



Realizzazione mediante AM e testing di scambiatori di calore in lega metallica (LA4.9)

D. Mirabile Gattia, G. Corallo, L. Pilloni

Realizzazione mediante AM e testing di scambiatori di calore in lega metallica (LA4.9)

D. Mirabile Gattia, G. Corallo, L. Pilloni (ENEA – CR Casaccia - SSPT)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità 2021

Obiettivo: *Sistema Elettrico*

Progetto: "Materiali di Frontiera per usi energetici"

Linea di attività: *LA 4.9 Realizzazione di uno scambiatore di calore: realizzazione e testing dello scambiatore in lega metallica*

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	8
2.1 PARAMETRI DI STAMPA DMLS DELLA LEGA FERRITICA: OTTIMIZZAZIONE	8
2.2 REALIZZAZIONE DELLO SCAMBIATORE DI CALORE IN ACCIAIO INOSSIDABILE	14
3 CONCLUSIONI.....	30
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	32

Sommario

L'attività sperimentale ha visto da una parte l'ottimizzazione dei parametri di stampa della lega ferritica progettata nelle precedenti annualità e dall'altra la realizzazione di scambiatori di calore in acciaio inossidabile mediante processi additivi. Gli scambiatori di calore prodotti presentano le geometrie interne progettate nel secondo anno di attività sperimentale. Al fine di valutare la tecnologia migliore per la stampa degli scambiatori sono stati realizzati dei campioni in lega metallica mediante processo EBM (Electron Beam Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) e ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing). Le prove preliminari hanno permesso definire la tecnologia per la realizzazione di componenti con canali interni estremamente convoluti, quali appunto gli scambiatori di calore. Questi sono stati quindi realizzati mediante la tecnologia DMLS in acciaio inossidabile. Sono stati progettati e realizzati diversi scambiatori con diverse configurazioni interne, anche al fine di valutare eventuali differenze nel comportamento fluidodinamico. Gli scambiatori sono stati qualificati sul banco prova realizzato nella seconda annualità. Al fine dell'effettuazione delle prove di qualifica sono state progettate e realizzate delle piastre di accoppiamento. Le prove di stampa della lega ferritica progettata hanno permesso di ottimizzare i parametri per processi DMLS ottenendo un valore di densità prossimo al 99.9% rispetto a quella attesa.

1 Introduzione

L'attività del WP4 LA 4.7-4.8-4.9 prevede la realizzazione di uno scambiatore di calore mediante tecnologie additive, in sostituzione di uno equivalente realizzato mediante tecnologie sottrattive e di fonderia, progettato per l'utilizzo in sistemi ad assorbimento ad acqua ammoniacale per il condizionamento dell'aria a gas naturale e nelle caldaie murali. Lo scambiatore è stato realizzato in passato mediante saldobrasatura di piastre forate impilate [1]. L'attività del terzo anno è stata quindi incentrata sulla realizzazione di scambiatori di calore in lega metallica, a partire dal progetto ottimizzato nel secondo anno.

Prima di considerare l'attività sperimentale svolta è necessario introdurre gli aspetti relativi alle capacità produttive delle tecnologie additive.

Uno degli aspetti critici per la produttività delle tecnologie additive per la stampa di metalli è legato principalmente al tasso di deposizione (cm^3/h). In [2] è riportato uno studio che considera il costo per la produzione di diverse tipologie di componenti in materiali metallici mediante AM in confronto con le tecnologie sottrattive convenzionali. Il lavoro suddivide lo sviluppo nel tempo delle tecnologie additive in 4 fasi che dipendono dalla velocità di deposizione (Figura 1). L'autore sottolinea come per poter avere l'abbattimento dei costi di produzione mediante AM, al punto da renderli competitivi con i processi produttivi tradizionali, bisogna migliorare di almeno 10 volte gli attuali tassi di deposizione delle macchine di AM.

Attualmente la produttività di componenti metallici mediante AM è limitata rispetto ai sistemi di produzione convenzionali, ma l'evoluzione delle macchine nel prossimo futuro in termini di volumi di stampa, di velocità di deposizione e di consumi energetici porterà a un incremento del numero di componenti prodotte per unità di tempo in misura paragonabile alle tecniche sottrattive e di fonderia. Tra le diverse tecniche di stampa 3D di metalli e leghe ci sono le tecnologie a deposizione diretta (DED), alimentata con il filo o con la polvere, le tecnologie a letto di polvere (EBM, DMLS, SLM), il binder jetting e le tecnologie di tipo ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) o BMD (Bound Metal Deposition™). Nella Figura 2 è riportato il consumo energetico specifico, SEC, in funzione della produttività per alcune tecnologie additive [3].

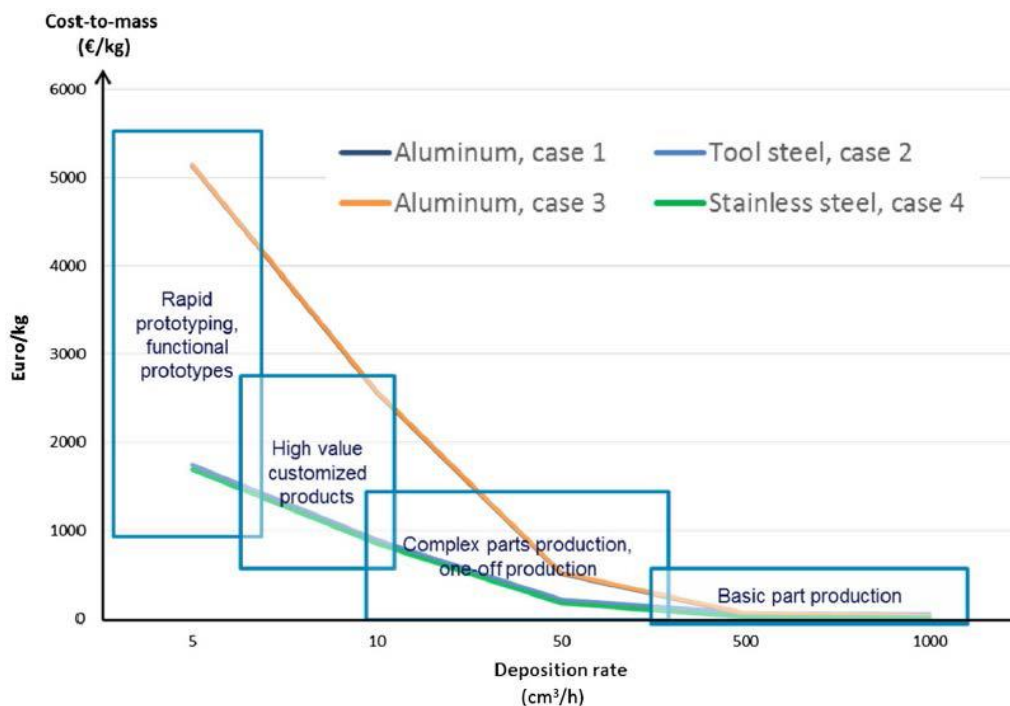


Figura 1: sviluppo, in quattro fasi, dell'AM nel campo della produzione di componenti [2].

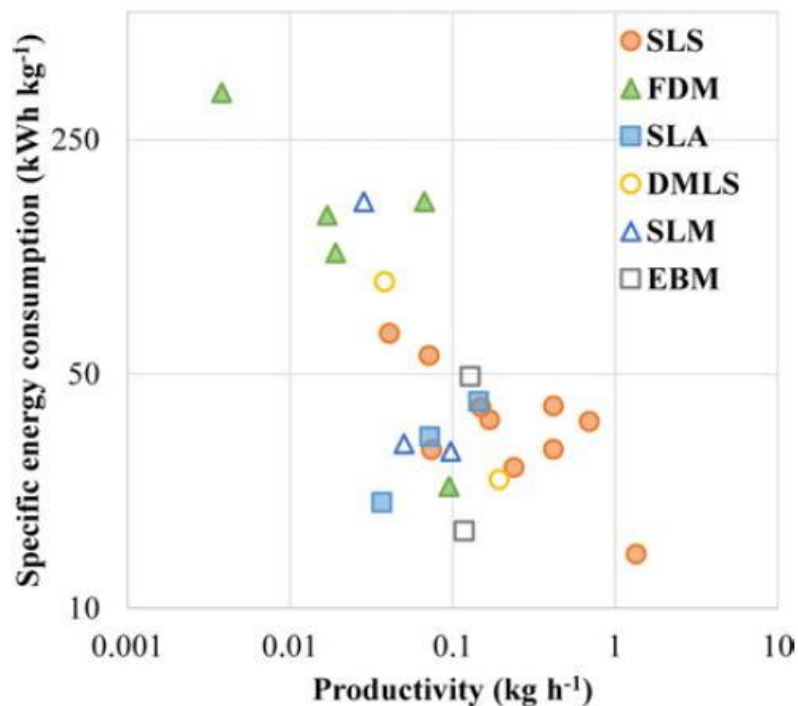


Figura 2: SEC vs produttività per diverse tecnologie AM (simboli vuoti materiali metallici, pieni polimerici) [3].

Indicatori quantitativi per le tecnologie in uso e di comparazione con le tecnologie convenzionali sono quindi:

- Il consumo specifico energetico o SEC (kWh/kg)
- Produttività (kg/h).

Al fine di effettuare un confronto tra i vari processi produttivi bisognerebbe tener conto anche delle materie prime utilizzate e quelle di scarto. Una valutazione di questo tipo è complessa poiché dipende dal tipo di componente da realizzare e dal tipo di lavorazione.

Nel caso delle attività relative alla realizzazione dello scambiatore di calore essendo presenti nel processo di preparazione convenzionale sia lavorazioni meccaniche che trattamenti termici energivori (brasatura) la bilancia potrebbe spostarsi a favore della produzione mediante AM. Risulta quindi questo un esempio particolarmente interessante di penetrazione delle tecnologie AM nel sistema produttivo con potenziali benefici per il sistema elettrico.

I potenziali benefici diretti dell'attività, strettamente correlata con il WP3 LA 3.4-3.5-3.6, nel quale è stata realizzata una lega con una conducibilità termica incrementata rispetto a acciai del tipo AISI 316, sono collegati in particolar modo al costo energetico di produzione degli scambiatori e alle potenziali applicazioni.

In generale le tecnologie di AM presentano un tasso di produzione (kg/h) inferiore rispetto alle tecnologie sottrattive (lavorazioni meccaniche etc.), ma anche una richiesta di potenza inferiore di un ordine di grandezza risultando un'intensità di energia elettrica (J/kg) del processo AM superiore rispetto ai processi di manifattura convenzionali [4].

Il problema della velocità di deposizione è uno degli aspetti più importanti che ha parzialmente limitato la diffusione delle tecnologie additive. La velocità di deposizione, nel caso di stampa di leghe metalliche, è aumentata enormemente dalle prime strumentazioni: nel 2002 era pari a 3.6 cm³/h mentre nel 2009 era pari a 43 cm³/h [5]. E' stato stimato che i sistemi laser con potenze fino a 1500 W possano arrivare a tassi di deposizioni pari a 81 cm³/h, nel caso di acciai. L'EBM, tra le varie tecniche di stampa di metalli, è quella che presenta il consumo di energia specifico (SEC) minore e permette di stampare a un tasso pari a circa 80

cm³/h [3]. Nel caso delle tecnologie di tipo ADAM o BMD la velocità di stampa arriva a 16 cm³/h, ma presenta bassi costi energetici di produzione [6].

Nel 2016 l'azienda SLM Solutions Group ha presentato delle stampanti laser con velocità di deposizione superiore a 100 cm³/h [7]. La stessa azienda ha presentato una stampante con 4 laser e con un'area di stampa pari a 600x600x600 mm, che può arrivare a 1000 cm³/h [8]. Un'azienda italiana, la 3D4MEC S.r.l., ha sviluppato delle macchine, per acciaio e per ottone, per la produzione in serie di componenti con una elevata velocità di produzione, grazie a un sistema, brevettato, di distribuzione delle polveri, specifico per gli acciai, e un sistema automatico di recupero delle polveri, che riduce i tempi di fermo macchina [9].

Per la produzione industriale si stanno studiando sistemi basati su processi binder jetting per le quali le velocità di stampa dichiarate dalle aziende del settore arrivano a 12000 cm³/h per macchine industriali di stampa 3D [10]. Le potenzialità di questa tecnica per la produzione di oggetti metallici devono però ancora essere ottimizzate.

Nel caso della stampa in materiale composito le velocità di deposizione possono essere molto maggiori rispetto a quelle attuali con i metalli (anche superiori ai 100 cm³/h nel caso di processi di tipo laser (SLS) [11,12]) e con minore spesa energetica (Figura 2).

Un aspetto importante da considerare è comunque che più aumenta il tasso di deposizione, maggiore è la potenza del sistema e minore è la finitura superficiale del componente, a svantaggio quindi della qualità finale del componente [13].

Come accennato in precedenza è possibile considerare due aspetti interessanti derivanti dalle possibili applicazioni di scambiatori realizzati mediante AM: da una parte l'utilizzo nelle caldaie murali e dall'altro l'utilizzo all'interno di condizionatori ad assorbimento con ciclo acqua-ammoniaca (macchine azionate a gas o da solare termico).

Le caldaie murali attualmente installate in Italia sono pari a 20 milioni di unità [14], mentre le caldaie di nuova installazione nel 2018 sono pari a 750 mila unità/anno [15]. Ipotizzando un tasso di sostituzione per anno delle vecchie caldaie intorno al 10% e una importante penetrazione nel mercato di caldaie con uno scambiatore realizzato mediante AM si arriverebbe a un numero di unità di qualche milione all'anno. Con questi numeri ha senso quindi considerare, nel caso della produzione di uno scambiatore con ingombro esterno pari a 590 cm³ e una parte piena pari a 373 cm³, quale quello realizzato in questa attività, un eventuale risparmio energetico. Questo si potrebbe ottenere ad esempio mediante l'utilizzo di una stampante con volume di stampa pari a 400x400x400 mm, velocità di stampa di almeno 100 cm³/h, o addirittura superiore, e con un consumo nominale della macchina pari a 22 kW (max. 45 kW), rispetto a un forno per saldobrasatura da 300x300x450 mm di volume. Nel caso della saldobrasatura, il processo richiede l'utilizzo di un forno sottovuoto in funzione a circa 1150-1205 °C (con pasta sadobrasante del tipo Nicrobraz®) per almeno 15 ore. Forni per queste applicazioni hanno potenze massime superiori ai 60 kW. In produzione è prevista inoltre una successiva lavorazione meccanica e superficiale dello scambiatore. La saldobrasatura risulterebbe comunque più competitiva, con gli attuali tassi di stampa di metalli, nel caso di utilizzo di forni più grandi che, anche se presentano consumi superiori, con una crescita della potenza lineare in funzione del volume, nell'intervallo 0.04-0.8 m³, consentirebbero il trattamento di un numero elevato di scambiatori. Per avere in questo caso una stima reale della spesa energetica, è necessario prendere in considerazione anche quella derivante dal pretrattamento delle piastre (decapaggio etc.), taglio e foratura, in genere effettuata mediante macchine CNC, a controllo numerico, e le fasi di assemblaggio delle piastre, che effettuata in maniera automatizzata, implica un ulteriore costo energetico. Dall'altro lato, come suggerito da M. Baumers e colleghi, i dati relativi ai consumi elettrici di macchine per processi additivi potrebbero non essere perfettamente allineati con quelli reali essendo estrapolati da documentazioni tecniche delle case produttrici, che a volte si discostano da quanto riportato in letteratura [16]. Per ottenere dati più affidabili bisognerebbe effettuare una campagna di misure direttamente sulle macchine durante la lavorazione.

Altro aspetto interessante riguarda l'applicazione nelle macchine ad assorbimento del tipo acqua-ammoniaca. Queste macchine permettono il condizionamento di ambienti e possono sostituire le pompe di calore installate nelle case e negli ambienti lavorativi e necessitano di un sistema di scambio del calore idoneo alle condizioni corrosive del fluido utilizzato (in particolare ammoniaca). Non possono quindi essere utilizzati scambiatori ottenuti per saldobrasatura, con pasta saldobrasante contenente rame e nichel, ma è necessario uno scambiatore interamente realizzato con un'opportuna lega, quale appunto quello realizzabile mediante AM. Anche in questo caso ha senso considerare una potenziale sostituzione parziale delle unità installate presenti attualmente nel parco condizionatori in Italia, stimate essere intorno ai 17 milioni, con una potenza media frigorifera intorno ai 7 kW, con quelle basate sulle macchine ad assorbimento del tipo acqua-ammoniaca [17].

L'impiego delle macchine ad assorbimento consente anche la riduzione della potenza elettrica di picco richiesta nel periodo estivo, causata dall'accensione pressoché simultanea di tutti i condizionatori installati.

A parte i dati macroscopici, il vantaggio per l'utente finale, qualora si riuscisse ad ottenere, mediante stampanti più veloci, la riduzione del costo energetico produttivo degli scambiatori, potrà essere valorizzato in due modi: il primo con un abbassamento diretto del prezzo di acquisto delle apparecchiature che adotteranno i nuovi scambiatori, ovvero con una nuova disponibilità di apparecchiature ad alta efficienza, il secondo per riduzione indiretta delle bollette di gas ed elettricità derivanti da un miglioramento delle condizioni di lavoro delle relative reti di distribuzione.

Inoltre la bilancia potrebbe spostarsi ulteriormente a favore del maggiore risparmio energetico, nel caso in cui si arrivasse a velocità di deposizione di leghe metalliche pari a $1000 \text{ cm}^3/\text{h}$ per i sistemi a letto di polvere, come riportato in precedenza [2,8].

Altro aspetto fondamentale è la riduzione delle materie prime utilizzate mediante le tecnologie additive. Alcuni studi hanno valutato scenari nei quali al 2050 si prevede di ottenere una riduzione variabile tra i 26-138 EJ/anno, equivalente al 5-27% della domanda globale di energia, legata anche all'enorme risparmio dell'uso delle materie prime, che potrebbe derivare dall'uso delle tecnologie additive [18]. In uno studio della Comunità Europea è stato inoltre stimato che entro il 2021 il mercato dell'additive manufacturing raggiungerà i 9.65 miliardi di euro [19]. A fronte di questo enorme incremento dell'utilizzo delle tecnologie additive nei prossimi anni è previsto anche un beneficio in termini ambientali, legato anche alla possibilità di riutilizzo delle materie prime di processo [20].

Nel caso dello scambiatore di calore, realizzato a partire da piastre forate e successiva saldobrasatura, il materiale asportato per punzonatura è pari al 37% dell'ingombro fisico dello scambiatore. Il materiale asportato deve essere recuperato, lavato, rifuso e lavorato per ottenere nuovamente delle piastre. Inoltre bisogna considerare anche il materiale di sfrido derivante dal taglio delle lamine dalle quali sono state ricavate le piastre. Mediante l'utilizzo delle tecnologie additive, ottimizzando il volume di stampa, è possibile praticamente rimuovere eventuali sfridi di lavorazione.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Parametri di stampa DMLS della lega ferritica: ottimizzazione

L'attività sperimentale ha previsto la stampa mediante processo laser a letto di polvere di campioni utilizzando la polvere di lega ferritica progettata e prodotta nelle LA 3.5-3.6-3.7. L'obiettivo è stato quello di dimostrare la possibilità di utilizzare la lega ferritica in processi di stampa 3D con il potenziale utilizzo nella realizzazione di scambiatori di calore.

La polvere, prodotta mediante gas atomizzazione, è stata setacciata per ottenere una granulometria adeguata per i processi di stampa laser a letto di polvere, con dimensione compresa tra 15 e 45 μm . Dalla polvere di partenza è stato possibile ottenere una quantità di qualche chilogrammo per le prove di stampa dei campioni. La polvere è stata processata con una stampante DMLS EOS M280, presso l'azienda 3D Metal Srl [21]. 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 μm

La macchina è stata prima ripulita della polvere presente per evitare contaminazioni con altre leghe metalliche utilizzate in precedenza. Inizialmente al momento della preparazione della polvere nel dispenser (volume della macchina contenente la polvere vergine), durante la stesura del primo layer, sono stati osservati dei grumi di polvere (Figura 3), nonostante le buone caratteristiche in termini di scorrevolezza misurate nella precedente annualità. La formazione di questi grumi dipende dalla presenza di umidità nella polvere. Infatti, durante il processo di stampa, successivi al riavvio, che comporta un riscaldamento della *build platform*, non sono stati riscontrati ulteriori problemi.

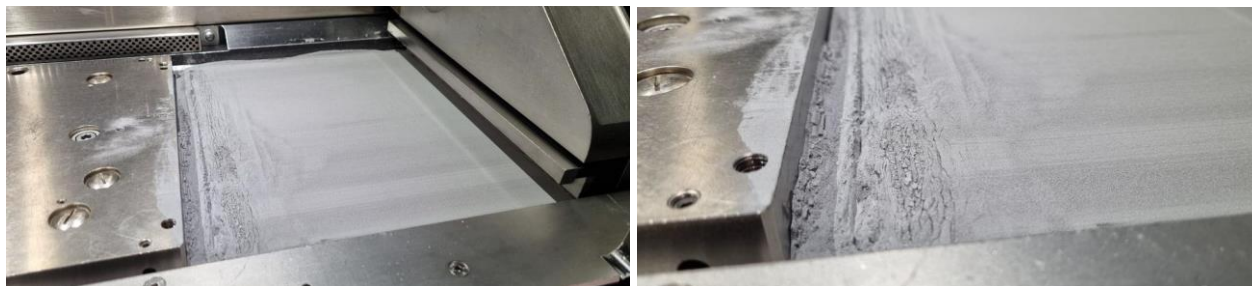


Figura 3: immagine della formazione di grumi di polvere durante la stesura del primo strato di polvere

La prima fase di test ha previsto la ricerca di un set di parametri di processo che consente di raggiungere la massima densità del fuso. E' stato usato il software Magics della Materialize per l'elaborazione del file di stampa, e con il quale sono stati posizionati, sulla piattaforma di stampa, 40 cubetti, con lato di 10 mm, in modo tale che il processo di fusione di un dato cubetto non compromettesse la realizzazione degli altri.

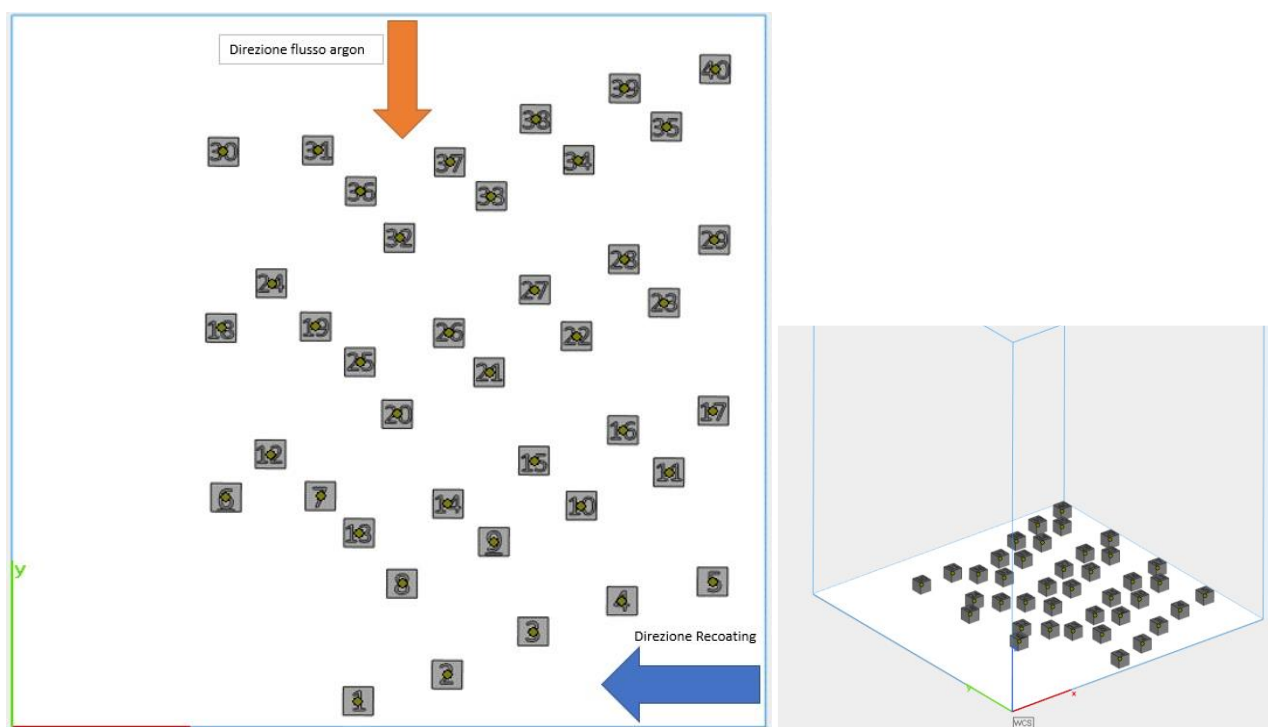


Figura 4: posizione dei cubetti di prova sul piatto di stampa, all'interno del software Magics di Materialise.

Trattandosi di una lega sperimentale si è partiti considerando valori di stampa adeguati per leghe ferritiche. Ad ogni provino è stato quindi assegnato un set di parametri facendo variare Potenza [W], velocità di scansione [mm/s] fissando l'*hatch distance* a 0.09mm e l'altezza del layer a 0.02mm, come riportato in Tabella 1. È riportato in tabella anche il valore dell'*energy density* per ogni cubetto, in modo da poter fare un confronto con i successivi valori di densità ottenuti.

Tabella 1: parametri utilizzati per la stampa dei diversi provini di lega metallica

#	Potenza (W)	Velocità (mm/s)	hatch (mm)	layer (mm)	energy density (J/mm ³)
1	170	500	0,09	0,02	188,89
2	170	600	0,09	0,02	157,41
3	170	700	0,09	0,02	134,92
4	170	800	0,09	0,02	118,06
6	170	900	0,09	0,02	104,94
6	170	1000	0,09	0,02	94,44
7	170	1100	0,09	0,02	85,86
8	170	1200	0,09	0,02	78,7
9	170	1300	0,09	0,02	72,65
10	170	1400	0,09	0,02	67,46
11	180	500	0,09	0,02	200
12	180	600	0,09	0,02	166,67
13	180	700	0,09	0,02	142,86
14	180	800	0,09	0,02	125
15	180	900	0,09	0,02	111,11
16	180	1000	0,09	0,02	100

17	180	1100	0,09	0,02	90,91
18	180	1200	0,09	0,02	83,33
19	180	1300	0,09	0,02	76,92
20	180	1400	0,09	0,02	71,43
21	190	500	0,09	0,02	211,11
22	190	600	0,09	0,02	175,93
23	190	700	0,09	0,02	150,79
24	190	800	0,09	0,02	131,94
25	190	900	0,09	0,02	117,28
26	190	1000	0,09	0,02	105,56
27	190	1100	0,09	0,02	95,96
28	190	1200	0,09	0,02	87,96
29	190	1300	0,09	0,02	81,2
30	190	1400	0,09	0,02	75,4
31	200	500	0,09	0,02	222,22
32	200	600	0,09	0,02	185,19
33	200	700	0,09	0,02	158,73
34	200	800	0,09	0,02	138,89
35	200	900	0,09	0,02	123,46
36	200	1000	0,09	0,02	111,11
37	200	1100	0,09	0,02	101,01
38	200	1200	0,09	0,02	92,59
39	200	1300	0,09	0,02	85,47
40	200	1400	0,09	0,02	79,37

Dopo la stampa sono state effettuate delle misure di densità e di durezza sui provini n° 4, 5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 37, 38, 39, 40, per un totale di 22 provini. Questi provini sono stati scelti per le ulteriori indagini considerando due aspetti:

- stabilità durante il processo di stampa: I provini selezionati non entravano in contatto con il *recoater* durante la fase di *recoating*.

- assenza di cromia superficiale: sono stati selezionati i provini che non presentassero una particolare colorazione superficiale. Nel caso dei componenti realizzati tramite tecnologia DMLS questa colorazione potrebbe indicare una eccessiva temperatura di fusione. Una delle conseguenze è la non stabilità del processo e la presenza di tensioni residue post stampa.

Successivamente alla misura di densità, i provini sono stati sottoposti a test di durezza Vickers. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 2:

Tabella 2 . i valori di densità e durezza ottenuti sui cubetti stampati mediante DMLS

Campione N.	Peso 1 in aria (g)	Peso 2 in aria (g)	Peso 3 in aria (g)	Peso 1 in acqua (g)	Peso 2 in acqua (g)	Peso 3 in acqua (g)	Peso in aria media (g)	Peso in acqua media (g)	Densità media (Kg/dm ³)	Durezza Vickers HV1
14	6,9233	6,9235	6,9235	6,0159	6,0144	6,0164	6,9234	6,0156	7,60	223 - 216
6	6,8459	6,8459	6,8460	5,9302	5,9297	5,9287	6,8459	5,9295	7,45	213 - 215
38	6,8972	6,8974	6,9875	5,9890	5,9920	5,9908	6,9274	5,9906	7,37	214 - 210

4	7,0254	7,0254	7,0253	6,1015	6,1020	6,1020	7,0254	6,1018	7,59	214 - 203
5	7,0092	7,0094	7,0093	6,0878	6,0901	6,0900	7,0093	6,0893	7,60	211 - 214
16	6,9391	6,9392	6,9392	6,0287	6,0285	6,0282	6,9392	6,0285	7,60	222 - 216
7	6,9498	6,9498	6,9498	6,0326	6,0341	6,0330	6,9498	6,0332	7,56	227 - 223
8	6,8867	6,8867	6,8867	5,9733	5,9738	5,9752	6,8867	5,9741	7,52	213 - 207
39	6,8653	6,8653	6,8653	5,9595	5,9581	5,9587	6,8653	5,9588	7,55	210 - 208
18	6,8923	6,8923	6,8924	5,9737	5,9731	5,9737	6,8923	5,9735	7,48	210 - 212
37	6,9500	6,9500	6,9499	6,0392	6,0394	6,0398	6,9500	6,0395	7,61	209 - 220
29	6,8660	6,8661	6,8659	5,9583	5,9594	5,9594	6,8660	5,9590	7,55	210 - 213
35	6,9545	6,9543	6,9544	6,0443	6,0440	6,0452	6,9544	6,0445	7,62	212 - 219
17	6,9404	6,9403	6,9404	6,0292	6,0295	6,0293	6,9404	6,0293	7,60	218 - 216
15	6,9213	6,9214	6,9214	6,0167	6,0162	6,0166	6,9214	6,0165	7,63	219 - 217
27	6,9313	6,9313	6,9314	6,0237	6,0239	6,0233	6,9313	6,0236	7,61	218 - 220
28	6,8932	6,8932	6,8933	5,9873	5,9870	5,9881	6,8932	5,9875	7,59	216 - 215
24	6,9633	6,9633	6,9634	6,0521	6,0535	6,0531	6,9633	6,0529	7,63	215 - 218
36	6,8321	6,8321	6,8321	5,9212	5,9208	5,9213	6,8321	5,9211	7,48	214 - 221
40	6,8480	6,8481	6,8480	5,9384	5,9397	5,9395	6,8480	5,9392	7,51	210 - 207
26	6,9148	6,9149	6,9147	6,0093	6,0089	6,0085	6,9148	6,0089	7,61	222 - 218
25	6,9513	6,9513	6,9513	6,0402	6,0397	6,0396	6,9513	6,0398	7,60	213 - 215

La Tabella 3 riporta il confronto tra i parametri e i valori di densità ottenuti:

Tabella 3: confronto tra i parametri di stampa e i valori di densità ottenuti

Progressivo Provini	Potenza [W]	velocità [mm/s]	hatch [mm]	layer [mm]	energy density [J/mm ³]	Densità [kg/dm ³]
1	170	500	0,09	0,02	188,89	SCARTO
2	170	600	0,09	0,02	157,41	
3	170	700	0,09	0,02	134,92	
4	170	800	0,09	0,02	118,06	
5	170	900	0,09	0,02	104,94	7,6
6	170	1000	0,09	0,02	94,44	7,45
7	170	1100	0,09	0,02	85,86	7,56
8	170	1200	0,09	0,02	78,70	7,52
9	170	1300	0,09	0,02	72,65	SCARTO
10	170	1400	0,09	0,02	67,46	
11	180	500	0,09	0,02	200,00	
12	180	600	0,09	0,02	166,67	
13	180	700	0,09	0,02	142,86	
14	180	800	0,09	0,02	125,00	7,6
15	180	900	0,09	0,02	111,11	7,63
16	180	1000	0,09	0,02	100,00	7,6
17	180	1100	0,09	0,02	90,91	7,6
18	180	1200	0,09	0,02	83,33	7,48
19	180	1300	0,09	0,02	76,92	SCARTO

20	180	1400	0,09	0,02	71,43	
21	190	500	0,09	0,02	211,11	
22	190	600	0,09	0,02	175,93	
23	190	700	0,09	0,02	150,79	
24	190	800	0,09	0,02	131,94	7,63
25	190	900	0,09	0,02	117,28	7,6
26	190	1000	0,09	0,02	105,56	7,61
27	190	1100	0,09	0,02	95,96	7,61
28	190	1200	0,09	0,02	87,96	7,59
29	190	1300	0,09	0,02	81,20	7,55
30	190	1400	0,09	0,02	75,40	SCARTO
31	200	500	0,09	0,02	222,22	
32	200	600	0,09	0,02	185,19	
33	200	700	0,09	0,02	158,73	
34	200	800	0,09	0,02	138,89	
35	200	900	0,09	0,02	123,46	7,62
36	200	1000	0,09	0,02	111,11	7,48
37	200	1100	0,09	0,02	101,01	7,61
38	200	1200	0,09	0,02	92,59	7,37
39	200	1300	0,09	0,02	85,47	7,55
40	200	1400	0,09	0,02	79,37	7,51

I valori di densità massima sono prossimi ai valori teorici calcolati mediante il software di modellazione termodinamica JMatPro, pari a 7.64 g/cm³ a 25°C (Figura 5). Il valore di densità è stato ottenuto a partire dalla composizione chimica della lega ferritica.

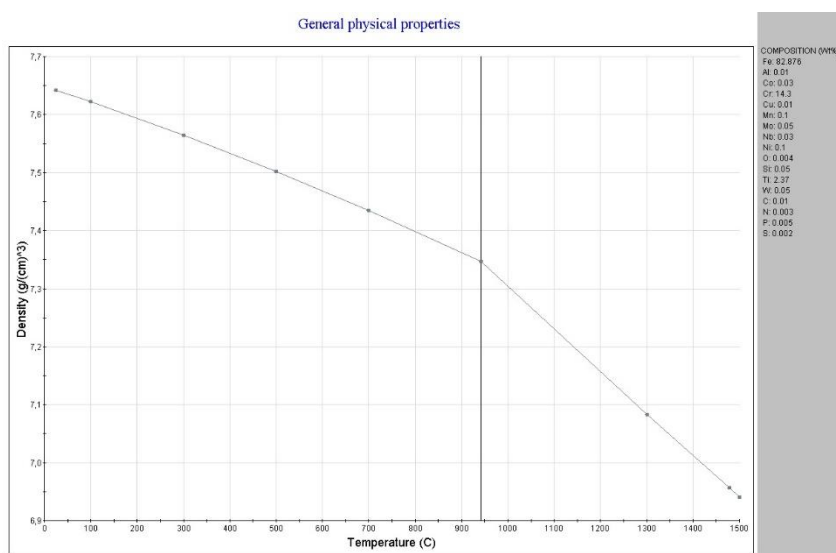


Figura 5: densità teorica della lega ferritica determinata con software di modellazione termodinamica JMatPro.

E' possibile quindi stimare il raggiungimento di una densità pari al 99.87% rispetto al pieno (valore massimo teorico) sui campioni in lega ferritica stampati mediante DMLS.

La lega non ha presentato particolari problemi durante la stampa, e non è stato riscontrato il fallimento della stampa di nessun provino. Inoltre non sono stati osservati ulteriori forme di agglomerazione della polvere.

I valori di densità trovati sembrano coerenti con i valori di *energy density* calcolati in quanto si riscontrano valori più elevati di densità superata la soglia dei 100 J/mm^3 in accordo con la letteratura. Le durezze sono pressoché costanti e tendono ad aumentare con l'incremento dell'*energy density*.

Trovato un set di parametri stabili di partenza si potrà procedere in futuro con la ricerca di parametri con strati più spessi al fine di rendere il processo di stampa più veloce.

La Figura 6 mostra la microstruttura della lega ferritica stampata mediante DMLS. Uno dei cubetti è stato sezionato nelle due direzioni: parallelo (V) e ortogonale (H) alla direzione di stampa. La microstruttura in questi campione è molto diversa rispetto a quella riscontrata nel fuso e nei campioni pressati e trattati termicamente (LA 3.6), presentando dei grani di dimensioni ridotte e orientati, come osservabile nella sezione V, lungo la direzione di crescita.

In Figura 7 è riportato il diffrattogramma ottenuto mediante diffrazione di raggi X che mostra, nei limiti di rilevabilità della tecnica, la presenza della sola fase α -ferrite all'interno dei campioni in lega ferritica stampati mediante DMLS.

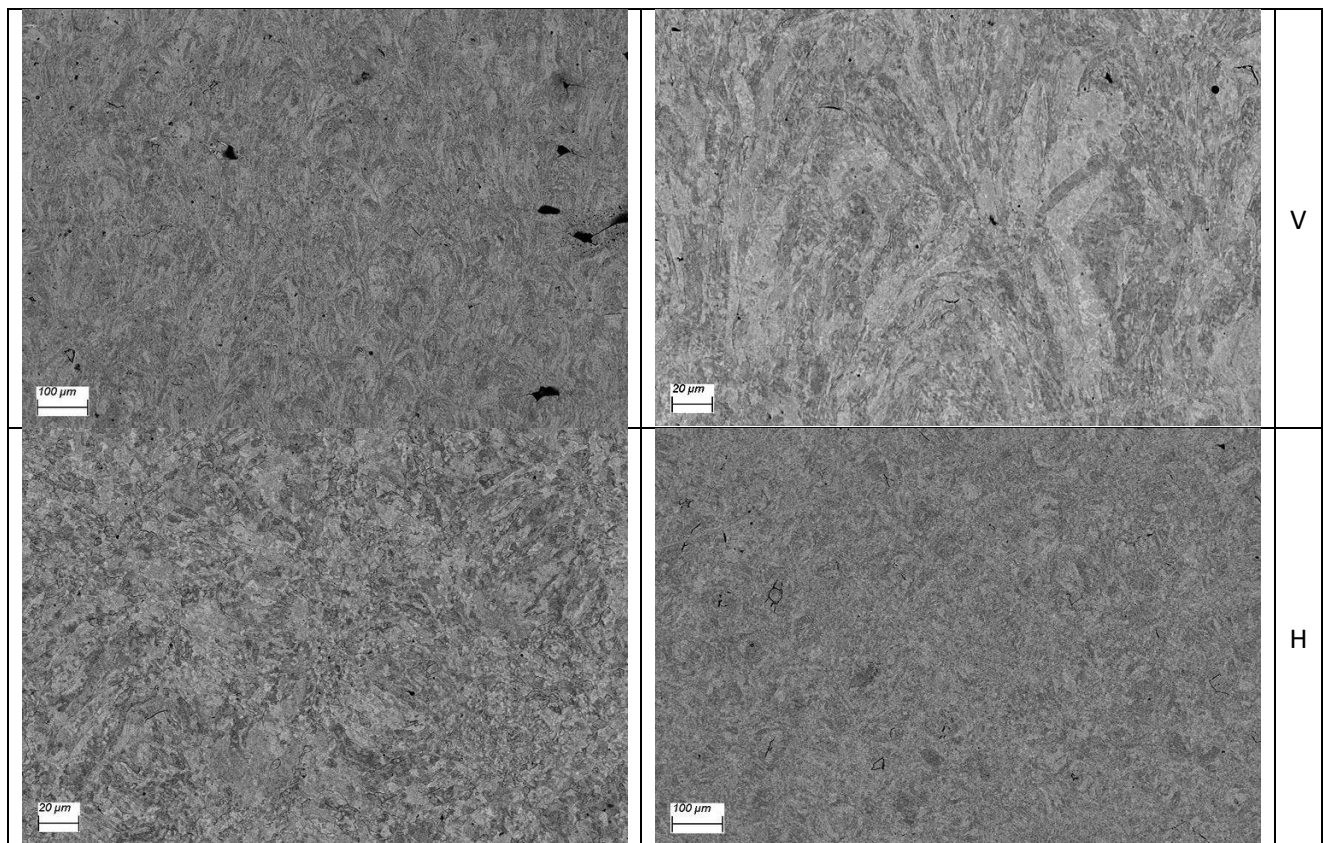


Figura 6: immagini SEM della microstruttura della lega ferritica ottenute nelle sezioni parallela (V) e ortogonale (H) alla direzione di crescita.

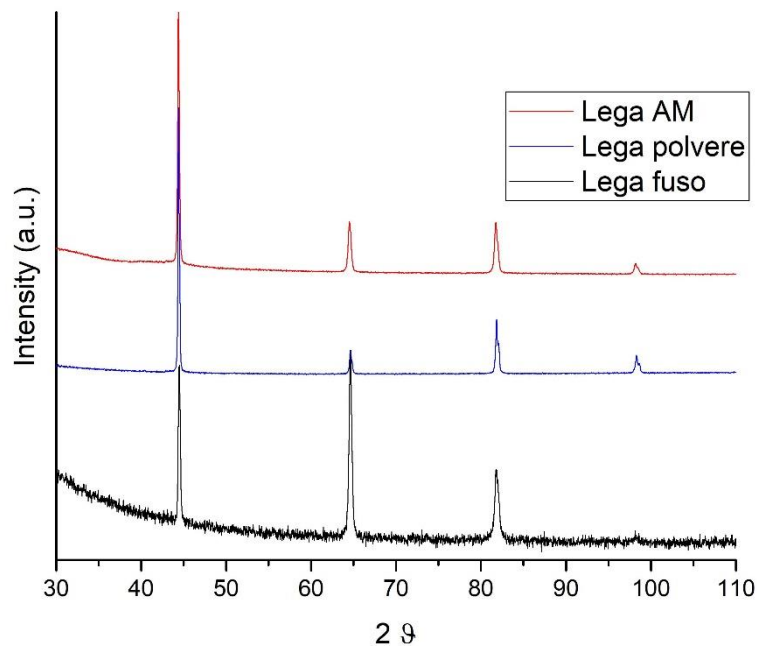


Figura 7: diffrattogrammi X ottenuti rispettivamente sui campioni di lega metallica realizzata mediante DMLS (Lega AM), in forma di polvere (Lega polvere) e il fuso trattato con processo termo-meccanico (Lega fuso).

2.2 Realizzazione dello scambiatore di calore in acciaio inossidabile

Come già descritto in precedenza ogni processo di stampa 3D presenta le sue peculiarità. Non è in assoluto possibile decidere quale processo sia migliore di un altro per la realizzazione di un componente. Per la stampa di scambiatori di calore si ritiene opportuno utilizzare una tecnologia che permetta di ottenere canali interni con le seguenti caratteristiche:

- geometria interna altamente convoluta e di piccole dimensioni, che assicurino un elevato scambio termico convettivo;
- liberi dalla polvere;
- privi di supporti interni non removibili;
- adeguata rugosità superficiale.

Inoltre la scelta ricade su tecnologie di stampa che consentano di processare leghe, che possono trovare diverse applicazioni, quali gli acciai inossidabili.

Per questo motivo sono state effettuate delle prove utilizzando la stampante di tipo EBM (Electron Beam Melting, GE Arcam A2X), quella di tipo DMLS (Direct Metal Laser Sintering, EOS M280) e la stampante di tipo ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing). Nel primo caso sono state effettuate diverse prove che hanno dimostrato come, da una parte sia possibile realizzare componenti con canali interni, ma dall'altra come la possibilità di rimuovere la polvere intrappolata all'interno sia remota. L'EBM, può processare, secondo quanto riportato sul sito del costruttore, i seguenti materiali: Ti6Al4V Grade 5 e 23, Inconel 718 e TiAl [22]. Le prove di stampa sono state effettuate utilizzando polvere in lega di titanio, Ti6Al4V grade 5 ELI, ovvero "Extra Low interstitials", che consente di realizzare componenti con una maggiore duttilità e resistenza a rottura. La granulometria di questa polvere è compresa nell'intervallo 45-100 μm . La composizione nominale, in percento in peso, della lega è la seguente: 6.0 Al; 4.0 V; 0.03 C; 0.1 Fe; 0.1 O; 0.01 N; < 0.003 H; Ti Bal..

In Figura 8 sono riportate le immagini a diversi ingrandimenti delle particelle di polvere utilizzate nel processo di stampa EBM.

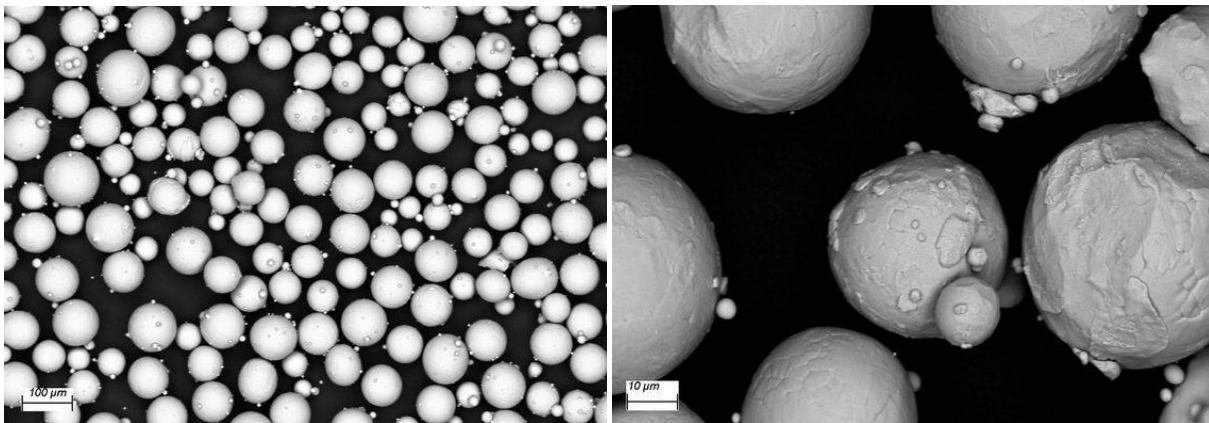


Figura 8: immagini delle particelle di polvere della lega Ti6Al4V utilizzata in processi EBM.

La lega di titanio ha un'ottima resistenza alla corrosione, anche in ambiente alcalino, seppure presenti una conducibilità termica (7.4 W/mK a temperatura ambiente [23]) inferiore rispetto agli acciai ferritici e austenitici. Presenta inoltre un elevato rapporto resistenza/peso rispetto ad altre leghe metalliche, trovando quindi applicazione nei settori aeronautico, navale e energetico [24]. La dimensione degli strati depositi è pari a $50 \mu\text{m}$. Il fascio di elettroni è generato all'interno di un cannone elettronico, "electron gun", ottenuto scaldando a temperature superiori a 2000°C un filamento di tungsteno e applicando una tensione di accelerazione di 60 kV tra il filamento e l'anodo. Il fascio viene focalizzato e deflesso attraverso l'utilizzo di bobine elettromagnetiche. Il software controlla il movimento del fascio di elettroni sul piatto di stampa. In Figura 9 è visibile la EBM Arcam A2X della GE utilizzata per le prove di stampa, con il particolare della camera interna e delle tramogge di carico della polvere. Durante la stampa EBM, che avviene in condizioni di vuoto controllato con elio ($2\text{E}-3 \text{ mbar}$), il fascio di elettroni viene utilizzato anche per scaldare il piatto di stampa e successivamente per pre-riscaldare la polvere prima della fusione (Figura 10). L'elio consente di evitare i fenomeni di caricamento delle particelle. Il processo avviene a una temperatura costante compresa tra 650 e 700°C .

Il processo di stampa EBM può presentare dei problemi quali ad esempio lo "swelling", rigonfiamento locale del componente, causato da una elevata temperatura sul piatto di stampa. Al contrario una bassa temperatura può portare a una scarsa fusione, fenomeni di caricamento della polvere e di repulsione tra le particelle. Altri fenomeni osservabili all'interno di una stampante EBM sono lo "smoke", ovvero la formazione di una nuvola di polvere nella camera causata da una quantità elevata di polvere trasportata sul piatto di stampa dal rastrello ("rake"). La polvere in questo caso può risalire la colonna e causare degli archi elettrici che possono disabilitare l'emissione di elettroni e causare, se ripetuti, il fallimento della stampa. Questi fenomeni avvengono comunque solo nei casi in cui la macchina non venga mantenuta correttamente. In ultimo, durante la stampa avviene una metallizzazione delle superfici interne della macchina dovuta al processo effettuato in vuoto. La macchina necessita quindi, alla fine della stampa, la rimozione delle metallizzazioni che possono distaccarsi e depositarsi sul piatto di stampa. Rispetto al processo laser, l'EBM presenta una migliore efficienza in termini energetici, non essendo presenti i problemi legati alle perdite di energia per riflessione della radiazione sulle particelle metalliche, e minori tensioni residue nei componenti appena stampati, grazie al continuo trattamento termico che subiscono all'interno della camera di stampa [25]. Dopo aver effettuato la stampa è possibile recuperare la polvere, durante la sabbiatura dei componenti che viene effettuata con la stessa polvere di processo per evitare contaminazioni. Questo passaggio viene effettuato all'interno di un "Powder Recovery System", PSR, Questa viene successivamente setacciata, con setaccio da $106 \mu\text{m}$ su un apparato vibrante, per eliminare le particelle parzialmente fuse e fuori misura. La polvere recuperata può essere rimessa all'interno delle tramogge che successivamente vengono installate all'interno della camera.



Figura 9: Immagine dell'EBM Arcam A2X della GE utilizzata per le prove di stampa (sinistra), particolare della camera interna e tramogge di carico della polvere (destra).



Figura 10: immagini della fase di preriscaldamento (sinistra) e di fusione (destra) della polvere rispettivamente durante un processo EBM.

In Figura 11 sono riportate le immagini del blocco di polvere contenente i componenti stampati, dell'impianto per la sabbiatura e di una fase di questo processo.

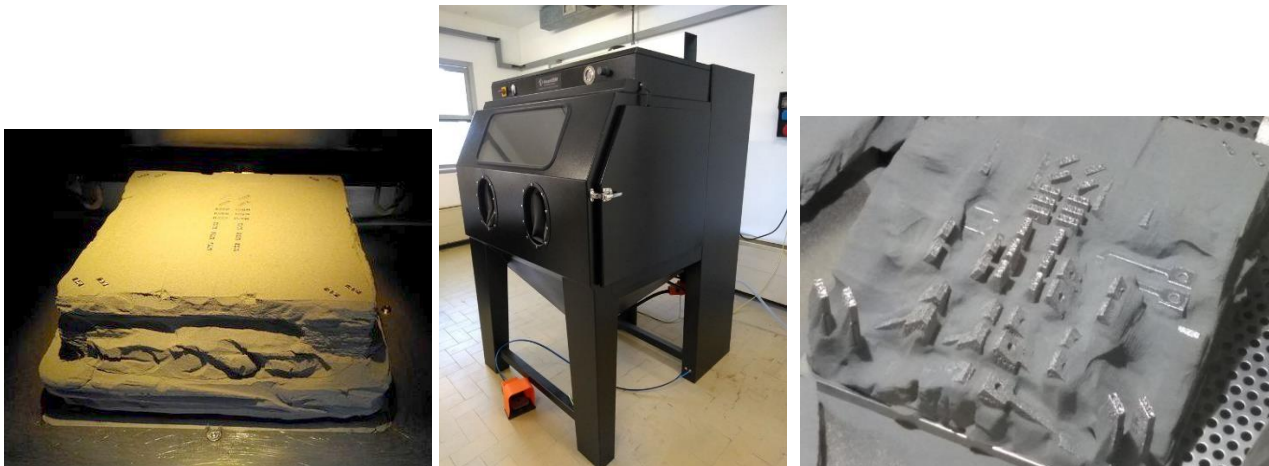


Figura 11: blocco di polvere contenente i componenti stampati (sinistra), sistema per la sabbiatura dei componenti, PRS, “Powder Recovery System” (centro), sabbiatura dei componenti (destra).

Al fine di comprendere quale dimensione minima dei canali è possibile realizzare con l’EBM è stato quindi realizzato un campione di prova con dimensioni dei canali crescenti: 0.2 - 0.4 - 0.8 - 1.2 - 1.6 - 2 - 2.4 mm come mostrato in Figura 12. Il campione presenta inoltre degli smussi come visibile nel modello con dimensione 0.25 - 0.5 - 1 - 2 mm. L’altezza del campione, corrispondente alla profondità dei canali è pari a 30 mm, mentre la lunghezza nella direzione dei centri dei fori è pari a 44.8 mm. I fori sono stati distanziati per evitare alterazioni durante il processo di stampa. Sono visibili in basso nel campione i supporti, che non sono invece presenti all’interno dei canali. La stampa è stata effettuata utilizzando i parametri di “Melt” per il componente.

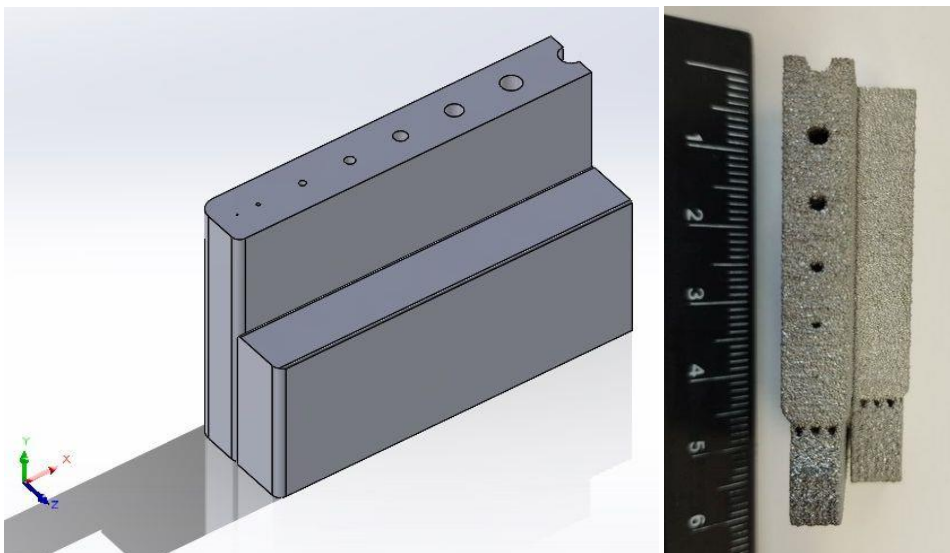


Figura 12: modello CAD (a sinistra) e campione di prova con canali rettilinei realizzato mediante EBM (a destra).

Dopo aver stampato il campione di prova questo è stato sabbiato nel PRS. Nel campione i primi due canali, con dimensioni prossime alla rugosità ottenibile con questa tecnica, non sono visibili (0.2 - 0.4 mm). Nonostante i diversi tentativi non è stato possibile liberare i canali dalla polvere, sebbene questi fossero, seppur di piccole dimensioni, rettilinei.

Sono state comunque effettuate ulteriori prove per verificare la possibilità di stampare strutture convolute mediante EBM. Come osservabile in Figura 13 è stato possibile realizzare una versione semplificata e ridotta dello scambiatore di calore con un solo canale. Sono visibili nelle immagini i setti di separazione che creano i canali all’interno dello scambiatore, ma all’interno è rimasta intrappolata la polvere. Durante la

stampa, nelle zone non fuse, si creano tra una particella e l'altra dei punti di saldatura che tengono insieme tutte le particelle, con all'interno i componenti, in un unico blocco. La fusione che avviene tra le particelle è tale da poterle facilmente separare con una sabbiatrice. Questo però non è possibile farlo all'interno dei canali, ma solo sulle parti esterne.

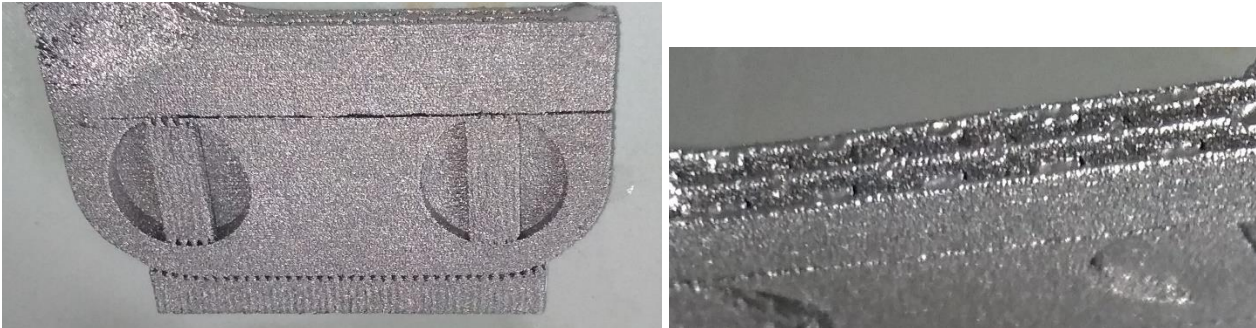


Figura 13: prove di stampa scambiatore ridotto mediante EBM

Sono stati quindi effettuate alcune prove per la rimozione della polvere e in particolare lavaggio con solventi, quali etanolo e iso-propilico, in ultrasuoni per tempi dell'ordine dell'ora e attacchi acidi. Le prove non hanno permesso di arrivare a dei risultati soddisfacenti. Come già riportato in precedenza le condizioni termiche durante il processo di stampa porta alla parziale fusione delle particelle in contatto tra loro, in base probabilmente anche al loro grado di impacchettamento. In Figura 14, le immagini SEM mostrano i punti di giunzione tra una particella e l'altra dopo il processo di stampa. Nella stessa figura sono inoltre visibili i punti di giunzione presenti anche dopo attacco chimico. Questo approccio nel rimuovere la polvere, basato su una reazione chimica, assistito anche da un processo meccanico, presenta degli svantaggi, poiché causa comunque anche la dissoluzione della superficie del campione e fenomeni di *pitting*, visibili in Figura 14 sulla superficie delle particelle.

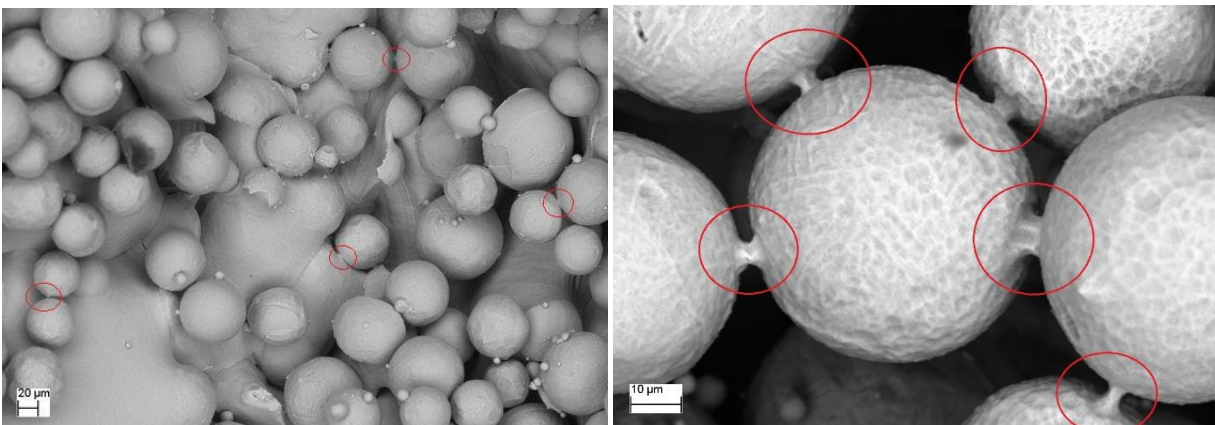


Figura 14: immagini delle particelle parzialmente giunte tra loro dopo il processo di stampa (sinistra) e le stesse dopo attacco chimico.

Lo studio approfondito della separazione delle particelle in componenti EBM è di estremo interesse, ma esula al momento dalla presente attività che ha come obiettivo la realizzazione di scambiatori di calore, con dimensioni analoghe a quelle di uno equivalente realizzato mediante saldobrasatura, che possano essere testati in condizioni operative.

Sono stati effettuati ulteriori tentativi con un altro metodo di stampa 3D, ovvero quello ADAM, utilizzando una stampante Markforged Metal X. In questo caso, prima della stampa, è necessario utilizzare il software Eiger che consente di posizionare il componente sul piatto di stampa e di definirne i parametri. Per assicurare un risultato finale ottimale, gli sviluppatori del software hanno intenzionalmente impedito la

modifica di alcuni parametri, in particolare quelli del posizionamento dei supporti, mentre è possibile definire, come in qualsiasi FDM, il livello di riempimento, *"infill"*, del componente. Nel seguito vengono riportate alcune immagini (Figura 15 e Figura 16) relative a diverse prove di posizionamento del componente che mostrano come non sia possibile rimuovere dalle parti cave i supporti (di colore viola) e il materiale ceramico (di colore arancione), depositato per facilitare il distacco dei pezzi.

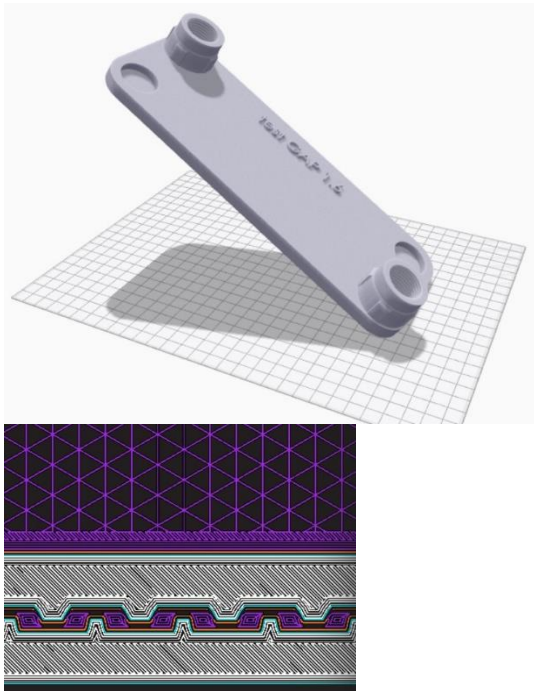


Figura 15: scambiatore di prova con posizione inclinata rispetto al piatto di stampa della Metal X (sinistra); trasparenza che mostra la base, in giallo, i supporti, in viola, il ceramico, in arancione (centro); sezione che mostra il percorso seguito dai due estrusori durante la stampa (destra).

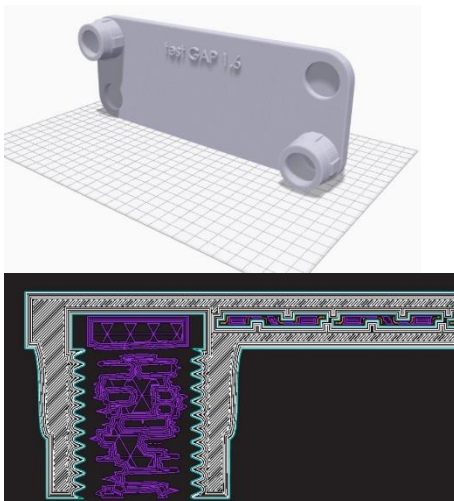


Figura 16: scambiatore di prova posizionato in verticale rispetto al piatto di stampa della Metal X (sinistra); trasparenza con i diversi strati (centro); sezione che mostra il percorso seguito dai due estrusori durante la stampa (destra). I colori sono analoghi a quelli descritti nell'immagine precedente.

Ulteriori indagini sono state condotte su alcuni componenti stampati per valutare da una parte il grado di finitura superficiale e dall'altro la microstruttura. E' stato possibile osservare come, essendo la tecnologia ADAM sostanzialmente una tecnologia FDM, le superfici inclinate presentano una finitura superficiale

abbastanza grossolana. Questo dipende dal livello di risoluzione laterale che è possibile ottenere mediante l'estrusione di un filamento (Figura 17-a). Inoltre a livello microstrutturale possono essere presenti, sui componenti stampati, alcuni difetti, dovuti sempre al non perfetto accoppiamento tra i vari passaggi del filamento durante l'estrusione, e altri dovuti invece al trattamento termico, che da una parte rimuove completamente il polimero, ma dall'altra genera una porosità molto fine, con dimensioni inferiori a 10 μm , diffusa omogeneamente nel campione. Queste porosità, essendo di piccole dimensioni, potrebbero essere chiuse mediante trattamenti di pressatura isostatica a caldo (Figura 17-b e c).

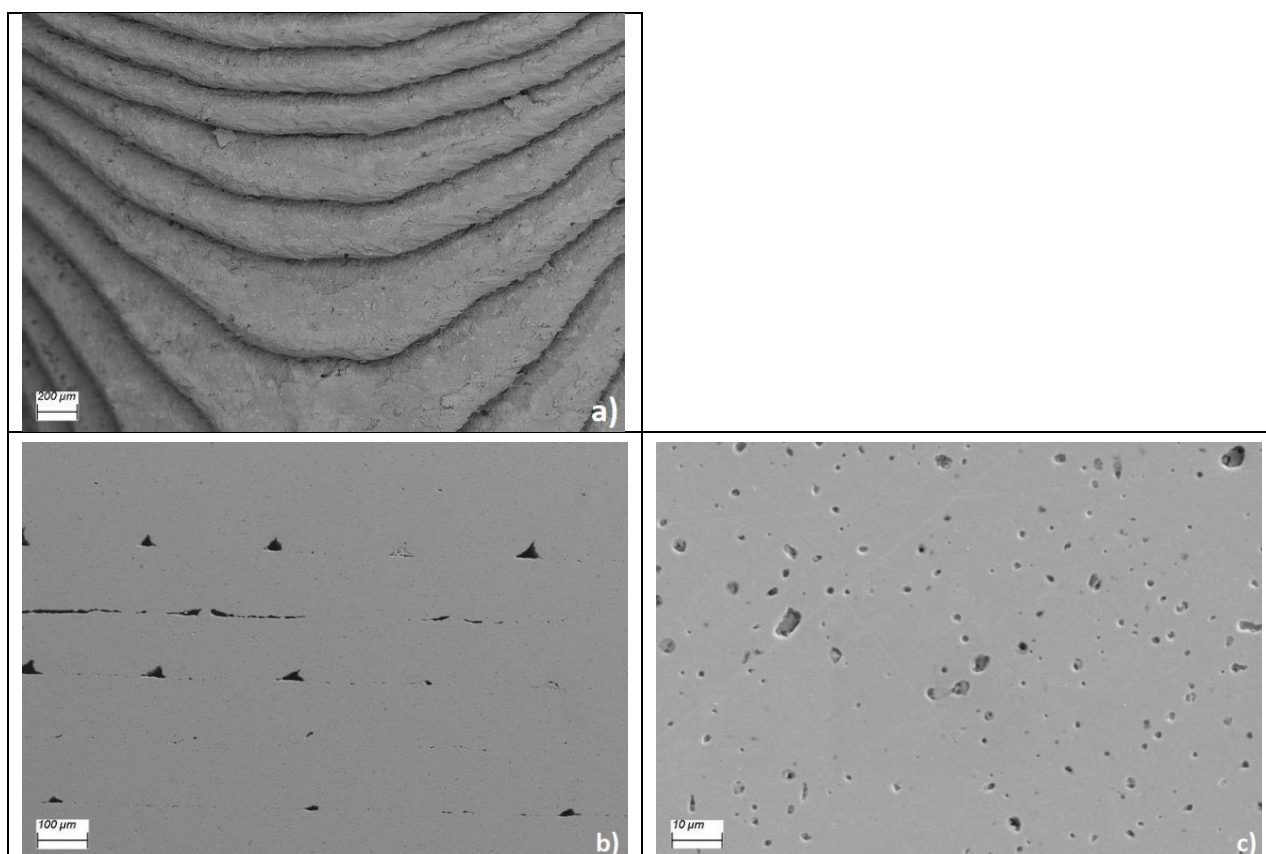


Figura 17: immagini SEM della superficie inclinata, a), e della sezione, a due diversi ingrandimenti, b) e c), di alcuni campioni realizzati mediante la stampante Metal X della Markforged (ADAM).

La tecnologia di tipo ADAM e BMD sono di estremo interesse, perché consentono di stampare componenti metallici a partire da polimeri caricati con particelle metalliche, quindi con un ridotto dispendio energetico. Si è però ritenuto opportuno, a seguito dei risultati ottenuti, di utilizzare un ulteriore processo di stampa a letto di polvere con sorgente laser, il DMLS. I processi laser assicurano una maggiore finitura superficiale, poiché utilizzano polveri con granulometria nell'intervallo 20-65 μm .

Il materiale utilizzato per la stampa è l'AISI 316L con la composizione, in % in peso, riportata in Tabella 4.

Tabella 4: composizione nominale AISI 316L EOS (% in peso)

Elemento	Min.	Max.
Fe	Balance	
Cr	17.00	19.00
Ni	13.00	15.00
Mo	2.25	3.00
C	-	0.03
N	-	0.10

Il materiale, dopo fusione, secondo quanto dichiarato dal costruttore, presenta una densità pari a 7.97 g/cm^3 (secondo la norma ISO3369). Le caratteristiche meccaniche dichiarate dal costruttore sono riportate in Tabella 5.

Tabella 5: proprietà meccaniche dell'AISI 316 L EOS

	Carico di snervamento $R_{p0.2}$ (MPa)	Carico a rottura R_m (MPa)	Allungamento a rottura A (%)
Verticale	470	540	54
Orizzontale	530	640	40

Per quanto riguarda la rugosità superficiale (R_a) il costruttore riporta un grafico di questa in funzione dell'angolo di stampa del campione e della posizione. I valori variano, per i componenti appena prodotti, da un massimo prossimo a $20 \mu\text{m}$ (con angolazione di 45°) e circa $10 \mu\text{m}$ (per angolazione di 90°), che può arrivare a $3 \mu\text{m}$ mediante processo di stampa a $20 \mu\text{m}$. Questi livelli di rugosità non possono essere ottenuti mediante processi EBM, se non mediante ulteriori trattamenti. I dati riportati, dichiarati da EOS, possono variare in base al tipo di macchina utilizzata [26].

In Figura 18 è visibile la macchina EOSINT M280 della EOS, utilizzata per la stampa degli scambiatori di calore. La stampante ha le caratteristiche già riportate nel precedente paragrafo. In Figura 18 sono invece visibili lo schermo di controllo della stampante (sinistra) e la fase di fusione di uno strato di particelle mediante il fascio laser.



Figura 18: stampante laser DMLS EOS M280 con la quale sono stati scambiati gli scambiatori di calore

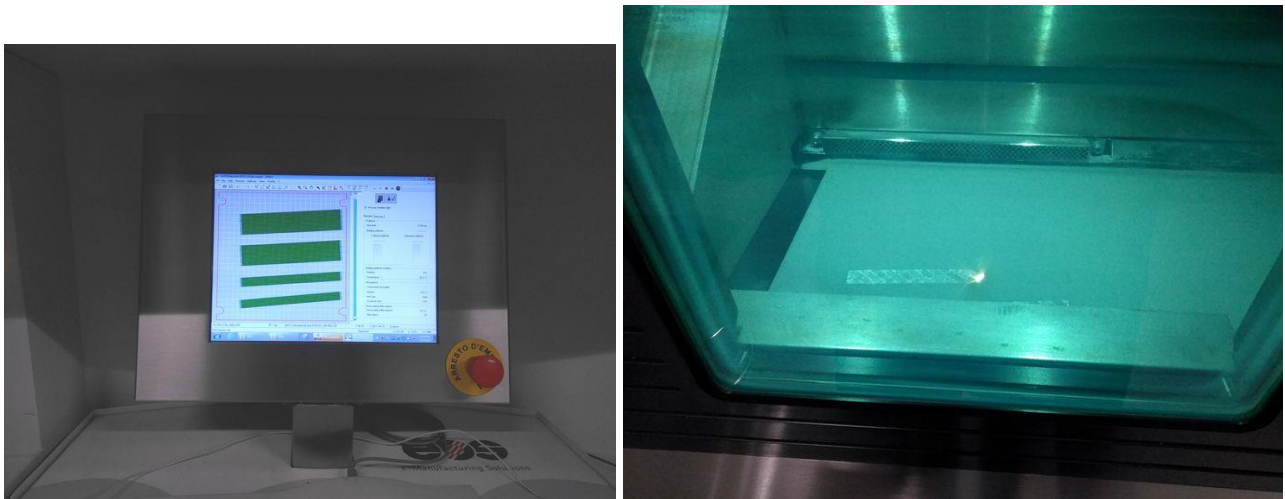


Figura 19: immagini che mostrano lo schermo di controllo del processo di stampa (sinistra) e la fase di fusione di uno strato di particelle mediante il fascio laser.

Sono stati inizialmente stampati degli spaccati dello scambiatore di calore, con diversi spessori del setto separatore, ovvero quello che separa il canale del fluido caldo da quello freddo. Gli spaccati sono riportati in Figura 20. Sono visibili chiaramente i setti di separazione tra i vari canali e la struttura interna ai canali stessi.

Sono stati stampati gli spaccati sia della versione con i cerchi che quella con i quadrati, a 7 e a 2 canali. Lo spessore minimo realizzato è pari a 0.5 mm.

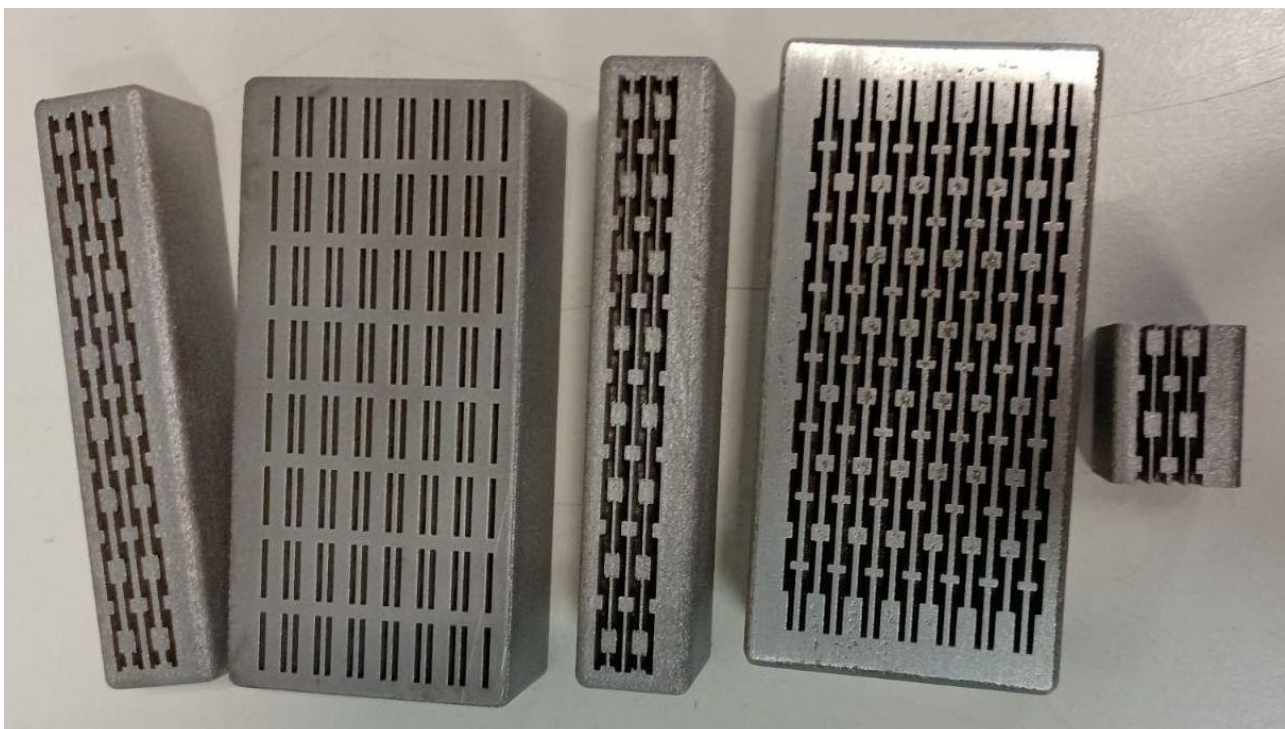


Figura 20: immagine degli spaccati dei diversi scambiatori realizzati al fine di verificare le potenzialità del processo di stampa

Visti i risultati promettenti ottenuti sugli spaccati sono stati quindi realizzati gli scambiatori di calore a dimensione reale. Nella Tabella 6 sono riportati i dati relativi agli scambiatori realizzati mediante DMLS. La denominazione utilizzata fa riferimento al progetto ottimizzato nella LA 4.8 e allo spessore del setto separatore.

Tabella 6: misure geometriche degli scambiatori di calore realizzati mediante DMLS

Denominazione	Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)	Altezza (mm)	N. Canali	Cod.
Cerchi 7 can - sp 0.8	210	82	40,8	7	D
Quad 7 can - sp 0.8	208	84	40,8	7	B
Quad 2 can - sp 0.5	208	84	15,9	2	A
Quad 2 can - sp 1	208	84	17,4	2	C

In Figura 21 sono visibili gli scambiatori realizzati mediante DMLS. Rispetto al progetto realizzato nella precedente annualità, utilizzato per la stampa degli scambiatori in materiale polimerico, sono state apportate alcune piccole modifiche che consentono una maggiore probabilità di riuscita della stampa, riducono i tempi di produzione e consentono di testarli senza operare ulteriori lavorazioni meccaniche.



Figura 21: immagine degli scambiatori realizzati mediante DMLS.

Sono stati infatti eliminati i bocchelli già filettati e sono state create delle cave per alloggiare degli o-ring per la tenuta durante le prove di qualifica. Sono state quindi progettate delle piastre per l'accoppiamento dello scambiatore con il banco prova per l'effettuazione dei test di qualifica. Le piastre sono state realizzate in acciaio al carbonio trattate per limitarne l'ossidazione (Figura 22).

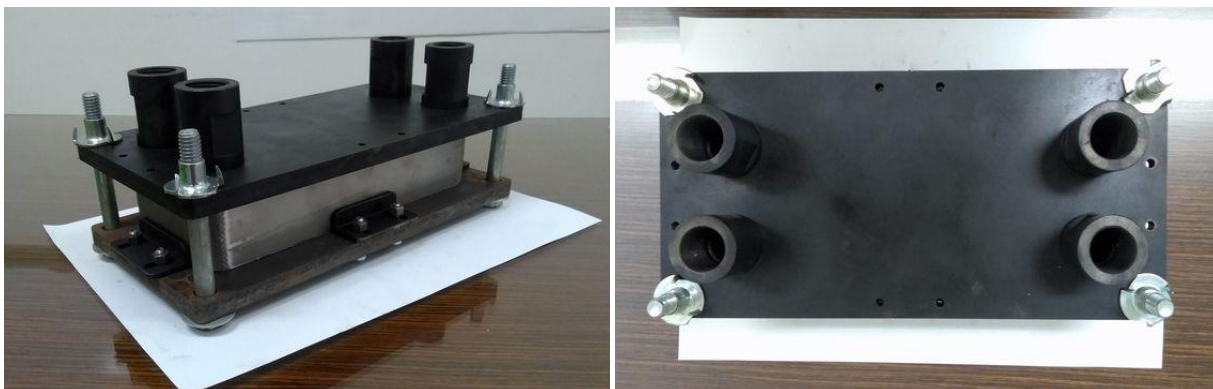


Figura 22: immagine dello scambiatore di calore a 7 canali prima dei test di qualifica sul banco prova.

Nella Figura 23 è invece visibile lo scambiatore a 7 canali montato sul banco prova durante i test di qualifica.

Uno dei canali è collegato a una mandata di acqua a temperatura costante intorno ai 18 °C, mentre l'altro canale è collegato al sistema di riscaldamento/refrigerazione Lauda VC 5000. In questo linea è stato utilizzato una soluzione di acqua demineralizzata e glicole etilenico al 50% in volume. I due canali sono collegati in maniera tale che la direzione dei flussi sia in controcorrente.

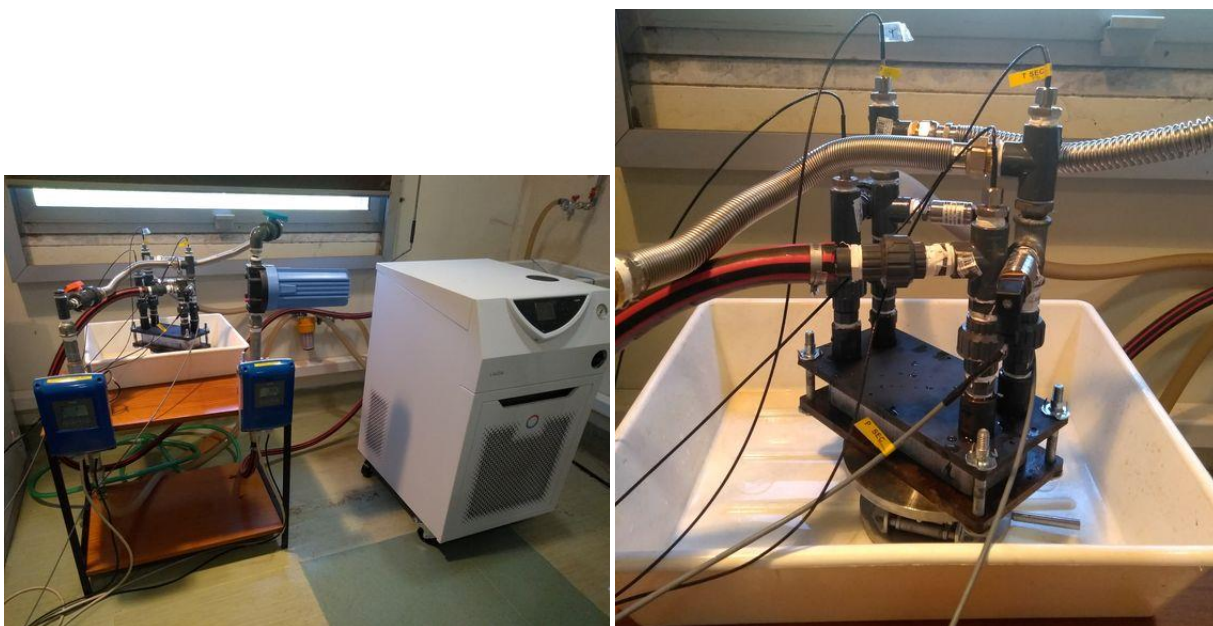


Figura 23: immagine dello scambiatore a 7 canali, montato sul banco prova, durante i test di qualifica

I test funzionali sono stati condotti seguendo la presente procedura:

- misura delle perdite di carico nei canali utilizzando lo stesso fluido;
- monitoraggio delle temperature in ingresso e uscita dai canali e delle portate in ingresso;
- modifica della temperatura del fluido in uno dei canali fino al superamento del transitorio;
- acquisizione dei dati durante la misura;
- elaborazione dei dati.

Gli scambiatori a piastre realizzati presentano un'elevata potenza di scambio con salti termici relativamente piccoli, pertanto, dal momento che il sistema di riscaldamento/refrigerazione è limitato rispettivamente a 4 e 5 kW, è stato possibile testare gli scambiatori a 7 canali nell'intervallo 0-35°C, mentre quelli a 2 canali nell'intervallo 0-45°C. Le portate dei fluidi sono state impostate nel primo caso pari a circa 350 l/h, lato caldo e lato freddo, mentre nel secondo è stato possibile effettuare misure sia a 350 l/h che a 600 l/h.

In Figura 24 sono riportati i dati sperimentali per i due scambiatori a 7 canali con geometria interna a cerchi e a quadrati.

Quest'ultimo presenta perdite di carico inferiori rispetto al primo del 30%, nell'intervallo di portate 500-2000 l/h. Per valori inferiori di portata la differenza è superiore, ma comincia a perdere di significato visti i bassi valori misurati.

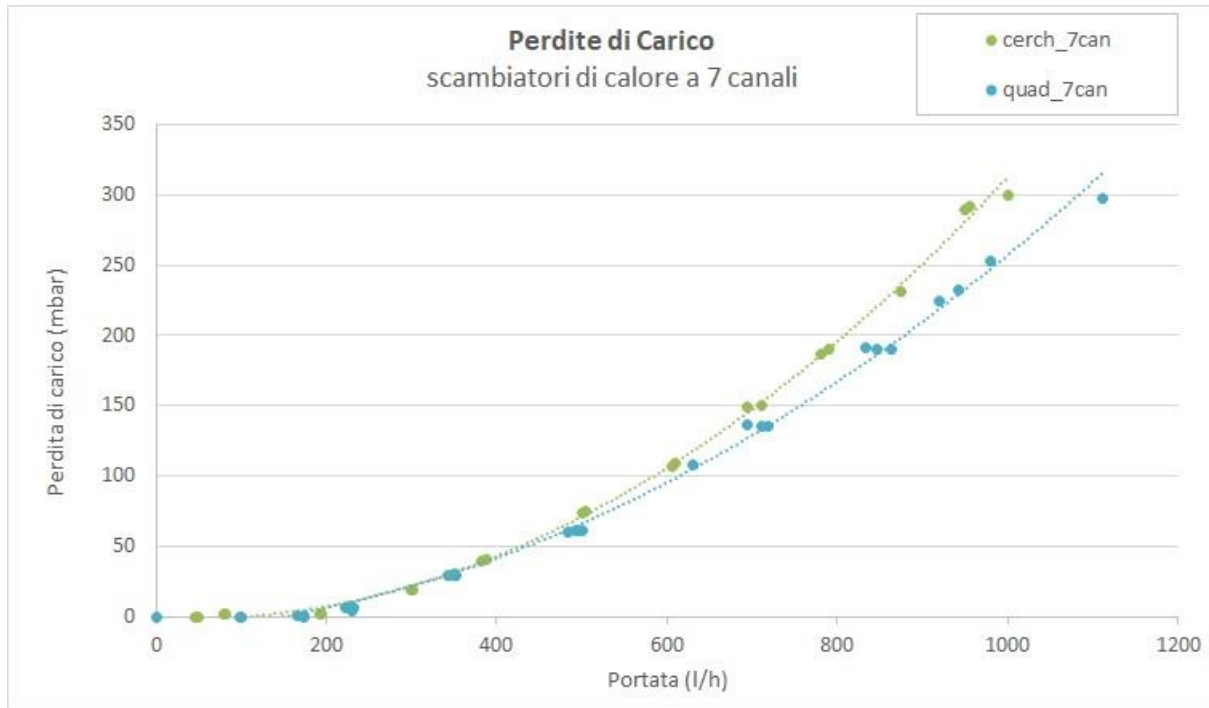


Figura 24: perdite di carico misurate per i due scambiatori a 7 canali con geometria interna a cerchi e a quadrati.

Come atteso gli scambiatori in lega metallica hanno dimostrato un elevato coefficiente globale di scambio. Inoltre sono stati verificati i risultati, ottenuti anche mediante simulazione numerica, del comportamento termofluidodinamico.

Con le dovute cautele, dovute alla limitazione del campo di prove sperimentali effettuate, lo scambiatore con geometria interna a quadrati ha dimostrato essere leggermente più performante, sia in termini di perdite di carico che di scambio termico.

I dati di scambio termico sperimentali, ottenuti in condizioni stazionarie sui vari scambiatori realizzati, sono stati successivamente interpolati con una regressione non lineare ai minimi quadrati, adottando un modello di scambio termico per convezione della forma di quello Sieder Tate [27].

$$Nu = a * Re^b * Pr^c * (Mu/Mup)^d$$

Dove Nu , Re e Pr sono rispettivamente i numeri adimensionali di Nusselt, Reynolds e Prandtl, a,b,c,d sono coefficienti da trovare con la regressione ai minimi quadrati dei punti sperimentali.

In particolare si ha:

$$Nu = \frac{h}{De * K} \quad ; \quad Re = Ro * V * \frac{De}{Mu} \quad ; \quad Pr = Cp * \frac{Mu}{K}$$

Dove Mu, Mup, Ro, Cp e K sono rispettivamente, la viscosità nel flusso e alla parete di scambio termico, la densità, il calore specifico e la conducibilità del fluido, calcolate alla temperatura media tra ingresso e uscita dello scambiatore, mentre V e De sono la velocità del flusso ed il diametro equivalente di passaggio, infine h è il coefficiente di scambio termico calcolato sul singolo lato dello scambiatore.

Il coefficiente di scambio globale dello scambiatore U_d è dato dalla seguente equazione:

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{s}{\lambda}$$

Dove h_1 e h_2 sono i coefficienti di scambio termico per convezione forzata calcolati sui due lati dello scambiatore, s è lo spessore della singola piastra di scambio e λ è la conducibilità del materiale della piastra.

Il sistema di acquisizione dati, utilizzato per la campagna sperimentali sui vari scambiatori prodotti mediante AM, è stato messo a punto per fornire direttamente i valori di U_d , Re e Pr per ogni punto sperimentale, mediante subroutines di calcolo delle grandezze termo fisiche dell'acqua e delle soluzioni di acqua/glicole etilenico, secondo le concentrazioni utilizzate durante le prove.

La Funzione Obiettivo da minimizzare, per trovare i coefficienti incogniti a, b, c, d per ogni scambiatore, è quindi stata:

$$\sum_{i=1}^n (U_{ds} - U_{dc})^2 = Min.$$

dove U_{ds} e U_{dc} sono rispettivamente i coefficienti di scambio globali sperimentali e calcolati per ogni punto di prova considerato.

Dato che le due temperature di parete sui due lati dello scambiatore dipendono da h_1 e h_2 , inizialmente incogniti, ai fini della regressione le Mup sono state trovate mediante un calcolo iterativo aggiuntivo per ogni punto sperimentale.

Sono state quindi ottenute tante nuove equazioni quanti sono gli scambiatori realizzati, più due relative al vecchio scambiatore saldobrasato che ha ispirato tutta la ricerca attuale e alla contemporanea regressione sui tutti gli scambiatori con fori quadrati (Tabella 7):

Tabella 7: caratteristiche dei diversi scambiatori qualificati

Equazione	Canali / Spessore piastra	Foratura interna
A	2 / 0.5 (*)	quadrati
B	7 / 0.8 (*)	quadrati
C	2 / 1.0 (*)	quadrati
D	7 / 0.8	Cerchi
E	7 / 0.8	Cerchi (Saldobrasato)
F	Tutti i tipi insieme (*)	Quadrati

I punti sperimentali stazionari utilizzati per le varie regressioni sono riportati in Tabella 8, dove T_m rappresenta la temperatura media e gli indici 1 e 2 i due lati dello scambiatore considerato.

Tabella 8: Punti sperimentali stazionari usati per le regressioni

Scambiatore	Uds kW/m ² °C	Re1	Re2	Pr1	Pr2	T _{m1} °C	T _{m2} °C	kW
A	5.7	1428.6	1984.7	10.8	7.6	4.25	16.50	2.86
	5.9	1437.5	2020.9	10	7.6	7.06	16.90	2.35
	5.96	1701.2	2049.1	8.8	7.4	11.27	17.46	1.5
	5.99	1868.0	2088.2	7.8	7.3	15.77	18.12	0.57
	6.6	2115.4	2128.2	7.0	7.2	19.91	18.74	0.31
	6.4	2311.5	2139.9	6.2	7.1	24.47	19.38	1.34
	6.6	2482.7	2183.9	5.6	7.0	28.66	20.05	2.3
	6.6	2856.6	2212.0	5.07	6.8	32.92	20.77	3.29
	6.7	2920.8	2235.3	4.7	6.7	36.55	21.40	4.14
B	1.3	47.2	338.2	64.8	7.8	4.39	15.54	2.49
	1.3	48.5	345.3	62.8	7.7	8.24	16.31	1.88
	1.4	55.9	352.9	58.5	7.5	12.13	17.03	1.17
	1.4	61.5	357.4	52.9	7.3	16.03	17.93	0.45
	1.5	73.6	366.6	46.9	7.2	19.97	18.77	0.31
	1.5	85.8	373.7	41.04	7.03	23.87	19.61	1.12
	1.5	103.7	385.03	35.5	6.8	27.93	20.62	1.98
	1.6	122.7	393.4	30.8	6.7	31.86	21.57	2.84
	1.6	144.9	402.8	26.7	6.5	35.88	22.67	3.72
C	3.4	652.4	1170.5	16.7	6.6	50.09	21.90	3.86
	3.2	480.6	1137.7	22.3	6.9	41.08	20.37	2.72
	3.1	349.1	1112.3	30	7.1	32.65	19.02	1.72
	3	249.4	1080.5	40.6	7.4	24.15	17.78	0.77
	2.6	180.2	1037.2	53.5	7.6	15.65	16.75	0.12
	2.6	145.4	1021.9	63.5	7.8	7.20	15.76	0.9
	2.4	131.7	995.3	62.7	8	-1.17	14.87	1.56
	2.8	209.3	1045.1	47.08	7.5	19.83	17.19	0.3
D	3.2	690.3	642.1	7	7.2	19.86	18.61	0.65
	2.9	628.03	627.4	7.8	7.4	15.88	17.62	0.83
	2.9	493.7	640.6	9.6	7.7	8.31	15.99	3.61
	2.94	560.1	656.7	8.6	7.6	12.05	16.89	2.33
	2.96	610.4	674.5	7.7	7.4	15.96	17.85	0.91
	3.2	661.3	683.9	7	7.2	19.91	18.81	0.59
	3.2	728	707.8	6.3	7	23.85	19.82	2.12
	3.3	807.1	724.9	5.7	6.8	27.76	20.89	3.64
	3.3	814.3	728.5	5.6	6.8	28.67	21.10	4.03

Le varie regressioni eseguite sono in ottimo accordo con i dati sperimentali con scarti massimi sull' Ud minori del 5% per gli scambiatori A, B, C, D ed E, per quest' ultimo è stata utilizzata la regressione effettuata al tempo della sua realizzazione.

La regressione per lo scambiatore F, somma di A, B e C, tutti con identica perforazione a quadrati, ha mostrato scarti massimi maggiori, comunque accettabili (<20%), probabilmente a causa delle condizioni di sperimentazione diverse tra i vari scambiatori.

Le correlazioni ottenute, per quanto buone, risentono della limitatezza del campo di sperimentazione adottato, e devono essere considerate come solamente preliminari al fine del dimensionamento degli scambiatori.

Tutte le equazioni di scambio termico ottenute col procedimento descritto sono state successivamente utilizzate per predire le prestazioni di un ipotetico scambiatore acqua-acqua, con numero di canali (7), dimensioni piastra di scambio (71 x 171.6 mm), distanziamento piastre (1.6 mm) e spessore (0.8 mm) delle piastre, prefissati.

La figura 25 descrive l'andamento del coefficiente globale e della potenza di scambio di tale scambiatore ipotetico, al variare della conducibilità termica del materiale costruttivo, nelle condizioni tipiche delle caldaie murali per produzione di acqua calda sanitaria: Portata calda 1400 l/h ; Portata fredda 600 l/h ; T ingresso caldo 65 °C ; T ingresso freddo 15 °C .

La figura 25 descrive l'andamento del coefficiente globale e della potenza di scambio, al variare della conducibilità termica del materiale nelle condizioni tipiche delle caldaie murali per produzione di acqua calda sanitaria: Portata calda 1400 l/h ; Portata fredda 600 l/h ; T ingresso caldo 65 °C ; T ingresso freddo 15 °C .

L'analogia fig. 26 è stata ottenuta invece in condizioni interne al campo delle prove sperimentali effettuate: Portata calda 616 l/h ; Portata fredda 646 l/h ; T ingresso caldo 30.5 °C ; T ingresso freddo 18.5 °C .

Da notare che i punti con conducibilità 0.17 W/m°C rappresentano le prestazioni predette per piastre in metacrilato, quelli con conducibilità 15 W/m°C, prossimo a quella dell'AISI 316, quelli infine con 51.9 W/m°C , piastre in ferro. Nel caso di utilizzo della lega ferritica sviluppata nel WP3, che presenta una conducibilità termica di circa 30 W/m°C, è possibile ottenere miglioramenti del coefficiente di scambio termico globale intorno tra il 13 e il 19%, in confronto a uno equivalente realizzato in AISI 316.

E' facile notare che con le piastre in materiale polimerico si raggiungerebbe circa l'80 % della prestazione massima dello scambiatore con una conducibilità di soli 5 W/m°C. Esistono in letteratura numerosi articoli scientifici che riportano un notevole incremento della conducibilità termica dei materiali compositi rispetto alla matrice polimerica. Per esempio nel caso di una matrice di poliammide caricata con particelle di rame, in forme diverse, si riescono a raggiungere valori di conducibilità termica prossimi a quelli dell'acciaio AISI 316 (circa 12 W/mK rispetto ai 13.3 W/mK) [28]. In un altro caso la conducibilità termica è stata incrementata da 0.23 a 20.1 W/mK nel caso di un policarbonato con fibre di carbonio [29]. L'interesse negli scambiatori in materiale composito nasce anche dalla loro elevata resistenza alla corrosione oltre che per la bassa densità della matrice [30,31].

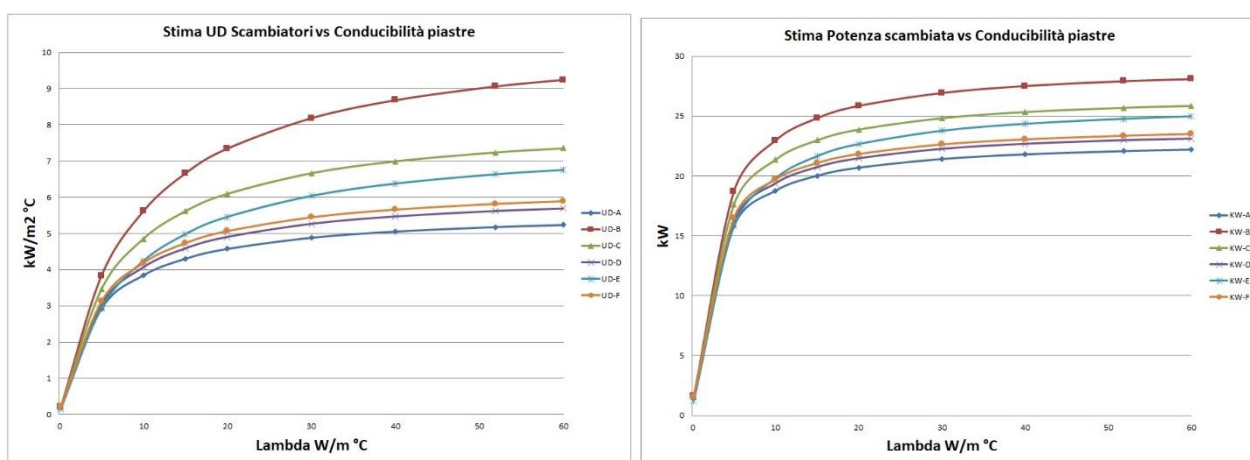


Figura 25: Previsione delle prestazioni dello scambiatore in condizioni di produzione di acqua calda sanitaria.

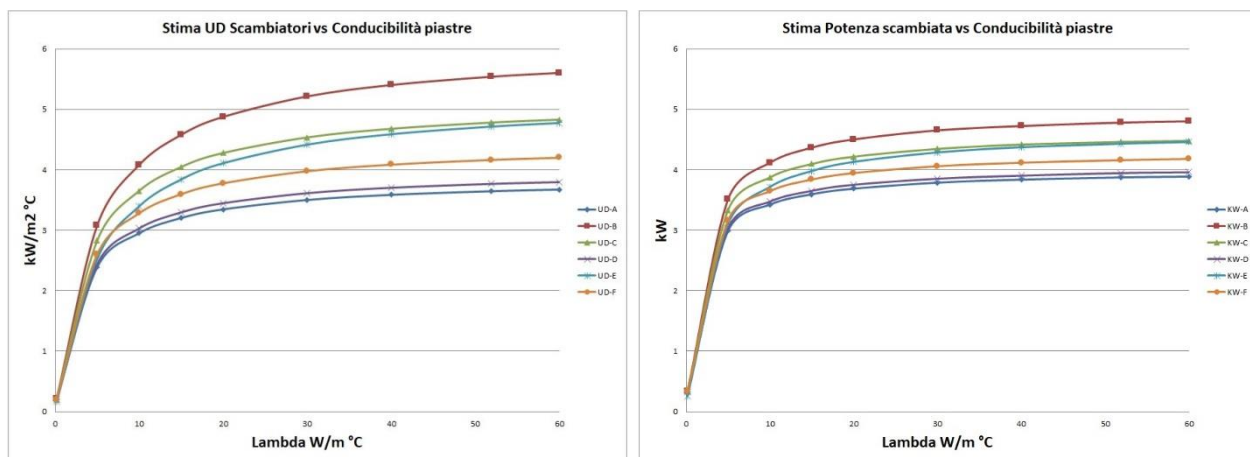


Figura 26: Previsione delle prestazioni dello scambiatore in condizioni simili a quelle della campagna sperimentale.

Nella attività svolta nel triennio è stato possibile dimostrare le potenzialità della stampa 3D nella realizzazione di scambiatori di calore. Alla luce dei risultati sperimentali infatti è stato dimostrato che è possibile, mediante semplici modifiche del progetto dello scambiatore ottenere notevoli benefici in termini di consumi energetici e di riduzione del materiale utilizzato riducendo l'ingombro e la massa totale rispetto allo scambiatore realizzato mediante saldobrasatura. Questo si è ottenuto, da una parte riducendo gli spessori delle parti esterne dello scambiatore e introducendo una struttura alveolare, dalla quale può essere rimossa facilmente la polvere. Inoltre sono state rimosse le masse dello scambiatore non necessarie, perché non strutturali né funzionali allo scambio termico (Figura 27). La riduzione del volume stampato porta quindi a una riduzione del consumo energetico per la stampa dello scambiatore e a una notevole riduzione del materiale utilizzato. Tutto questo può essere definito sulla base di semplici valutazioni fatte a partire dal modello CAD. Solamente rimuovendo le masse di materiale non necessarie è stato possibile ridurre la massa dello scambiatore del 21 % (nelle "conclusioni"). Analogo discorso può essere fatto considerando l'utilizzo di una lega ottimizzata per lo scambio termico ($\lambda \approx 30 \text{ W/mK}$), realizzata nel WP3, LA 3.4-3.5-3.6 in sostituzione dell'AISI 316 ($\lambda = 13.3 \text{ W/mK}$). Questo miglioramento potrà tradursi in uno scambiatore ancora più compatto permettendo di ottenere un ulteriore risparmio energetico sulla produzione del singolo scambiatore.

3 Conclusioni

La presente attività sperimentale, prevista all'interno del PTR 2019-2021, aveva come scopo finale quello di realizzare, mediante tecnologie additive, scambiatori di calore per un utilizzo all'interno delle macchine ad assorbimento con ciclo acqua-ammoniaca. L'attività ha visto la produzione di provini di lega ferritica, progettata e realizzata all'interno delle LA 3.4-3.5-3.6 e la loro caratterizzazione. Sono stati ottimizzati i parametri di stampa per questo tipo di lega, raggiungendo una densità pari al 99.87% rispetto al pieno (valore massimo teorico). La lega presenta una conducibilità termica doppia, un minore coefficiente di dilatazione lineare, rispetto a quella dell'AISI 316, e una buona resistenza alla corrosione in ammoniaca. L'attività ha previsto inoltre la produzione di scambiatori di calore mediante stampa 3D, in acciaio inossidabile, con processo DMLS, con diverse geometrie interne. Questi scambiatori sono stati realizzati a partire da un progetto sviuppato nella LA 4.8 (2° anno di attività), basato su un precedente disegno dell'ENEA, che aveva portato alla realizzazione di uno scambiatore di calore mediante assemblaggio di piastre pre-forate e saldobrasatura (Figura 27).



Figura 27: immagine degli scambiatori di calore realizzati da ENEA nella versione originaria, realizzato mediante saldobrasatura, sia in quella odierna, ottenuto mediante stampa 3D.

L'attività ha previsto inoltre le prove funzionali sul banco prova degli scambiatori di calore prodotti. La versione dello scambiatore con geometria ottimizzata presenta il 30% di perdite di carico in meno rispetto a quello con la precedente geometria interna e un coefficiente di scambio termico leggermente superiore. E' stata quindi dimostrata la possibilità di stampare in 3D degli scambiatori di calore con canali interni altamente convoluti, liberi della polvere e privi di supporti, in materiali che presentano buone caratteristiche meccaniche e resistenza alla corrosione. Questi scambiatori di calore possono trovare applicazione, non soltanto all'interno delle macchine ad assorbimento, ma anche, ad esempio, di caldaie domestiche. Sulla base dei risultati ottenuti nel piano triennale è quindi possibile considerare la drastica riduzione del peso dello scambiatore agendo sulla rimozione, semplicemente modificando il modello CAD, dei volumi di materiale non strutturali e non interessati allo scambio termico. In questo modo è possibile ottenere una riduzione dell'ordine del 20% della massa dello scambiatore, utilizzando anche strutture a nido d'ape alleggerite sulle superfici esterne. Inoltre, avendo presenti i vincoli della tecnologia di stampa, è possibile realizzare degli scambiatori con le dimensioni richieste da un potenziale cliente secondo eventuali specifiche operative (potenza) e dimensionali (ingombro e forma). Una considerazione a parte va fatta per gli analoghi scambiatori realizzati in materiale polimerico, dove un materiale con conducibilità aumentata fino a circa 5 W/m°C potrebbe portare ad interessanti risvolti applicativi industriali.



Massa = 3781.62 g

Volume = 472702.44 mm³

Spessore tot. = 40.8 mm



-21% Massa = 3003.41 g

-21% Volume = 375426.73 mm³

Spessore tot. = 36.3 mm



-19% Massa = 3725.22 g

-19% Volume = 465652.30 mm³

Spessore tot. = 40.8 mm

Figura 28: esempio di ulteriore alleggerimento dello scambiatore di calore ottenuto agendo sui volumi di materiale non strutturali e non interessate allo scambio termico (centro).

4 Riferimenti bibliografici

- [1] 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
- [2] Simons, M. Additive manufacturing—a revolution in progress? Insights from a multiple case study. *Int J Adv Manuf Technol* 96, 735–749 (2018)
- [3] 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)
- [4] T. Gutowski et al., Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing, *Journal of Industrial Ecology*, 21 (2017) S69-79
- [5] Kelbassa I, Wohlers T, Caffrey T (2012) Quo vadis, laser additive manufacturing? *Journal of laser applications* 24(5):050101
- [6] <https://www.desktopmetal.com> e www.markforged.com/
- [7] SLM Solutions Group AG. 2016. Selective laser melting machine SLM 500. <https://slm-solutions.com/products/machines/slmr500hl>
- [8] <https://www.slm-pushing-the-limits.com/specs>
- [9] <https://3d4steel.com/>
- [10] <https://www.desktopmetal.com/products/production/>
- [11] Telenko, C.; Seepersad, C.C. A comparative evaluation of energy consumption of selective laser sintering and injection molding of nylon parts. *Rapid Prototyp. J.* 2011, 18, 472–481.
- [12] Z.o Liu, Q. Jiang, F. Ning, H. Kim, W. Cong, C. Xu, H.-c. Zhang, Investigation of Energy Requirements and Environmental Performance for Additive Manufacturing Processes, *Sustainability* 2018, 10, 360
- [13] Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *J. of Materi Eng and Perform* 23, 1917–1928 (2014)
- [14] <https://www.adsumitalia.com/2016/01/03/parco-caldaie-italia/>
- [15] https://www.anima.it/kdocs/1950551/Studio-statistico_Assotermica_2018.pdf
- [16] Baumer, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., and Hague, R., "Energy Inputs to Additive Manufacturing: Does Capacity Utilization Matter?" *EOS*, Vol. 1000, No. 270, pp. 30-40, 2011.
- [17] <http://www.ecodallecitta.it/notizie/375919/climatizzatori-700000-nuove-installazioni-in-italia-nel-2012/>
- [18] 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
- [19] Bonneau, V.; Yi, H.; Probst, L.; Pedersen, B.; Lonkeu, O.K. The Disruptive Nature of 3D Printing; European Commission: Brussels, Belgium, 2017
- [20] 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
- [21] <https://3dmetal.it/>
- [22] [ArcamEBM A2X Machine | GE Additive](#)
- [23] <https://trc.nist.gov/>
- [24] Royer, R. & Collings, E.(1993). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International.
- [25] Chua, C.K., Leong, K.F. & Lim, C.S. (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, 3rd Edition, World Scientific Publishing: Singapore.
- [26] [material datasheet eos stainlesssteel 316l en web.pdf](#)
- [27] Sieder EN, Tate GE (1936) Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. *Ind Eng Chem* 8:1429–1435
- [28] Serkan Tekce, H., Kumlutas, D., Tavman, I., 2007. Effect of particle shape on thermal conductivity of copper reinforced polymer composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 26, 113–121

-
- [29] Weber, E.H., Clingerman, M.L., King, J.A., 2003. Thermally conductive nylon 6.6 and polycarbonate based resins. synergistic effects of carbon fillers. *Journal of Applied Polymer science* 88, 112–122.
- [30] C. T'Joena, Y. Park, Q. Wang, A. Sommers, X. Han, A. Jacobi, A review on polymer heat exchangers for HVAC&R applications, *Int. J. of Refrigeration* 32 (2009) 763-779
- [31] X. Chen, Y. Su, D. Reay, S. Riffat, Recent research developments in polymer heat exchangers – A review, *Ren. Sust. En. Reviews* 60 (2016) 1367–1386