ridurre la dimensione del grano.

Le prove effettuate hanno previsto diverse temperature di trattamento e diversi sistemi di raffreddamento (acqua, aria) (Figura 2) Successivamente sono state fatte le analisi metallografiche (indagini microscopiche secondo ASTM E883-11), con l'obiettivo di stimare la dimensione del grano. Inoltre sono state condotte delle misure di durezza HV10 kg a centro spessore secondo ASTM E92-17.



Figura 2: campioni ottenuti dai laminati e trattati termicamente

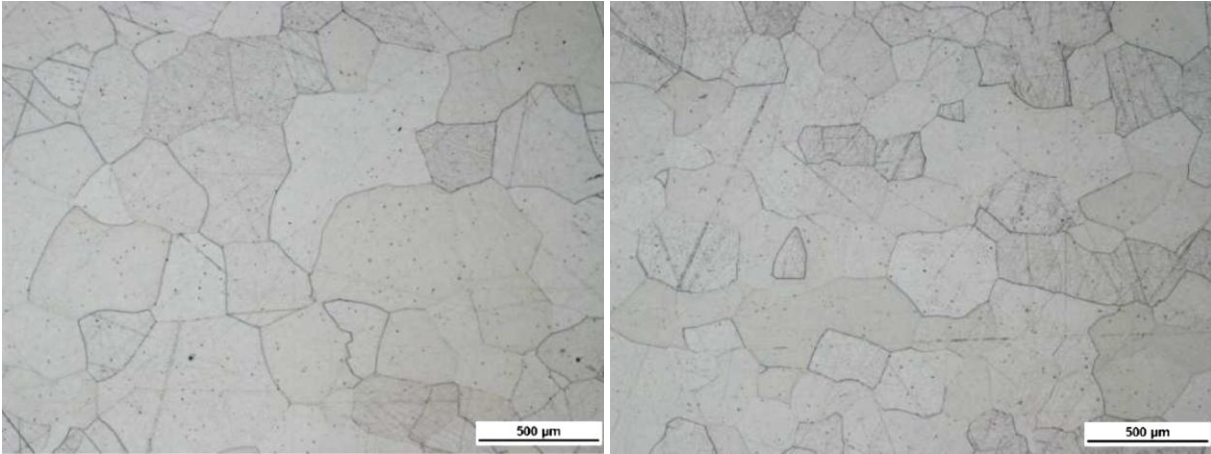


Figura 3: micrografia di alcuni campioni trattati termicamente

Le durezze misurate hanno mostrato valori medi pari a circa 150 HV.

Dopo il processo di laminazione e il trattamento termico sono stati realizzati dei campioni per le prove di trazione (secondo norma ASTM E8 a temperatura ambiente) e di resilienza, mediante pendolo Charpy (secondo la norma ASTM E23).



Figura 4: campioni in lega ferritica per prove di trazione e resilienza

Le prove di trazione sono state eseguite a temperatura ambiente (20°C), velocità di prova 1 mm/min (Tabella 2)

Tabella 2: risultati delle prove di trazione

Sigla campione	Carico max Rm MPa	R 0.2 % MPa	Allungamento totale %
b11	399.3	247.7	38.2
b12	399.2	247.8	41.3

b13	400.3	250.9	36.8
b14	402.7	249.1	39.7

I risultati delle prove di resilienza hanno fornito un valore di energia di impatto inferiore a 8 J mentre il provino stampato presenta valori prossimi a 13 J. Valori più bassi sono stati riscontrati nella lega con composizione 14.5Cr2.5Ti, ottenuta mediante processo laser a letto di polvere, che ha dimostrato valori di carico massimo leggermente superiori a quelli della lega Fe16Cr1Ti. La Figura 5 mostra l'immagine acquisita al SEM della superficie di frattura dei provini per resilienza da laminato e l'immagine del provino di resilienza ottenuto da campioni realizzati mediante manifattura additiva.



Figura 5: immagine SEM della superficie di frattura del campione per resilienza ottenuto da laminati (sinistra) e di quello ottenuto mediante manifattura additiva (destra)

L'attività mostra come sia stato possibile produrre la lega ferritica in forma di laminati e in forma di polvere gas atomizzata. Nel caso del laminato è opportuno, nel prossimo futuro, ridurre la dimensione del grano, fino a poche decine di micron, con l'obiettivo di incrementarne il comportamento meccanico. Questo potrà essere fatto attraverso opportuni trattamenti termo-meccanici. Lo studio del grano affinato consentirà di effettuare dei confronti con i campioni ottenuti mediante additive manufacturing. Per quanto riguarda i componenti realizzati in lega ferritica mediante processi additivi, si dovrà in futuro sviluppare i trattamenti termici di distensione o "stress relieving" anche al fine di migliorarne le caratteristiche meccaniche.

L'attività sperimentale prevedeva la produzione della lega ferritica in forma di polvere, mediante processi di gas atomizzazione, con granulometria compresa tra 15 e 45 µm. I processi di gas atomizzazione consentono di produrre polveri, di materiali metallici e ceramici, con elevata sferoidicità. Sono presenti diversi processi di gas atomizzazione: Vacuum Induction Melting Inert Gas Atomization (VIGA), Electrode Induction Melting Gas Atomization (EIGA), Plasma Atomization (PA), Water Atomization, Cryogenics Liquid Atomization, Centrifugal Atomization etc.. In generale, nel caso di leghe metalliche, il metallo fuso viene disperso da un getto ad alta velocità di gas (aria, azoto, argon o elio). Il metallo si raffredda nella camera in forma di particelle. Queste vengono recuperate attraverso una tramoggia e setacciate per recuperare le diverse frazioni granulometriche [ii]. La lega ferritica è stata prodotta in quantità superiore al target di progetto (> 50kg) per i successivi processi volti alla realizzazione dello scambiatore di calore.

La composizione chimica della lega ferritica, ottenuta mediante gas atomizzazione, è stata determinata mediante spettrometria di emissione atomica al plasma accoppiato induttivamente (ICP-OES) e mediante combustione (C,S,O,N e H). In Tabella 3 è riportata la composizione della lega Fe16Cr1Ti. La composizione ottenuta rispetta le specifiche che erano state definite nella LA 3.1.

Tabella 3: composizione della lega Fe16Cr1Ti

<b>Elemento</b>	<b>Composizione (wt%)</b>
<b>Fe</b>	Bal
<b>Cr</b>	16.43
<b>C</b>	0.004316
<b>Mn</b>	0.09415
<b>Ti</b>	0.95
<b>W</b>	0.0035
<b>Ta</b>	0.00249
<b>Si</b>	0.0465
<b>S</b>	0.002867
<b>P</b>	0.00315
<b>Ni</b>	0.01455
<b>Mo</b>	0.0335
<b>Nb</b>	0.02895
<b>Al</b>	0.00532
<b>B</b>	0.00047
<b>N</b>	0.0154
<b>O</b>	0.0195
<b>Co</b>	0.00562
<b>Cu</b>	0.00515
<b>Zr</b>	0.00028
<b>Ce</b>	0.01384
<b>As</b>	0.00116
<b>Sb</b>	0.00281
<b>Sn</b>	0.00136

Nella Tabella 4 sono invece riportate i risultati delle prove reologiche, che considerano anche misure di scorrevolezza, mediante imbuto Hall, la tap e apparent density. La misura di scorrevolezza delle polveri viene effettuata misurando il tempo di afflusso di un campione ben essiccato di 50 g di polvere. L'essiccazione preliminare delle polveri deve essere effettuata in muffola alla temperatura di 40°C per un tempo superiore a 30 minuti.

In Figura 6 è mostrata la distribuzione granulometrica delle polveri di lega Fe16Cr1Ti ottenuta, secondo lo standard ISO 13320:2020, mediante il granulometro Mastersizer 3000. In Figura 7 è riportata l'immagine ottenuta mediante microscopio elettronico a Scansione, SEM.

Tabella 4: proprietà reologiche lega Fe16Cr1Ti in forma di polvere

Proprietà	Valore
D10 [ $\mu\text{m}$ ]	16.221
D50 [ $\mu\text{m}$ ]	28.099
D100 [ $\mu\text{m}$ ]	47.250
Hall Flow [s/50]	29,24
Tap Density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	4.79
Apparent Density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	4.07

Il valore di scorrevolezza riscontrato è in linea con i valori riportati per acciai o altre leghe metalliche per processi additivi laser a letto di polvere [iii, iv,v].

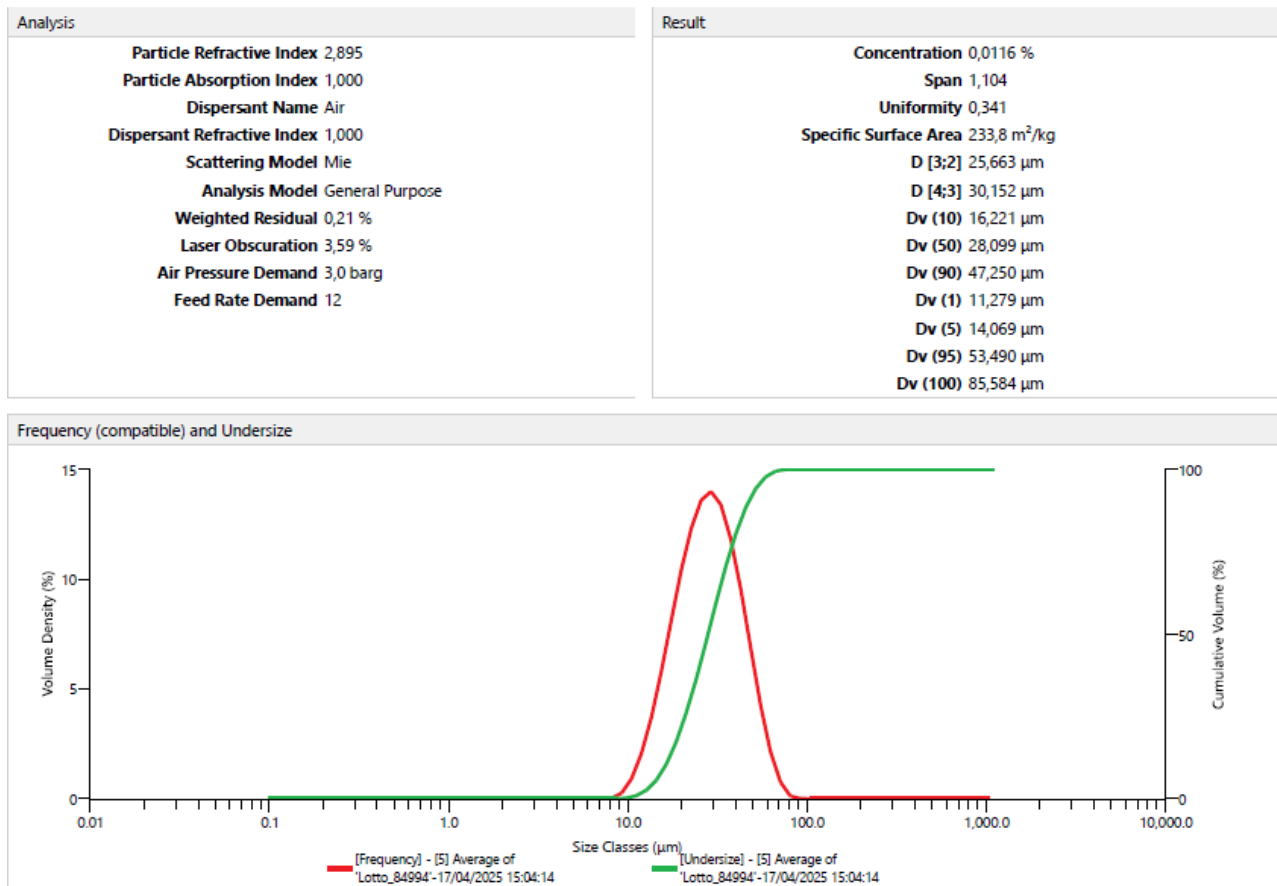


Figura 6: distribuzione granulometrica della lega Fe16Cr1Ti ottenuta mediante gas atomizzazione

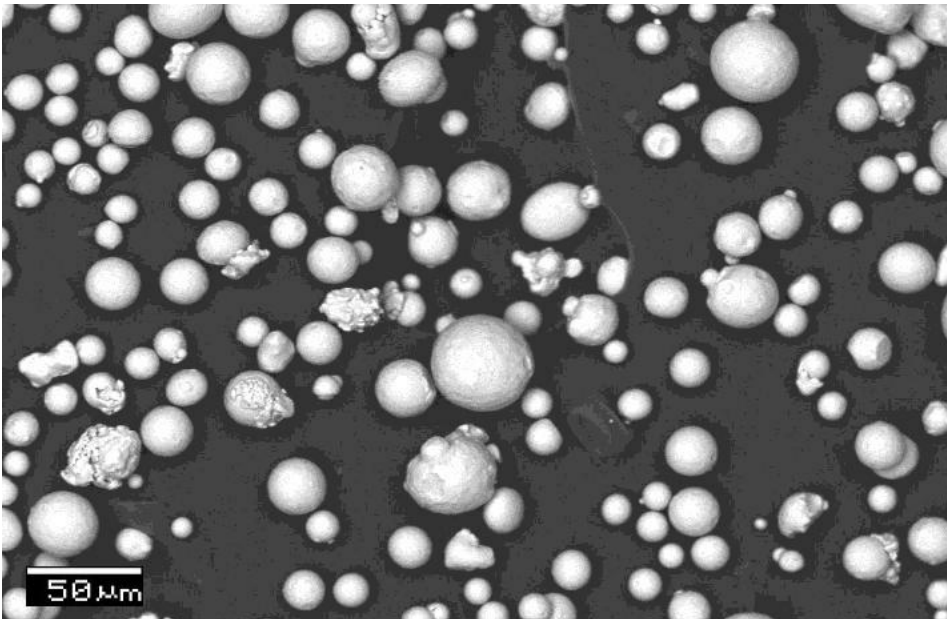


Figura 7: immagine SEM delle particelle di polvere in lega ferritica.

In Figura 8 è riportato il diffrattogramma X della lega prodotta in forma di polvere mediante gas atomizzazione, ottenuto con un diffrattometro a Raggi X SmartLab Rigaku. Nell'immagine sono riportate le riflessioni relative alla ferrite. Il diffrattogramma X mostra come non siano presenti altre fasi cristalline nella polvere.

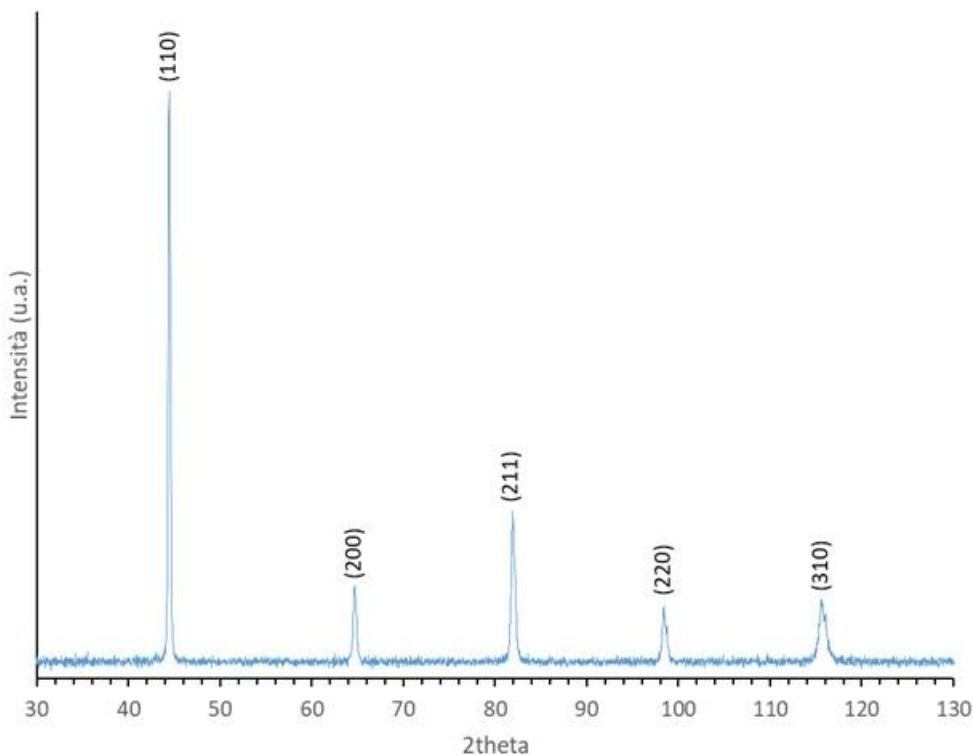


Figura 8: diffrattogramma X della lega ferritica prodotta.

La lega prodotta in forma di polvere mediante gas atomizzazione, è stata utilizzata in processi additivi laser a letto di polvere con una stampante EOS M280, presso l'azienda 3D Metal Srl. Le caratteristiche principali della macchina sono riportate di seguito:

- Potenza max laser : 400W;
- Area di esposizione : 250 mm x 250 mm;
- Massima altezza utilizzabile: 310 mm;
- Velocità massima di scansione: fino a 7000 mm/s;
- Spot laser : 100 – 500 um

La lega ferritica è stata quindi utilizzata per la realizzazione di uno scambiatore di calore di tipo compatto, analogo a quelli usati in macchine ad assorbimento a ciclo acqua/ammoniaca. Questo, che rappresenta uno dei principali risultati del WP3, è stato ottenuto nella forma alleggerita, ovvero nella geometria, interna ed esterna, analoga a quella definita nella LA 3.1.

Una volta realizzato lo scambiatore sono state effettuate i test su banco prova al fine di determinare le perdite di carico e lo scambio termico. Per condurre le prove lo scambiatore è stato collegato a due sistemi di alimentazione, uno a temperatura circa costante di 17-18 °C e l'altro con temperatura variabile, utilizzando un refrigeratore/riscaldatore Lauda 5000VC con potenza di 5 kW in raffreddamento e 4 kW in riscaldamento. Il fluido di lavoro utilizzato nei due canali è acqua. Le misure sono state condotte in controcorrente.

In Figura 9 è visibile lo scambiatore di calore durante l'installazione sul banco prova e l'immagine, ottenuta con termocamera, che mostra in maniera qualitativa, le zone calde e le zone fredde dei bocchelli. E' possibile vedere dall'immagine le diverse temperature delle zone di ingresso dei fluidi (calda e fredda). Il bocchello in basso a destra è utilizzato per l'ingresso del fluido a temperatura variabile (5-60°C), mentre il bocchello opposto, in alto a sinistra nell'immagine è quello d'uscita. Il bocchello in basso a sinistra è invece utilizzato per l'ingresso del fluido a temperatura costante (17-18°C), mentre quello in alto a destra è il bocchello d'uscita. Lo scambiatore è stato posto tra due piastre in acciaio inox, opportunamente progettate, al fine di poter consentire il passaggio dei fluidi all'interno dello scambiatore e da/verso il banco prova limitando eventuali perdite. La piastra superiore presenta dei bocchelli filettati da 1/2" saldati ed è rettificata, mentre quella inferiore è liscia e senza fori. Le piastre sono tracciate per individuare la posizione del centro. Le piastre vengono tirate mediante delle barre filettate. Prima di effettuare le prove di perdita di carico e di scambio termico sono state effettuate delle prove di tenuta con aria compressa.

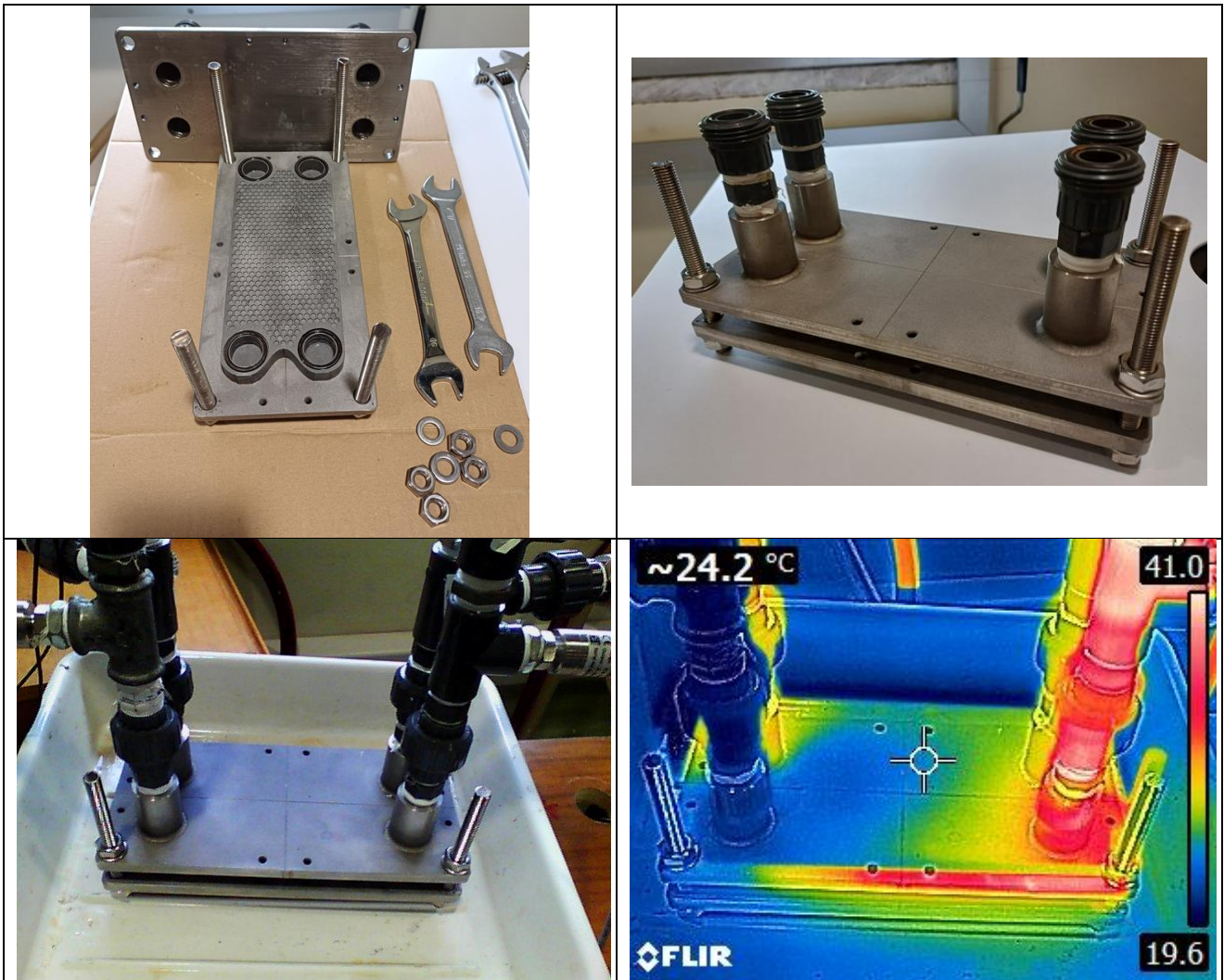


Figura 9: immagini dello scambiatore di calore durante l'installazione e i test su banco prova. In basso a destra è visibile un'immagine acquisita con termocamera durante le prove.

Le misure delle perdite di carico sono state effettuate misurando, mediante un trasduttore di pressione collegato a un sistema di acquisizione dati, la differenza di pressione tra ingresso e uscita per ognuno dei due canali. Durante la misura è stata modificata la portata del fluido e atteso il tempo necessario al superamento della fase di transitorio. Una volta stabilizzata la portata è stato acquisito il valore della differenza di pressione. Al fine di limitare la perdita di carico nello scambiatore a valori inferiori a 1500 mbar, per non danneggiare il trasduttore di pressione, le misure sono state condotte nell'intervallo 0- 800 l/h.

In Figura 10 sono riportati i risultati delle perdite di carico misurate nei due canali dello scambiatore. Il grafico mostra come le perdite di carico sui due canali siano perfettamente sovrapponibili. Questo dimostra come i canali non presentino difetti interni, intasamenti o ostruzioni dovute a difetti quali errate fusioni localizzate o porosità connesse.

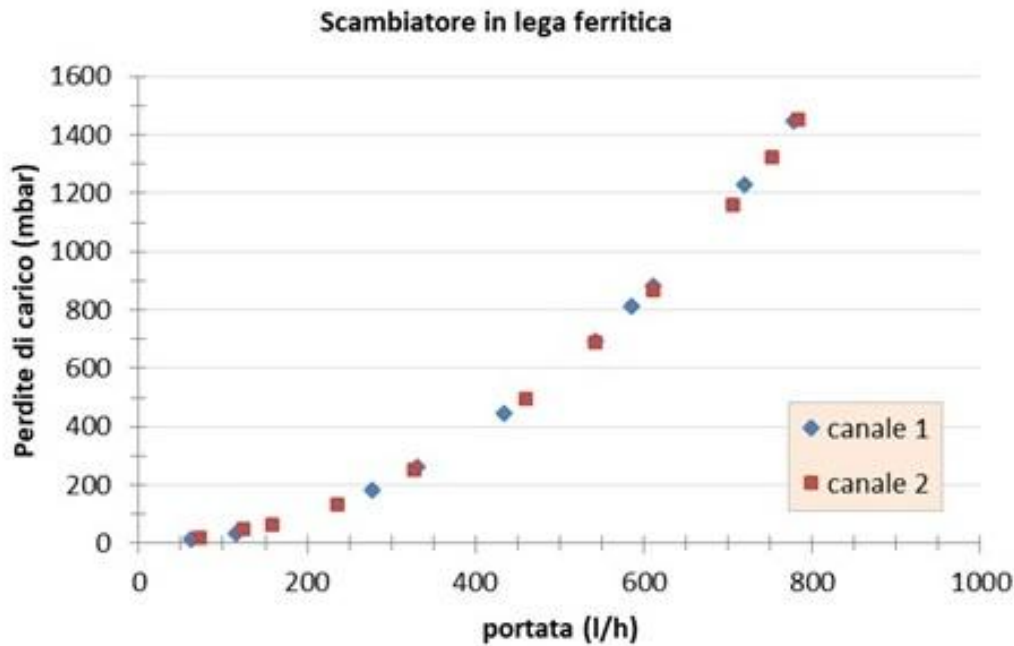


Figura 10: perdite di carico nei due canali dello scambiatore di calore realizzato in lega ferritica mediante processi additivi

Le misure di scambio termico hanno dimostrato come questo scambiatore presenti un comportamento analogo, ma superiore, rispetto a quello realizzato, sempre mediante processi additivi, in acciaio inox AISI 316. La Figura 11 mostra come a parità di condizioni di misura, lo scambiatore in lega ferritica scambi circa il 13% in più rispetto a quello in acciaio inox. Questo è dovuto a parità di geometria interna, alla conducibilità termica della lega ferritica superiore a quella dell'AISI 316.

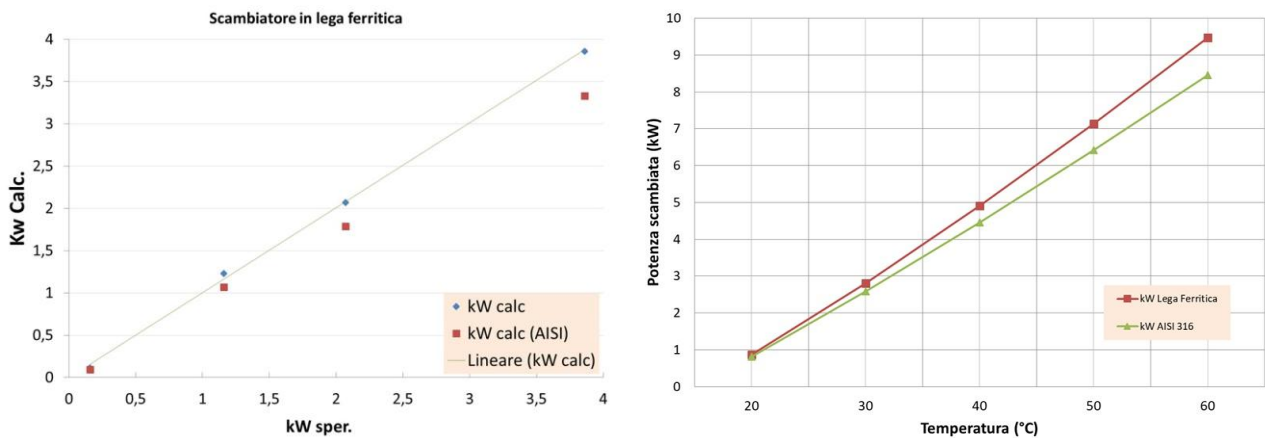


Figura 11: risultati misure di scambio termico relative allo scambiatore in lega ferritica in confronto con quello in acciaio inox

Le curve delle Figura 11 sono state ottenute dopo una regressione sui dati sperimentali ottenuti sullo scambiatore mediante l'apposita test facility ENEA, che ha permesso di ottenere una equazione di Sieder Tate opportunamente calibrata per la simulazione dello scambio termico dello scambiatore stesso, analogamente a quanto fatto nel report [i].

In particolare la Figura 11, a sinistra, è relativa al confronto tra i primi dati sperimentali e quelli simulati nelle stesse condizioni che risultano in perfetto accordo.

La Figura 11, a destra, mostra i risultati ottenuti dalla simulazione con portate nei due lati pari a 550 l/h, temperatura di ingresso del lato secondario pari a 15 °C e temperatura di ingresso del lato primario variata tra 20 e 60 °C .

L'attività sperimentale prevedeva anche la verifica della possibilità di realizzare, mediante processi additivi, scambiatori di calore con geometrie interne complesse anche in altre leghe metalliche interessanti dal punto di vista tecnologico per il settore energetico. In particolare, l'obiettivo era quello di utilizzare delle leghe, anche commerciali, ma che presentassero una conducibilità termica superiore e una densità inferiore, rispetto a quelle sperimentate in precedenza. Sono stati quindi realizzati, mediante processo additivo laser a letto di polvere, degli spaccati rappresentativi dello scambiatore con diversi spessori dei setti di separazione, fino ad arrivare a 0.5 mm. Questo valore rappresenta, al momento, un limite inferiore prima di incorrere in difetti all'interno dei canali, che possono rendere lo scambiatore inutilizzabile. In Tabella 5 è riportata la composizione della lega AlSi10Mg utilizzata per la realizzazione degli spaccati.

Tabella 5: composizione lega AlSi10Mg utilizzata per la realizzazione mediante processi additivi a letto di polvere degli spaccati dello scambiatore

<b>Elemento</b>	<b>Min (wt%)</b>	<b>Max (wt%)</b>
<b>Al</b>	Bal	Bal
<b>Si</b>	9.0	11.0
<b>Fe</b>	-	0.55
<b>Cu</b>	-	0.05
<b>Mn</b>	-	0.45
<b>Mg</b>	0.25	0.45
<b>Ni</b>	-	0.05
<b>Zn</b>	-	0.10
<b>Pb</b>	-	0.05
<b>Sn</b>	-	0.05
<b>Ti</b>	-	0.15

La conducibilità termica di questa lega, come dichiarato dal produttore, è analoga nelle due direzioni di crescita, 165 W/mK, direzione verticale, e 155, W/mK, direzione orizzontale. E' quindi un ordine di grandezza superiore a quella della lega AISI 316. Il carico di snervamento e a rottura possono variare a seconda dell'orientazione, del tipo di processo, della granulometria delle polveri di partenza e del trattamento dopo la stampa, tra valori di 230-260 MPa (Rp 0.2) e 310-460 MPa (Rm). L'allungamento a rottura è invece pari a circa 4-11 % (A). La densità della lega è compresa tra 2.64-2.66 g/cm<sup>3</sup>.

In Figura 12 sono mostrati gli spaccati ottenuti mediante processo additivo laser a letto di polvere in lega AlSiMg10.

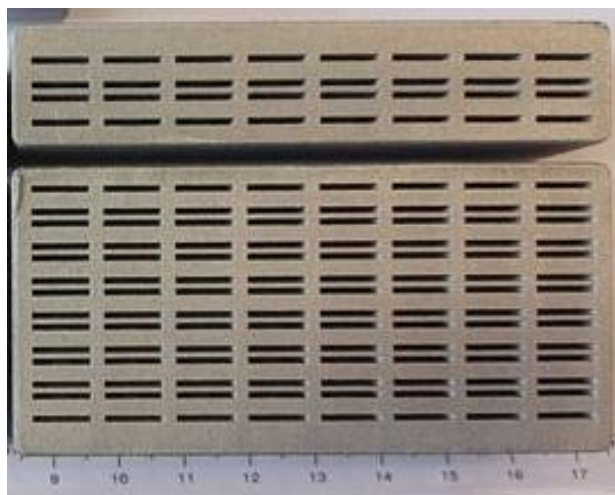


Figura 12: spaccati dello scambiatore realizzati mediante processi additivi a letto di polvere in legaAlSi10Mg

L'attività svolta ha dimostrato, nel rispetto degli obiettivi di progetto, come sia possibile realizzare degli scambiatori di calore, per applicazioni differenti rispetto a quello delle macchine ad assorbimento, ma di interesse per il settore energetico, in una lega con una conducibilità termica un ordine di grandezza superiore a quella dell'AISI 316 e una densità circa tre volte inferiore. Questi risultati permettono di aprire nuovi scenari applicativi futuri. In particolare, scambiatori di questo tipo possono essere di interesse nel caso dell'alleggerimento, anche per il settore veicolare, lavorando con fluidi idonei all'utilizzo con leghe di alluminio.

L'esperienza acquisita in questi anni presso ENEA sullo sviluppo di nuovi materiali per lo scambio termico, e sulla realizzazione di scambiatori di calore mediante processi additivi, ha permesso di esplorare le potenzialità, in questo settore applicativo, di uno dei processi additivi per leghe metalliche più produttivi tra le tecnologie attualmente presenti: l'Electron Beam Melting (EBM) [vi]. L'EBM presenta il più basso Consumo Specifico di Energia, SEC, 60.375 MJ/kg, e la più elevata velocità di stampa, 80 cm<sup>3</sup>/h, tra i processi additivi per metalli.

Il processo EBM è un processo a letto di polvere e presenta diversi vantaggi rispetto ai processi laser. La fusione delle particelle, in una EBM, avviene sottovuoto e a temperatura elevata (circa 700 °C nel caso di leghe di titanio). Da una parte è possibile avere quindi un ridotto consumo di gas, rispetto ai processi laser, e una continua pulizia delle polveri dai composti volatili assorbiti, dall'altra ridotte tensioni residue nei componenti stampati. Dopo la stampa EBM non è infatti necessario fare lunghi trattamenti termici di distensione, come richiesto nel caso di processi additivi laser a letto di polvere. L'EBM consente, mediante un'opportuna progettazione e orientazione dei componenti, di utilizzare un numero limitato di supporti. Questi, infatti, possono essere realizzati direttamente all'interno della polvere, che viene parzialmente sinterizzata creando un supporto per il fuso. Un minor utilizzo di supporti, assieme alla possibilità di recuperare la polvere mediante il "Powder Recovery System" (PRS), consente nei processi EBM di limitare drasticamente il consumo di materiale utilizzato nel processo di stampa [vii]. Questo in generale rappresenta uno dei vantaggi della manifattura additiva [viii,ix]. I supporti, con eventuale polvere intrappolata, possono essere comunque facilmente recuperati per i processi di recupero mediante fusione. Unici aspetti critici sono rappresentati dalla difficoltà della rimozione della polvere in canali convoluti e lunghi e la rugosità superficiale. Per il secondo aspetto si rimanda al report della LA 3.6, dove la

problematica è stata largamente affrontata, ottenendo una notevole riduzione della rugosità superficiale con trattamenti industriali consolidati. Presso il Centro Ricerche Casaccia di ENEA è presente una stampante EBM A2X della GE che consente di realizzare componenti in lega di titanio (Ti6Al4V) di dimensioni massime: 200x200x380 mm<sup>3</sup>.

Sulla base di queste premesse è stato progettato, in parte già nella LA 3.1, e successivamente realizzato mediante EBM, uno scambiatore di calore di tipo a spirale in lega di titanio. Questi scambiatori vengono proprio utilizzati in processi industriali dove si utilizzano liquidi sporchi e, in alcuni casi, particolarmente aggressivi. Lo scambiatore realizzato rappresenta un primo prototipo, che dimostra la possibilità di utilizzare processi EBM per realizzare scambiatori di calore. L'attività sperimentale condotta è andata oltre la semplice verifica della funzionalità, perché il componente è stato testato in laboratorio in maniera analoga allo scambiatore di calore di tipo compatto realizzato con processi laser (scambio termico e perdite di carico sui due canali).

In Figura 13, a sinistra, è visibile la stampante EBM A2X della GE presente presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA. A destra è visibile la schermata del software di controllo della macchina durante la stampa dello scambiatore.

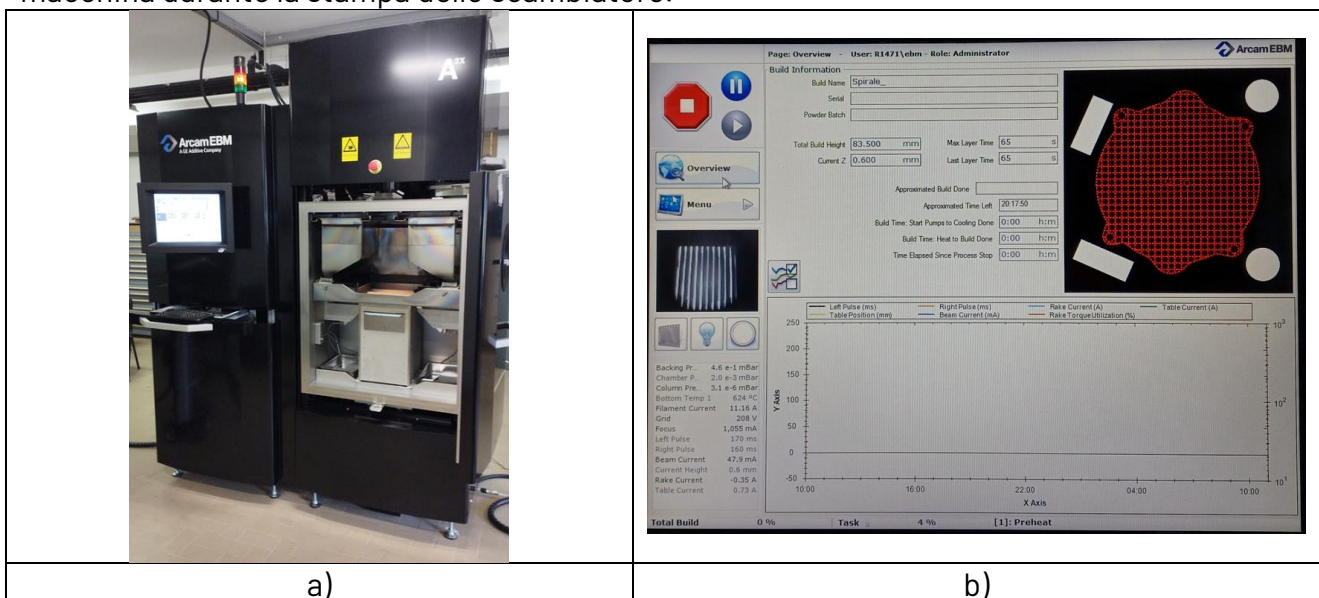


Figura 13: a sinistra, stampante EBM A2X della GE presente presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA. A destra è visibile la schermata del software di controllo della macchina durante la stampa.

In Figura 14 sono riportate le immagini relative alle varie fasi del processo di stampa per metalli EBM utilizzato per la realizzazione dello scambiatore di calore a spirale in lega di titanio. Oltre alla fase di fusione delle particelle, a), e alla fase di sabbatura nel PRS, b) è possibile vedere lo scambiatore finito, e) e f), dopo la rimozione dei supporti c) e d).

Lo scambiatore a spirale presenta due soli componenti da assemblare: la parte inferiore con i canali, i bocchelli filettati da 1/4" e i fori per i tiranti della parte superiore, che si presenta come una piastra con dei fori per il corretto posizionamento e assemblaggio. E' interessante notare come siano stati realizzati i bocchelli per il collegamento all'impianto già filettati con una misura di 1/4". Nonostante la finitura superficiale grossolana, non è stato necessario utilizzare una madrevite maschio filettata per ripassare la filettatura ottenuta nella stampa. La misura dei bocchelli è stata scelta per ridurre al minimo il loro ingombro e per massimizzare la

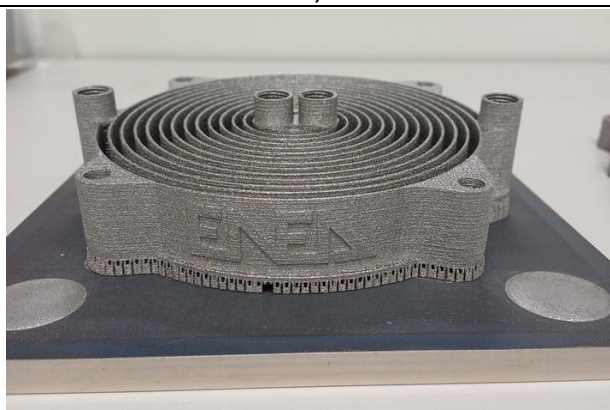
superficie di scambio. In questo caso le perdite di carico potrebbero essere affette da una sezione di ingresso del fluido limitata. Al fine di assemblare lo scambiatore è stata utilizzata una guarnizione in gomma opportunamente punzonata per il passaggio dei bocchelli e dei bulloni. Le criticità riscontrate, per l'effettuazione delle misure di scambio termico e delle perdite di carico, sono relative alle perdite di liquido tra i due canali dovuti a una non perfetta aderenza della guarnizione al bordo della spirale. Questo problema è stato tamponato utilizzando delle morse serranti e distribuendo la spinta su un'ampia superficie mediante delle piastre in acciaio. In futuro, sarà possibile considerare diverse configurazioni della piastra superiore, che potrà essere realizzata, presentando appunto una geometria semplice, anche mediante lavorazioni tradizionali. La piastra potrà essere ripensata considerando un numero di tiranti adeguato al fine di distribuire omogeneamente la tensione e eliminare eventuali perdite di fluido. Un'altra possibilità da esplorare è quella di realizzare la piastra superiore con una geometria tale che possa rendere semplice la saldatura alla parte inferiore. In questo caso però lo scambiatore non sarà più ispezionabile.



a)



b)



c)



d)

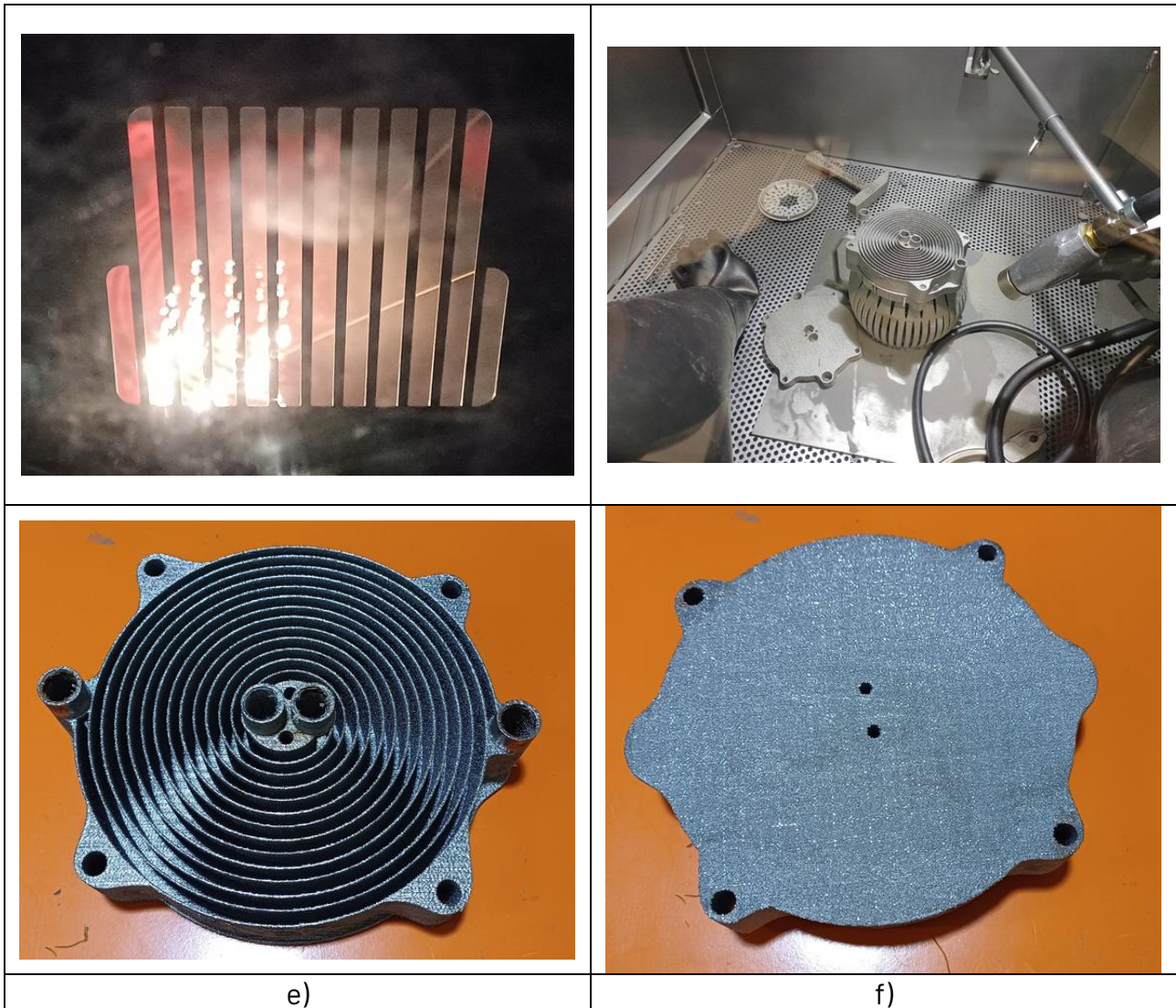


Figura 14: le immagini riportano le varie fasi del processo di stampa 3D per metalli EBM, utilizzato per la realizzazione dello scambiatore di calore a spirale in lega di titanio. a) fase di fusione delle particelle; b) sabbiatura dello scambiatore dopo la stampa; c) scambiatore a spirale sul piatto di stampa con i supporti; d) supporti rimossi dallo scambiatore; e) scambiatore a spirale pronto per i test su banco prova (lato canali); f) scambiatore a spirale lato inferiore.

Come riportato in precedenza, sono state effettuate misure di scambio termico e di perdita di carico sullo scambiatore di calore a spirale. In Figura 15 è visibile lo scambiatore a spirale prima (a sinistra) e durante i test su banco prova (a destra, immagine acquisita con termocamera). E' possibile notare le diverse temperature dei bocchelli di entrata e uscita dei due canali in controcorrente.

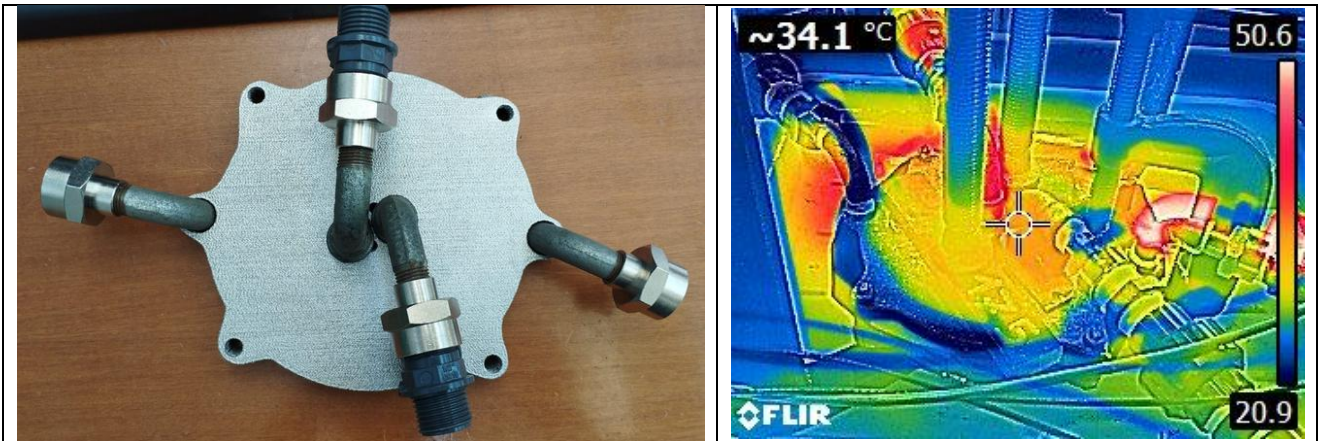


Figura 15: lo scambiatore a spirale prima (a sinistra) e durante i test su banco prova (a destra, immagine acquisita con termocamera).

In Figura 16 sono in ultimo riportate i risultati delle prove effettuati con lo scambiatore a spirale realizzato mediante EBM: a sinistra sono visibili le perdite di carico e a destra la potenza scambiata a diverse temperature

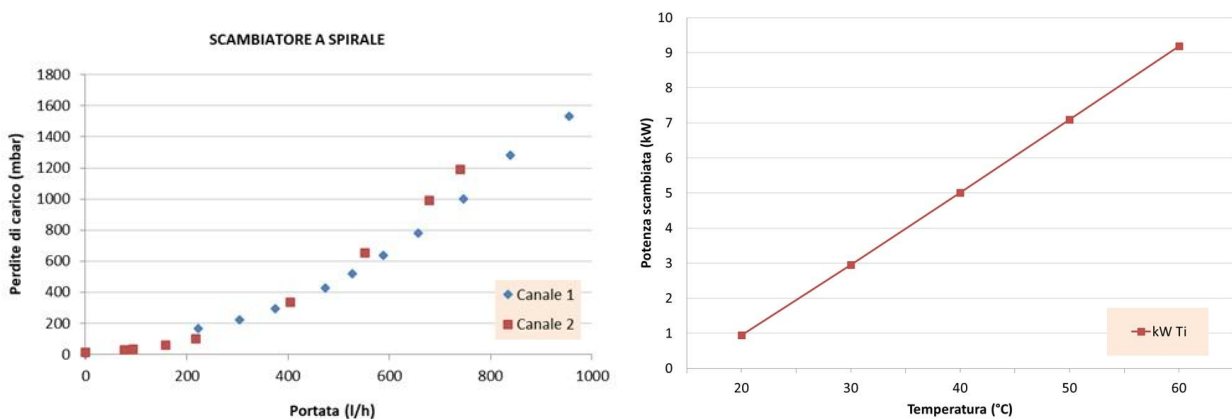


Figura 16: perdite di carico e scambio termico relativo allo scambiatore a spirale realizzato mediante EBM. A destra è riportata la simulazione dello scambiatore in condizioni analoghe a quelle relative ai risultati in Figura 11, destra.

L'attività sperimentale condotta nella LA 3.2 ha consentito di raggiungere pienamente gli obiettivi principali del WP3, e in particolare la realizzazione, mediante processi additivi, di uno scambiatore di calore di tipo compatto per macchine ad assorbimento [x], utilizzando una lega non attualmente esistente in commercio, né in forma di laminati né di polvere. Lo scambiatore è stato ottenuto nella forma alleggerita, ovvero nella geometria, interna ed esterna, analoga a quella definita nella LA 3.1. Inoltre è stato dimostrato come sia possibile realizzare scambiatori di calore, in materiali, quali le leghe di titanio, difficili da lavorare con lavorazioni tradizionali, mediante manifattura additiva con processo Electron Beam Melting.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state richieste consulenze per le attività sperimentali condotte nella presente LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Daniele Mirabile Gattia, Luciano Pilloni, Giuseppe Corallo, Alloy Design for AM: A Ferritic Alloy for Applications in Corrosive Alkaline Environment, Key Engineering Materials Vol. 964 (2023) pp 163-167, doi:10.4028/p-NQPrd8,ISSN: 1662-9795

Daniele Mirabile Gattia, Alessandra Palombi, Antonino Coglitore, Fabio De Pascalis, Michele Nacucchi, Fania Palano, Angelo Tati, Giuseppe Barbieri, Maria Richetta, Ugo De Angelis, Production of a Ti6Al4V Automobile's Lower Control Arm with EBM, Key Engineering Materials, Vol. 964 (2023) pp 41-46, doi:10.4028/p-eX3nPy, ISSN: 1662-9795

A. Tati, F. Palano, T. Marciànò, M. Nacucchi, F. De Pascalis, D. Marseglia, A. Coglitore, A. Palombi, G. Barbieri, D. Mirabile Gattia "Indagini non distruttive per la valutazione di campioni in lega di Titanio realizzati mediante additive manufacturing", Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica 3/2023

## 10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta

Partecipazione alla conferenza THERMEC 2023 - 3-7 luglio 2023 Vienna, Austria

Daniele Mirabile Gattia, Carmine Scordella, Alessandra Palombi, Angelo Tati, Antonino Coglitore, Fabio, De Pascalis, Michele Nacucchi, Fania Palano, Giuseppe Barbieri, Maria Richetta, *Production of a Ti6Al4V centrifugal pump impeller by EBM*,

Daniele Mirabile Gattia, Alessandra Palombi, Antonino Coglitore, Fabio De Pascalis, Michele Nacucchi, Fania Palano, Angelo Tati, Giuseppe Barbieri, Maria Richetta, *Production of a Ti6Al4V automobile's lower control arm with EBM*, THERMEC 2023 - 3-7 luglio 2023 Vienna, Austria

Partecipazione alla conferenza NANOINNOVATION 9-13 Settembre 2024, Roma

Talk nella sessione "Advances in Additive Manufacturing of Metal Alloys"

*Metal additive manufacturing for sustainable energy applications*, Daniele Mirabile Gattia (ENEA)

Poster

*Improved thermal conductivity in polymeric composites for Additive Manufacturing*, D. Mirabile Gattia, G. Corallo, A. Di Schiavi, R. Mancini, A. Fava, C. Stifani

Partecipazione alla conferenza NANOINNOVATION 18-22 Settembre 2023, Roma

Talk nella sessione "Advances in additive manufacturing of metals and alloys"

*Alloy design for Additive Manufacturing for applications in the energy sector: a case study*, Daniele MIRABILE GATTIA, ENEA

## Posters

55 *Polymeric composites with improved thermal conductivity for AM applications*, D. Mirabile Gattia, G. Corallo, A. Di Schiavi, C. Giuliani, R. Mancini (ENEA)

56 *Development of a ferritic alloy for AM of heat exchangers for corrosive environments*, D. Mirabile Gattia, L. Pilloni, G. Corallo

Partecipazione al MAKER FAIRE, 20-22 ottobre 2023, Roma

Presentazione attività del progetto presso lo stand della CSEA



Figura 17: partecipazione al MAKER FAIRE edizione ottobre 2023, con presentazione prototipi

Partecipazione a alla conferenza ZERO EMISSION MEDITERRANEAN 2024, 16-18 ottobre, presso la fiera di Roma. Realizzazione video con presentazione del progetto che è stato distribuito anche attraverso canali social (linkedin e youtube)

[https://it.linkedin.com/posts/ricerca-di-sistema\\_materiali-progetto-activity-7252791366873743360-NN03](https://it.linkedin.com/posts/ricerca-di-sistema_materiali-progetto-activity-7252791366873743360-NN03)

<https://www.youtube.com/watch?v=5tmV9xzjUGk>



RdS @ ZeroEmission Mediterranean: La ricerca sui materiali innovativi

RdS @ ZeroEmission Mediterranean: La ricerca sui materiali innovativi

Figura 18: partecipazione alla conferenza Zero Emission Mediterranean 2024



Figura 19: Poster con le attività del progetto presentato alla conferenza Zero Emission Mediterranean 2024

Partecipazione alla fiera MAKER FAIRE 25-27 ottobre 2024

[Save the date! ENEA partecipa a Maker Faire 2024-Eventi ENEA - Eventi Enea](#)

Presentazione risultati del progetto 1.4

Talk "Stampa 3D di leghe metalliche e applicazioni nel settore energetico", il 25 ottobre presso lo stand organizzato da AgroCamera.



Figura 20: partecipazione alla fiera MAKER FAIRE 2024

E' stata organizzata presso il CR Casaccia dell'ENEA, il 31 marzo 2023, una visita tecnica in collaborazione con l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma (FOIR) intitolata "Materiali

Avanzati e Manifattura Additiva". Nell'intervento: D. Mirabile Gattia "Stampa 3D come strumento per applicazioni speciali nel settore ingegneristico", sono stati presentati alcune delle attività e dei risultati del progetto in corso.

Partecipazione al congresso Nanoscience & Nanotechnologies 2023 (N&N 2023), tenutosi a Frascati presso la sede dell'INFN nel periodo 29 maggio - 1 giugno 2023. Presentato il lavoro: D. Mirabile Gattia, L. Pilloni, G. Corallo, *Innovative materials and additive technologies for the energy sector*.

Presentazione nell'ambito dello *Strategic foresight workshop "Key Enabling Technologies and Innovation Trends for Bettering the Competitiveness in Aerospace Industry"* organizzato ICAMCYL- 12-13 luglio 2023, nell'ambito del Progetto finanziato nell'ambito del programma H2020 - Grant Agreement n. 952463. E' stato presentato il seguente contributo: D. Mirabile Gattia "New alloy for Advanced Materials and its applications".

Partecipazione alla trasmissione RAI "Geo&Geo", 8 febbraio 2023, Conduttore: Sagromola Sveva - Biggi Emanuele: Energia. I progetti di ricerca sui materiali innovativi per risparmiare energia. Ospiti Eleonora Petrolati (CSEA), Daniele Mirabile Gattia (ENEA Centro Ricerche Casaccia). Sono stati presentati i progetti svolti e attivi nell'ambito dell'Accordo di programma tra Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica e ENEA, Ricerca sul Sistema Energetico - RSE SpA e Consiglio Nazionale delle Ricerche.

[Geo 2022/23 - Puntata del 08/02/2023 - Video - RaiPlay](#)

[https://it.linkedin.com/posts/ricerca-di-sistema\\_rds-geo-raitre-822023-activity-7029881970163617792-ol9A?trk=public\\_profile\\_like\\_view](https://it.linkedin.com/posts/ricerca-di-sistema_rds-geo-raitre-822023-activity-7029881970163617792-ol9A?trk=public_profile_like_view)

## 11 Riferimenti bibliografici

- 
- [i] D. Mirabile Gattia, G. Corallo, L. Pilloni, Realizzazione mediante AM e testing di scambiatori di calore in lega metallica (LA 4.9), Report RdS/PTR2021/233
- [ii] Oleg D. Neikov, Chapter 4 - Atomization and Granulation, Handbook of Non-Ferrous Metal Powders (Second Edition), Elsevier, 2019, Pages 125-185, ISBN 9780081005439, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100543-9.00004-X>.
- [iii] Sarafan, S.; Wanjara, P.; Gholipour, J.; Bernier, F.; Osman, M.; Sikan, F.; Soost, J.; Amos, R.; Patnaik, P.; Brochu, M. Benchmarking of 316L Stainless Steel Manufactured by a Hybrid Additive/Subtractive Technology. *J. Manuf. Mater. Process.* 2022, 6, 30. <https://doi.org/10.3390/jmmp6020030>
- [iv] J. Reijonen, R. Björkstrand, T. Riipinen, Z. Que, S. Metsä-Kortelainen, M. Salmi, Cross-testing laser powder bed fusion production machines and powders: Variability in mechanical properties of heat-treated 316L stainless steel, *Materials & Design*, Volume 204, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109684>.
- [v] A. Kirchner, B. Klöden, T. Weißgärber, B. Kieback, "Powders for Additive Manufacturing", World PM2016 Proceedings - AM - Powder Characteristics
- [vi] Yoon, H., Lee, J., Kim, H. et al. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 1, 261-279 (2014)

- 
- [vii] Verhoef, L.A.; Budde, B.W.; Chockalingam, C.; García Nodar, B.; van Wijk, A.J.M. The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy* 2018, 112, 349–360
- [viii] Bonneau, V.; Yi, H.; Probst, L.; Pedersen, B.; Lonkeu, O.K. *The Disruptive Nature of 3D Printing*; European Commission: Brussels, Belgium, 2017
- [ix] J. I. Arrizubieta, O. Ukar, M. Ostolaza, A. Mugica, "Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling", *Metals* 2020, 10, 261
- [x] Report RdS/2011/PR\_3.4/1 G.Corallo, A. Franchi, "Realizzazione di un prototipo reversibile di macchina ad assorbimento da 18 kW con alimentazione ad acqua calda da adibire al solar cooling and heating e prove sperimentali preliminari", 22/09/2011