



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di scambiatori di calore realizzabili mediante Additive Manufacturing

Giuseppe Corallo, Luciano Pilloni, Daniele Mirabile Gattia

Studio di scambiatori di calore realizzabili mediante Additive Manufacturing

Giuseppe Corallo, Luciano Pilloni, Daniele Mirabile Gattia
(ENEA – CR Casaccia)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.3 Materiali di frontiera per usi energetici

Work package: Realizzazioni sperimentali di componenti Additive Manufacturing, a favore delle industrie dei componenti metallici

Linea di attività: LA 4.7 - Studio di scambiatori di calore realizzabili mediante AM

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia - ENEA

Responsabile del Work package: Federica Bezzi - ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
3 CONCLUSIONI.....	30
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	30

Sommario

Gli scambiatori di calore trovano larga applicazione sia nei settori industriali che nel settore domestico. In particolare nel caso di scambiatori di tipo compatto, quali quelli a piastre, la loro produzione prevede o l'assemblaggio di piastre e la separazione dei setti mediante l'utilizzo di guarnizioni in gomma, processi di saldobrasatura o di tipo *fusion-bonding* e *diffusion-bonding*. L'utilizzo di guarnizioni permette di assemblare scambiatori di calore in maniera modulare, ma risentono di perdite e di intervalli di pressione e temperatura di esercizio limitati. Gli scambiatori prodotti mediante saldobrasatura richiedono invece oltre alle fasi di lavorazione delle piastre e di assemblaggio, anche lunghi trattamenti termici. Negli ultimi anni si sono affacciate sul mercato tecnologie additive che permettono la stampa 3D di materiali polimerici e compositi e di materiali metallici. Il vantaggio di queste tecnologie, seppur non ancora competitive con quelle sottrattive in termini di produzioni su larga scala, è dato dalla possibilità di realizzare geometrie complesse, di ridurre notevolmente il numero di componenti da assemblare, di ridurre potenzialmente i consumi energetici per la produzione di componenti e di abbattere la quantità di materiale di scarto e di lavorazione.

Le linee di Attività 4.7-4.8-4.9 prevedono dunque lo studio dell'utilizzo di tecnologie additive per la realizzazione di scambiatori di calore.

1 Introduzione

Il presente studio di ricerca applicata trae ispirazione da uno scambiatore di calore innovativo sviluppato in seno all'attività di ricerca sulle macchine ad assorbimento ad Acqua-Ammoniaca, iniziata dall'ENEA nei primi anni '80.

Tali macchine sono costituite da almeno sette scambiatori di calore e/o materia connessi fra loro in circuito chiuso, che rappresentano la maggior voce di costo per la loro realizzazione.

Dopo circa un decennio di intense prove sperimentali in laboratorio, tale ricerca, tra le varie, trovò un interessante ambito nella collaborazione con Italgas e Merloni Termo Sanitari (MTS), che venne incanalata nel progetto Joule BU 40-91 [1], in seno alla Comunità Europea.

Lo scopo del progetto Joule era la costruzione di 6 prototipi di pompa di calore ad assorbimento ad Acqua-Ammoniaca, della potenza frigorifera di 15 kW, che impiegavano in primo luogo un tipo di scambiatore saldobrasato a piastre piane con turbolatore a rete metallica, derivato da quelli con guarnizioni in gomma della ditta Italiana Technosystem [2].

Tale scelta era dovuta al fatto che alcune prove fatte con i normali scambiatori dotati di guarnizioni, non avevano dato i risultati sperati in termini di tenuta, specialmente alle temperature più basse dei transitori della sezione dell'evaporatore ($\sim -30^{\circ}\text{C}$), dove la gomma diventava troppo rigida e perdeva le necessarie caratteristiche di tenuta.

Peraltro gli scambiatori a piastre saldobrasati, erano all'epoca limitati al ben noto tipo a piastre corrugate (Chevron Plate Heat Exchangers), con brasanti di Rame o Nichel puri, entrambi chimicamente del tutto incompatibili con le soluzioni ammoniacali.

Venne quindi reperito uno speciale materiale brasante a base Nichel-Cromo, denominato Nicrobraz L51 [3], che risultò resistente alle soluzioni ammoniacali in tutte le condizioni di temperatura e concentrazione del ciclo termodinamico ad assorbimento.

Tale brasante era però inadatto all'uso con le piastre corrugate, perché venduto in polvere o pasta da spalmare, cosa che precludeva la riuscita a causa del colare del metallo fuso all'interno delle corrugazioni.

Si tentò quindi di saldobrasare il tipo a piastre piane con turbolatore a rete metallica, con cui vennero costruiti effettivamente i prototipi da parte di MTS.

Gli scambiatori vennero costruiti in numero sufficiente a realizzare i prototipi di pompa di calore necessari, a prezzo di un gran numero di tentativi e di esemplari malriusciti: le reti metalliche portate a circa 1000°C durante il processo di saldatura, si rivelarono infatti poco adatte ad essere brasate, a causa di dilatazioni termiche difficilmente governabili.

Queste difficoltà, la taglia delle macchine troppo grande per il settore di mercato tipico dell'azienda e il progetto velleitario di altri componenti chiave della macchina, portarono MTS ad abbandonare il progetto subito dopo la sperimentazione in campo di tre dei sei prototipi, come previsto dalla tempistica del progetto Joule.

Successivamente, nell'ipotesi di realizzare una macchina più piccola da circa 7 kW frigoriferi, per il mercato residenziale, venne ideato un tipo di turbolatore costituito da ulteriori due piastre forate opportunamente sfalsate che rendevano agevole la spalmatura di brasante.

Il concetto innovativo ebbe successo, e dopo una complessa vicenda brevettuale, portò al deposito di 4 brevetti distinti [4-7].

Al termine dell'iter brevettuale, nel 1998 circa, si decise di realizzare un prototipo in acciaio al carbonio, inizialmente brasato al rame per semplicità, che utilizzasse quella geometria costruttiva, per compararlo con uno scambiatore di calore commerciale del tipo a piastre corrugate di dimensioni identiche e con lo stesso numero di piastre.

Venne quindi realizzato uno scambiatore con piastre forate da 8 mm spesse 0.8 mm, Figura 1, che venne successivamente provato nei laboratori ENEA della Casaccia. In Figura 2 è riportato il disegno delle piastre forate.



Figura 1: prototipo realizzato con piastre forate da 8 mm e brasato al rame

Pur essendo stato dimensionato a tentativo, lo scambiatore riuscì a superare le prestazioni di scambio dell'omologo commerciale, seppure a prezzo di perdite di carico maggiori [8,9].

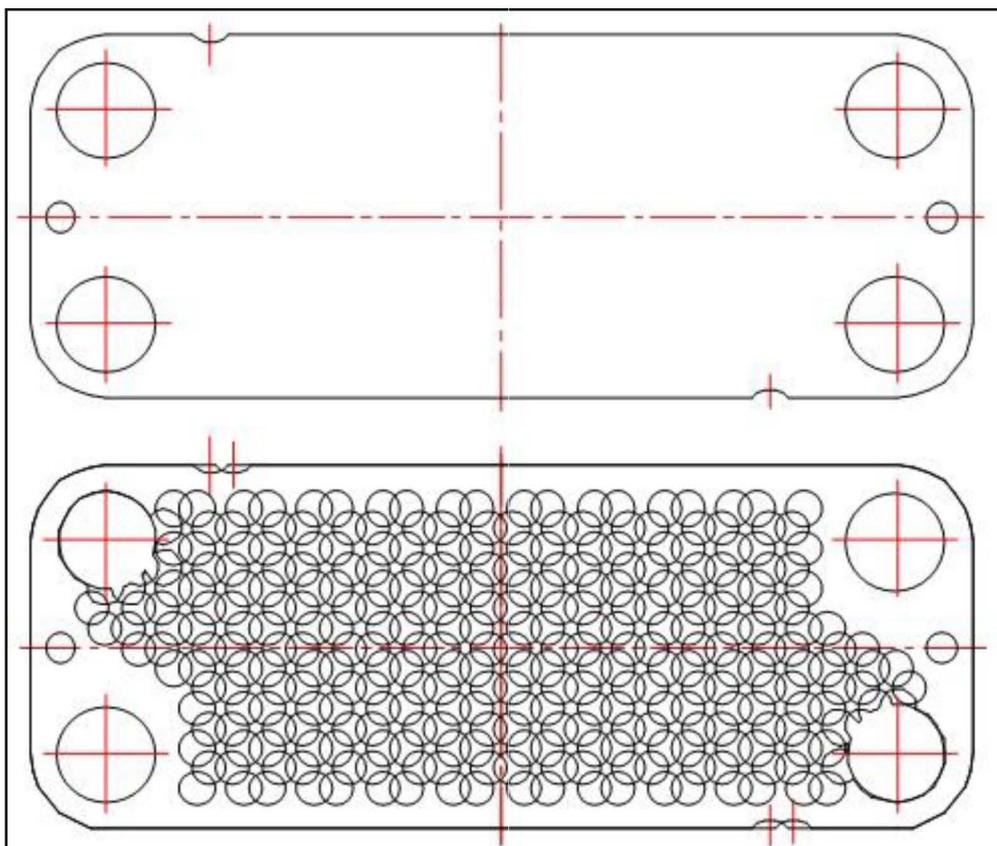


Figura 2: piastre lisce e turbolatore a piastre forate sovrapposte

Nonostante le buone premesse, a causa del mutare delle scelte di strategia industriale, lo scambiatore non conobbe mai l'utilizzo a livello industriale che avrebbe meritato.

Successivamente comparvero sul mercato alcuni scambiatori a piastre corrugate brasati con acciaio inox, denominati Alfanova [10]. L'ENEA nel 2011 con questi ultimi scambiatori diede luogo allo sviluppo di alcuni prototipi funzionanti di macchine ad assorbimento per il potenziale mercato del Solar Cooling and Heating [11,12].

Per ottenere il funzionamento atteso, data la scarsa flessibilità costruttiva dei prodotti, si dovettero aggiungere distributori di liquido e vapore progettati ad hoc, inoltre il prezzo di vendita non apparve compatibile con una costruzione in serie a costo contenuto, come desiderato per una rapida diffusione della tecnologia nel settore del condizionamento dell'aria.

Ai giorni nostri, l'impiego delle moderne tecniche di stampaggio 3D, sempre più utilizzate nel settore industriale, potrebbe imprimere una svolta decisiva per la realizzazione economica ed efficiente di scambiatori di calore analoghi a quelli a piastre, per il potenziale mercato delle macchine condizionatrici ad assorbimento ad Acqua-Ammoniaca, per quello delle caldaie murali con produzione di acqua calda sanitaria e per tutti gli altri impieghi dove vengono comunemente usati.

Gli studi teorici e sperimentali previsti dal presente progetto si prefiggono quindi di realizzare scambiatori di calore efficienti e dal costo industriale ridotto, ispirandosi alle esperienze già condotte in passato.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Gli scambiatori di calore trovano larga applicazione sia nei settori industriali che nel settore domestico. In particolare nel caso di scambiatori di tipo compatto, quali quelli a piastre, la loro produzione prevede o l'assemblaggio di piastre e la separazione dei setti mediante l'utilizzo di guarnizioni in gomma, processi di

saldobrasatura, di tipo *fusion-bonding* o *diffusion-bonding*. L'utilizzo di guarnizioni permette di assemblare scambiatori di calore in maniera modulare, ma risentono di perdite e di intervalli di pressione e temperatura di esercizio limitati. Gli scambiatori prodotti mediante saldobrasatura richiedono invece oltre alle fasi di lavorazione delle piastre e di assemblaggio, anche lunghi trattamenti termici. Negli ultimi anni si sono affacciate sul mercato tecnologie additive che permettono la stampa 3D non mediante l'utilizzo di materiali polimerici e compositi, ma anche di materiali metallici. Il vantaggio di queste tecnologie, seppur non ancora competitive con quelle sottrattive in termini di produzioni su larga scala, è dato dalla possibilità di realizzare geometrie complesse, di ridurre notevolmente il numero di componenti da assemblare, di ridurre potenzialmente i consumi energetici per la produzione di componenti e di abbattere la quantità di materiale di scarto e di lavorazione.

Le Linee di Attività 4.7-4.8-4.9 prevedono dunque lo studio dell'utilizzo di tecnologie additive per la realizzazione di scambiatori di calore.

L'applicazione degli scambiatori di calore è molteplice: condizionamento di ambienti, recupero di calore, produzione di energia, processi chimici, in caldaie e condensatori in impianti vapore, condensatori e evaporatori in unità refrigeranti, in generale nei processi di riscaldamento e raffreddamento [13]. Per le diverse applicazioni sono presenti diversi tipi di scambiatori.

Lo scambiatore di calore ideale permette di scambiare la massima quantità di calore possibile con le minori perdite di carico, ovvero il minor consumo di energia necessario alla circolazione dei fluidi all'interno dello scambiatore. Lo scambio di calore può essere implementato da una parte mediante l'utilizzo di un materiale opportuno e dall'altro mediante una opportuna geometria.

E' possibile classificare gli scambiatori di calore secondo la classificazione riportata in [14], basata su:

- Tipologia Costruttiva:
 - o a fascio tubiero (doppio tubo, parete e tubo, serpentina);
 - o a piastre (con guarnizioni, saldobrasati, saldati, con serpentina a pannello, con lamelle, a spirale);
 - o a superficie estesa (tubi alettati, piastre alettate)
 - o rigeneratori (matrice fissa, a matrice rotante)
- Processo di trasferimento del calore:

Alcune tipologie di scambiatori permettono il miscelamento di correnti fluide calde e fredde negli scambiatori (scambiatori a contatto diretto). Un esempio sono le torri di raffreddamento dove l'acqua è raffreddata attraverso il contatto diretto con l'aria. In quelli a contatto indiretto le correnti fluide sono separate e lo scambio di calore avviene attraverso una parete.
- Compattezza della superficie:

La compattezza assume particolare importanza nel caso di restrizioni di peso e dimensione. In questo caso si considera il parametro densità di area superficiale, pari al rapporto tra l'area totale utile per lo scambio termico e il volume dello scambiatore. Scambiatori di tipo compatto hanno valori di densità di area maggiore di $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$.
- Direzione dei flussi e profilo termico

La direzione dei flussi dei fluidi utilizzati all'interno degli scambiatori può essere equicorrente, controcorrente o incrociata. In genere i modelli in controcorrente hanno un'efficienza maggiore rispetto agli altri e presentano minori sollecitazioni termiche
- Fasi dei fluidi
 - o Gas-liquido
 - o Liquido-liquido
 - o Gas-gas
- Meccanismo di trasporto del calore
 - o condensatori
 - o evaporatori
 - o scambiatori senza cambiamento di fase

Esistono anche altre tipologie di scambiatori, quali quelli per la microfluidica e scambiatori con circuiti stampati.

Nel seguito vengono riportati brevemente i meccanismi di trasferimento del calore negli scambiatori. I principali fenomeni di trasporto del calore sono la conduzione, che avviene attraverso i setti separatori tra i fluidi, e la convezione. L'irraggiamento invece è trascurabile, per temperature non elevate, essendo questo contributo dipendente dalla temperatura.

Conduzione

L'energia viene trasferita attraverso pareti solide.

La legge di Fourier descrive la quantità di calore trasferita nel tempo per conduzione:

$$\dot{Q} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

dove A = superficie di scambio (m^2); k = conducibilità termica del materiale (W/mK); dT/dx è il gradiente termico attraverso il mezzo di separazione tra la zona calda e la zona fredda.

Un aumento della conducibilità termica, della superficie o del gradiente termico permette un aumento della quantità di calore scambiata

Nel caso di conduzione di calore attraverso una parete da un fluido a un altro (Figura 3) si ha:

$$q = UA(t_1 - t_2) = Ah_a(t_a - t_1) = \frac{kA}{x}(t_1 - t_2) = Ah_b(t_2 - t_b)$$

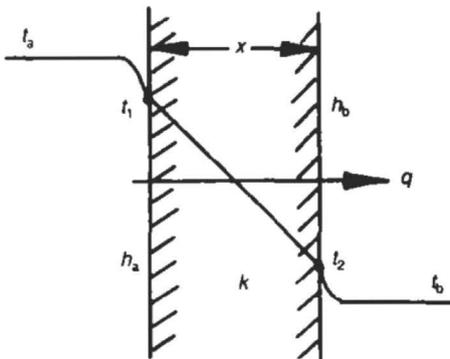


Figura 3: trasporto del calore attraverso una parete

Dove $R = \frac{x}{kA} = \frac{1}{UA}$ è chiamata Resistenza Termica mentre $U = \frac{k}{x}$ è il coefficiente globale di scambio termico; A è la superficie di scambio; x lo spessore della parete, t_a e t_b rispettivamente la temperatura del fluido caldo e quello del fluido freddo, mentre t_1 e t_2 sono le temperature delle pareti a contatto con i fluidi; k è la conducibilità termica del materiale. Il coefficiente globale di scambio U è dato da:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_a} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_b}}$$

$$q = UA(t_a - t_b)$$

$$R = \frac{1}{h_a A} + \frac{x}{kA} + \frac{1}{h_b A} = R_a + R_b + R$$

Quindi la resistenza termica aumenta con l'aumentare dello spessore dei canali, e si riduce con l'aumentare della conducibilità termica, dei coefficienti di scambio lato caldo e lato freddo e della superficie di scambio.

Nel caso di sistemi alettati, in uso quando lo scambio termico su un lato dello scambiatore è molto minore che sull'altro, la presenza delle alette innalza il coefficiente di scambio complessivo in modo dipendente dalla forma dell'aletta stessa. La maggior efficienza, che viene rappresentata in un grafico in funzione del parametro $\sqrt{\frac{hL^3}{kA}}$ (dove h è coefficiente di scambio, L lunghezza dell'aletta, k la conducibilità termica, A area della sezione dell'aletta). L'efficienza migliora passando da alette rettangolari, a paraboliche (convesse), a triangolari, a paraboliche (concave).

Convezione

La convezione può essere di tipo naturale, quando il movimento dei fluidi è causato da differenze di densità causate a loro volta da differenze di temperatura, o di tipo forzato, nel quale il movimento dei fluidi dipende interamente o in parte da cause esterne (ad esempio un sistema di pompaggio). Una descrizione approfondita del fenomeno della convezione esula dal presente rapporto, ma nel seguito verrà descritta la procedura per valutare il coefficiente globale di scambio che considera i principali parametri del fenomeno della convezione.

Irraggiamento

L'energia viene trasferita attraverso la radiazione elettromagnetica. L'energia emessa da un corpo caldo è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta.

Nel caso di un corpo caldo che irraggia intorno a se si ha:

$$q = \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) A_1$$

dove q = flusso di calore irraggiato (W), σ = Costante di Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{J}{m^2 s K^4}$; ε = emissività del corpo (numero adimensionale); T_1 = temperatura del corpo radiante (K), T_2 = temperatura intorno al corpo (K) e A_1 = area del corpo radiante (m^2)

Nel caso di piastre parallele con valori di emissività ε_1 e ε_2 , superfici uguali A e temperature T_1 e T_2 si ha:

$$q = \frac{A \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Si può quindi considerare trascurabile il contributo per irraggiamento nel caso degli scambiatori di calore compatti, perché le temperature T_1 e T_2 differiscono per non più di qualche decina di gradi e le superfici sono ridotte.

Le tecnologie per la realizzazione di scambiatori di calore sono diverse e dipendono dalla tipologia di scambiatore, e quindi dalle applicazioni per il quale lo scambiatore è stato realizzato, e dal tipo di materiale utilizzato.

I materiali metallici più utilizzati nello scambio termico sono il rame, l'alluminio, l'acciaio, le leghe di titanio, Inconel e Hastalloy. Il rame è il materiale di uso pratico che presenta la più elevata conducibilità termica, come riportato in Tabella 1 [15], dove sono riportate anche le principali proprietà di diversi materiali utilizzati per la realizzazione di scambiatori di calore.

Tabella 1: proprietà dei materiali (modificata da [16])

Materiale	Densità (x 10 ⁻³ kg/m ³)	Calore Specifico (J/kgK, 0- 100°C)	Conducibilità Termica (W/mK, 20°C)	Carico di snervamento (MPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Coeff. of thermal expansion (x10 ⁶ mm/mm K)	Temperatura di fusione (°C)
AA3003	2.71	921	169	69	179	7.2	629-652
Cu 99.9	8.89	385	391	69	221	5.2	1083
Hastelloy A	8.8	394	17	303	758	3.4	1299-1329
Inconel X	8.25	431-448	12	690-932	1100- 1280	3.8	1393-1427
SS 304	7.92	502	16	207	586	4.4	1399-1454
SS 316	8.08	502	16	276	621	4.9	1371-1399
SS 446	7.47	502	21	345	552	3.2	1399-1482
Titanio	4.51	582	17	517	621	2.6	1691
Ti6Al4V	4.43	610	6.7	830	900	8.6	1604 - 1660

Per confronto vengono riportate di seguito solamente le conducibilità termiche di alcuni elementi e leghe (Tabella 2).

Tabella 2: conducibilità termica di alcuni elementi e leghe

Materiale	Conducibilità termica (W/mK) a 20°C 1 bar
Rame	386
Alluminio	239
Oro	310
Inconel	15
Ferro puro	80
Ghisa	55
AISI 316	16 *
Acciaio al carbonio	50
Acciaio inox	25
Titanio	17 *
Ti ₆ Al ₄ V	7,2 **
Argento	419
Tungsteno	172
Nichel	92
Cromo	67
Ottone (60/40)	96
Molibdeno	143

* fonte: www.matweb.com, ** fonte: www.azom.com

Tra i materiali più utilizzati per la realizzazione di scambiatori di calore ci sono gli acciai inox, quali l'AISI 316, se in ambiente con cloruri, l'AISI 304, per bassi valori di cloruri (fino a massimo 100 ppm, a 25°C), nel caso di acqua salmastra viene spesso utilizzato il titanio. E' da notare come alcuni dei materiali che presentano la maggiore resistenza a corrosione presentano anche una bassa conducibilità termica.

Gli scambiatori a piastre sono comunemente usati al posto di altre tipologie, perché sono particolarmente compatti, modulari, non richiedono molta manutenzione, sono efficienti e permettono di essere utilizzati all'interno di intervalli di temperatura e di pressione molto ampi [17]. Questi scambiatori in genere

vengono realizzati mediante l'assemblaggio di piastre, guarnizioni, telai e ulteriori elementi quali barre di tiraggio e supporti. In genere, in questo tipo di scambiatori, il flusso dei due fluidi si alterna tra le piastre entrando e uscendo dai bocchelli posti alle estremità delle piastre. Il calore viene scambiato attraverso canali adiacenti attraverso le piastre. Diverse sono le geometrie dei canali che sono state studiate e le piastre con configurazione di tipo *chevron* hanno dimostrato essere quelle che permettono di ottenere la maggiore efficienza di scambio termico. La geometria dei canali permette di incrementare la turbolenza dei fluidi e di conseguenza la convezione ottenendo un incremento di trasferimento del calore tra i fluidi. Questo si traduce in maggiore coefficiente di scambio per unità di superficie. La maggiore turbolenza consente anche di avere dei canali più puliti durante il funzionamento dello scambiatore.

Per avere un ordine di grandezza, gli scambiatori di calore a piastre possono presentare portate comprese tra 0.05 kg/s fino a 1400 kg/s, equivalenti, considerando come fluido l'acqua allo stato liquido, in termini di volume da 0,18 m³/h fino a 5000 m³/h [18]. La caduta di pressione all'interno dello scambiatore è dovuta al percorso del fluido nei setti. Maggiore è la turbolenza, maggiore sarà la perdita di carico e di conseguenza maggiori i consumi energetici dei sistemi di pompaggio per il ricircolo dei fluidi. Per avere scambiatori compatti, ma con elevata efficienza, la turbolenza dovrà essere elevata e bisognerà accettare maggiori perdite di carico, e quindi maggiori consumi, in fase di progettazione dell'impianto. Rispetto agli scambiatori di tipo a fascio tubiero (con spessore dei tubi fino a un massimo di 4.2 mm nel caso di tubi con diametro di 19.5 mm), lo spessore delle piastre è molto ridotto, tra 0.6 e 1.2 mm.

In Figura 4 è riportata l'immagine del principio di funzionamento di uno scambiatore a piastre.

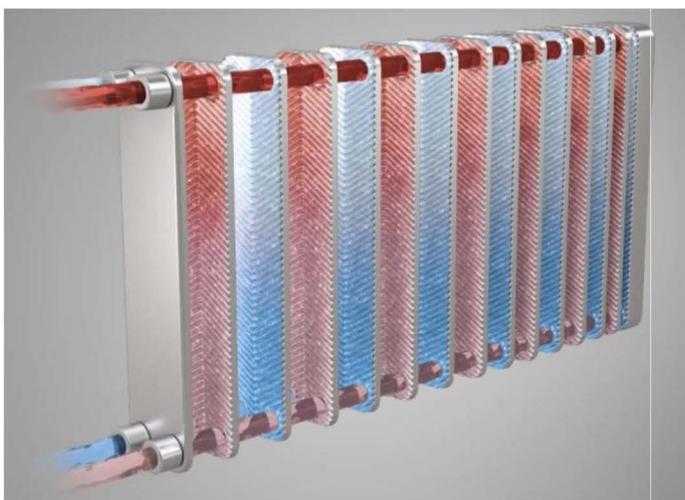


Figura 4: principio di funzionamento di uno scambiatore a piastre (fonte AlfaLaval [18])

Gli scambiatori compatti di tipo a piastre, analoghi a quelli che si intende realizzare all'interno delle attività previste nell'LA4.7-4.8-4.9, possono essere realizzati in diversi modi:

- Assemblaggio di piastre impilate con i canali separati da guarnizioni;
- Assemblaggio di piastre impilate mediante saldobrasatura
- Assemblaggio mediante tecnologia fusion-bonded e diffusion-bonding [19] (Serie AlfaNova, brevetto AlfaLaval; Heatric)

Gli scambiatori con guarnizioni, con gomme butiliche o siliconiche, possono essere ispezionabili per poterli pulire e sono provvisti di tiranti per l'assemblaggio.

Gli scambiatori ottenuti mediante saldobrasatura non presentano guarnizioni di tenuta e non richiedono tiranti. Le piastre vengono saldobrasate, dopo averle assemblate e pressate, mediante un trattamento in forno a temperature dell'ordine dei 1000°C per diverse ore, utilizzando paste saldobrasanti o lamine sottili di nichel o rame. In genere le piastre hanno una corrugazione a spina di pesce (Chevron Plate Heat Exchanger).

In Figura 5 sono riportate alcune immagini di scambiatori che è possibile trovare in commercio [18,20].

Il rame e nichel possono presentare problemi di corrosione in presenza di acqua deionizzata, mentre l'utilizzo di ammoniaca con diversi tenori di acqua causa attacco chimico ad entrambi, con formazione di complessi solubili.



Figura 5: scambiatori di calore ottenuti mediante saldobrasatura [18,20].

Gli scambiatori del tipo “fusion-bonded” sono realizzati mediante una sorta di saldobrasatura di piastre corrugate. Un materiale di riempimento viene messo tra una piastra e l'altra e successivamente le piastre impilate vengono trattate ad alta temperatura in una fornace. Durante il trattamento termico il materiale di riempimento fonde e forma una giunzione tra due piastre adiacenti. Le piastre frontali, di spessore maggiore, consentono di utilizzare lo scambiatore anche a pressioni elevate (>20 bar). Il materiale di riempimento utilizzato per il processo di “fusion-bonding” ha una composizione dichiarata simile all'AISI 316, ma con aggiunte di Si e B per ridurre la temperatura di fusione (circa 1400°C nel caso dell'AISI 316) [21]. La Heatric ha realizzato scambiatori di calore, anche di grandi dimensioni e modulari assemblando mediante “diffusion-bonding” piastre con diverse geometrie [22].

Esistono inoltre una categoria di scambiatori realizzati in materiali polimerici per applicazioni a basse temperature e in ambienti particolarmente corrosivi [23-25].

La conducibilità termica di materiali polimerici è in genere inferiore a 0.5 W/mK, come riportato nella Tabella 3. Sono però riportati in letteratura diversi studi che dimostrano come sia possibile implementare la conducibilità termica dei materiali polimerici mediante l'utilizzo di opportune cariche. Alcuni termoplastici commerciali presentano infatti, oltre a una buona resistenza alla corrosione, valori di conducibilità termica compatibile con quella di alcuni acciai (tra 1 e 25 W/mK), in funzione del materiale di riempimento e della sua frazione in volume. Essendo però dei polimeri carichi presentano delle disomogeneità della conducibilità termica lungo le diverse direzioni essendo ortotropici.

Tabella 3: conducibilità termica di alcuni materiali polimerici [26]

Polimero	Conducibilità termica (W/mK)
LDPE	0.28 – 0.32
HPDE	0.38 – 0.58
Resina epossidica	0.17 – 0.21
Polipropilene	0.18 – 0.24
Resina fenolica	0.24 – 0.29

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 16.3 W/mK) [27]. In un altro caso è stata riportata una conducibilità termica pari a 20.1 W/mK nel caso di un policarbonato, che presenta una conducibilità pari a 0.23 W/mK, con fibre di carbonio [28]. L'interesse negli scambiatori in materiale composito nasce anche dalla loro elevata resistenza alla corrosione oltre che per la bassa densità della matrice [24,25].

In Tabella 4 sono riportate le principali tecniche per la stampa 3D di materiali polimerici. Le tecnologie che maggiormente si prestano per la stampa di materiali compositi a matrice polimerica sono la tecnologia FDM, le tecnologie basate su processi laser e *binder jetting*.

Tabella 4: principali tecniche di stampa di polimeri [29]

Tipologia	Materiale	Materiali polimerici stampabili	Processo	Risoluzione (direzione z, µm)	Vantaggi	Svantaggi
FDM	Filamento	Termoplastici, quali PC, ABS, PLA e nylon	Estrusione e deposizione in fase liquida	50-200	Basso costo, possibile multimateriale	Anisotropia, problemi con gestione ugello
SLA	Foto-polimero liquido	Resine fotoindurenti, quali base epossidica e acrilica	Indurimento indotto da Laser e UV	10	Elevata risoluzione di stampa	
SLS	Polvere	PCL, e poliammide	Sinterizzazione indotta da laser e calore	80	Semplicità nella rimozione della polvere di supporto	
3DP	Polvere	Qualsiasi materiale che può essere fornito come polvere, necessario legante	Stampa mediante gocciolamento del legante dove richiesto	100-250	Basso costo, multimateriale, facile rimozione dei supporti	Intasamento del legante e contaminazioni
3D plotting	Liquido o in pasta	PCL, PLA, Hydrogel	Estrusione in pressione da siringa, indurimento assistito da calore e UV	5-200	Elevata risoluzione di stampa, materiali anche morbidi	Bassa resistenza meccanica, lentezza

Sono riportati in letteratura alcuni esempi di sistemi di scambio di calore realizzati mediante tecnologie additive. In [30] viene descritta la realizzazione di uno scambiatore aria-acqua realizzato mediante FDM. Il lavoro è il risultato di un'intensa attività focalizzata sullo studio di scambiatori di calore in materiali polimerici [31]. In un altro interessante lavoro viene descritta la realizzazione di uno scambiatore di calore aria-acqua in polipropilene ad alta densità mediante una stampante 3D laser [32]. Sono stati realizzati scambiatori di calore in metallo anche con canali di dimensioni estremamente ridotte (sub-millimetriche) per applicazioni nella micro-fluidica [33]. Sono stati inoltre realizzate delle superfici alettate, mediante la tecnica di "cold spray process" [34], per lo studio dei fenomeni di convezione forzata. Questa tecnologia di deposizione permette di realizzare delle geometrie prestabilite ottenute mediante l'invio di un getto di

polvere a velocità supersoniche su un supporto. Le particelle si deformano plasticamente e aderiscono al substrato e agli strati precedenti [35].

In [36] viene discussa la progettazione di un collettore a microcanali per uno scambiatore di calore aria-acqua da realizzare mediante processi laser (DSLIM). Nel lavoro viene dato risalto alle potenzialità dell'utilizzo delle tecnologie additive per la realizzazione di sistemi per lo scambio di calore.

L'Università del Maryland, all'interno di un progetto finanziato dal DOE, e in collaborazione con i laboratori di Oak Ridge e partner industriali, quali 3D Systems, ha realizzato uno scambiatore di calore aria-acqua con geometria ottimizzata mediante stampa 3D. Lo scambiatore può essere utilizzato come evaporatore o condensatore, per sistemi di condizionamento ad aria nel settore commerciale o residenziale o per sistemi a pompa di calore. Secondo quanto riportato dai ricercatori, lo scambiatore, di dimensioni ridotte, può essere utilizzato per potenze fino a 1 kW permettendo un risparmio energetico nei settori del riscaldamento, ventilazione, condizionamento e della refrigerazione. I benefici dichiarati sono un incremento del 20% dell'efficienza dello scambiatore, a parità di potenza, una riduzione delle dimensioni del 20%, una riduzione delle perdite di carico del 20%, una riduzione del volume del 40% [37]. L'azienda HiETA ha cominciato da qualche anno a fornire servizi di progettazione e a realizzare mediante additive manufacturing componenti per applicazioni nel settore energetico tra i quali anche scambiatori di calore [38].

La maggior parte dei risultati sperimentali sull'utilizzo delle tecnologie additive per la realizzazione di scambiatori di calore è incentrata su sistemi aria-acqua o sulla realizzazione di "heat sink" con geometrie complesse [39,40]. Risulta invece carente la letteratura su scambiatori liquido-liquido realizzati mediante queste tecnologie, pur presentando enormi potenzialità [41].

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 per il condizionamento dell'aria a gas naturale e nelle caldaie murali. Come accennato precedentemente lo scambiatore è stato realizzato in passato mediante saldobrasatura di piastre forate impilate.

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

Nel seguito vengono riportate alcune valutazioni preliminari sulla spesa energetica per la produzione dello scambiatore sia mediante saldobrasatura di piastre forate (attuale) sia mediante tecnologie additive.

Lo scambiatore che si intende realizzare ha una dimensione (ingombro) pari a 593 cm^3 e una parte piena (stampabile) pari a 361 cm^3 . Nel caso della saldobrasatura, il processo richiede l'utilizzo di un forno sottovuoto in funzione a circa $1150 - 1205^\circ\text{C}$ (pasta saldobrasante Nicrobraz[®]) per almeno 15 ore, con potenze intorno ai 60 kW. Una delle tecnologie additive che potrebbe potenzialmente essere utilizzata per la stampa di componenti analoghe è l'EBM, che consente di arrivare a velocità di stampa intorno a $80 \text{ cm}^3/\text{ora}$ con potenze nominali intorno a 3 kW. L'EBM, tra le varie tecniche di stampa di metalli, è quella che presenta il consumo di energia specifico (SEC) minore [42].

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 [43]. Però nel caso di processi produttivi che coinvolgono non solo le lavorazioni meccaniche, ma anche trattamenti termici energivori, quali la brasatura, queste considerazioni potrebbero far pendere la bilancia verso i processi di AM.

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 rispetto a quella delle prime macchine in commercio: nel 2002 era pari a 3.6

cm^3/h mentre nel 2009 era pari a $43 \text{ cm}^3/\text{h}$ [44]. E' stato stimato che i sistemi laser con potenze fino a 1500 W possono arrivare a tassi di deposizioni pari a $81 \text{ cm}^3/\text{h}$, nel caso di acciai. Nel 2016 l'azienda SLM Solutions Group ha presentato delle stampanti laser con velocità di deposizione $> 100 \text{ cm}^3/\text{h}$ [45]. Però un aspetto importante da considerare è che più aumenta il tasso di deposizione, maggiore è la potenza del sistema e minore è la finitura superficiale del componente [46].

I dati 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 [47]. Per ottenere dati più affidabili bisognerebbe effettuare una campagna di misure direttamente sulle macchine durante la lavorazione.

Bisogna inoltre considerare che in una stima della spesa energetica per la realizzazione dello scambiatore nel caso della saldobrasatura bisogna prendere in considerazione quella derivante dal pretrattamento delle piastre (decapaggio etc.), taglio e foratura, in genere effettuata mediante macchine CNC, e le fasi di assemblaggio delle piastre, che effettuata in maniera automatizzata, implica un ulteriore costo energetico. In produzione è prevista inoltre una successiva lavorazione meccanica e superficiale dello scambiatore.

A questo punto si possono considerare due aspetti interessanti derivanti dalle possibili applicazioni di questi scambiatori: 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 [48]. Mentre le caldaie di nuova installazione nel 2018 sono pari a 750 mila unità/anno [49]. Ipotizzando la sostituzione dei vecchi sistemi con sistemi nuovi e più efficienti, potenzialmente realizzabili mediante tecnologie additive, è possibile valutare potenziali benefici in termini di risparmio energetico dell'ordine di qualche GWh, correlabile al consumo di famiglie equivalenti dell'ordine della decina di migliaia [50], con relativi benefici economici.

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. Queste macchine necessitano di un sistema di scambio del calore idoneo alle condizioni corrosive del fluido utilizzato (in particolare ammoniaca). Anche per questo tipo di macchine le tecnologie additive potrebbero portare alla realizzazione di idonei scambiatori con geometrie ottimizzate. Il parco condizionatori in Italia è stimato intorno ai 17 milioni di unità con una potenza media frigorifera intorno ai 7 kW [51]. Anche in questo caso è possibile considerare benefici energetici derivanti dalla sostituzione parziale di condizionatori elettrici con macchine ad assorbimento, sulle quali sia installato lo scambiatore realizzato mediante AM. L'impiego delle macchine ad assorbimento consentirebbe anche la non meno importante riduzione della potenza elettrica di picco richiesta nel periodo estivo, causata dall'accensione pressoché simultanea di tutti i condizionatori installati. Le considerazioni fatte fino a questo punto potrebbero essere sottostimate poiché non tengono conto dell'enorme potenzialità delle tecnologie additive che permettono la realizzazione di geometrie complesse studiate sulla base di determinate specifiche tecniche. Bisogna infatti considerare la possibilità di realizzare scambiatori più compatti, a parità di capacità di scambio termico, che porterebbero ad un'ulteriore risparmio energetico. La stampa 3D permette di poter ridurre il volume dello scambiatore, semplicemente modificandone il progetto, anche sulla base di valutazioni basate sul miglioramento del coefficiente di scambio termico e sulla resistenza meccanica. E' possibile ad esempio poter intervenire sullo spessore delle piastre, riducendo la resistenza termica dovuta alla conduzione.

Questo miglioramento potrà tradursi in uno scambiatore ancora più compatto permettendo di ottenere un ulteriore risparmio energetico sulla produzione del singolo scambiatore.

Inoltre la bilancia potrebbe spostarsi ulteriormente a favore del maggiore risparmio energetico, nel caso in cui si arrivasse a velocità di deposizione pari a $1000 \text{ cm}^3/\text{h}$ come riportato in [52] per i sistemi a letto di polvere, e utilizzando l'AM per la produzione di scambiatori in materiale composito. In quest'ultimo caso le velocità di deposizione possono essere molto maggiori rispetto ai metalli (anche superiori ai $100 \text{ cm}^3/\text{h}$ nel caso di processi di tipo laser (SLS) [53,54]) e con minore spesa energetica. Esistono in letteratura numerosi articoli scientifici che riportano un notevole incremento della conducibilità termica dei materiali compositi rispetto alla matrice polimerica.

Particolarmente interessanti sono le tecnologie di tipo ADAM o BMD per la stampa di metalli partendo da precursori compositi possono arrivare a $16 \text{ cm}^3/\text{h}$ con costi energetici inferiori rispetto alle tecniche laser e EBM, ma al quale segue un processo di lavaggio e di sinterizzazione in forno [55]. 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 $12000 \text{ cm}^3/\text{h}$ per macchine industriali di stampa 3D [56]. Le potenzialità di questa tecnica per la produzione di oggetti metallici devono però ancora essere ottimizzate.

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 [57]. 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 [58]. 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 [59].

Nel caso dello scambiatore di calore 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.

Al fine dello svolgimento delle attività del secondo anno, durante il quale è prevista la realizzazione di scambiatori di calore in materiali polimerico, anche al fine di ottimizzarne la geometria, sono stati preparati, mediante l'utilizzo del software Solidworks, dei modelli 3D di un oggetto con geometria particolare che permetta di testare la tenuta, in pressione, sia ai liquidi che ai gas. L'oggetto ha la forma di una bottiglia con spessore delle pareti pari a 1 mm e con la presenza di spigoli vivi.

In Figura 6 è riportato il rendering del componente di prova che è stato realizzato con il supporto dell'azienda CAD Manager Srl.



Figura 6: immagine 3D del campione realizzato per effettuare prove di tenuta

I campioni sono stati realizzati mediante tre stampanti differenti: Polyjet e F170 della Stratasys e Form 3 della Formlabs, con tecnologie rispettivamente 3DP, FDM e SLA (Figura 7).



Figura 7: campioni realizzati per test di tenuta in pressione. Da sinistra a destra i campioni prodotti mediante binder jetting, FDM e SLA.

Sono state effettuate delle prove di tenuta sui tre campioni realizzati per verificarne la tenuta. I campioni realizzati mediante FDM e SLA sono stati testati fino a 1.5 bar, mentre il campione realizzato mediante Polyjet è stato testato fino a 3.5 oltre il quale è avvenuta la rottura del campione. E' stato allestito un semplice set-up sperimentale mediante il quale è possibile immettere aria in pressione nei campioni immersi in acqua, questo consente facilmente di osservare i punti da dove i campioni presentano delle perdite (Figura 8). Dei tre campioni l'unico che ha presentato una minima perdita alla base della filettatura è stato il campione prodotto mediante FDM. Questa modalità di stampa prevede infatti la sovrapposizione di strati fusi di materiale e può presentare quindi dei punti di non perfetta aderenza tra gli strati. E' possibile però, modificando opportunamente la tessitura, ridurre se non eliminare le perdite. Inoltre alcuni trattamenti, quali ad esempio l'esposizione controllata ai vapori di acetone, nel caso di componenti realizzati in ABS, permettono di sigillare eventuali zone fessurate.



Figura 8: prove di tenuta in pressione dei tra campioni realizzati

Sono state inoltre effettuate ulteriori prove di stampa per verificare che fosse possibile mediante la tecnologia di tipo SLA stampare delle geometrie analoghe a quelle dello scambiatore che si intende realizzare. In Figura 9 è riportata l'immagine dell'oggetto stampato mediante SLA.

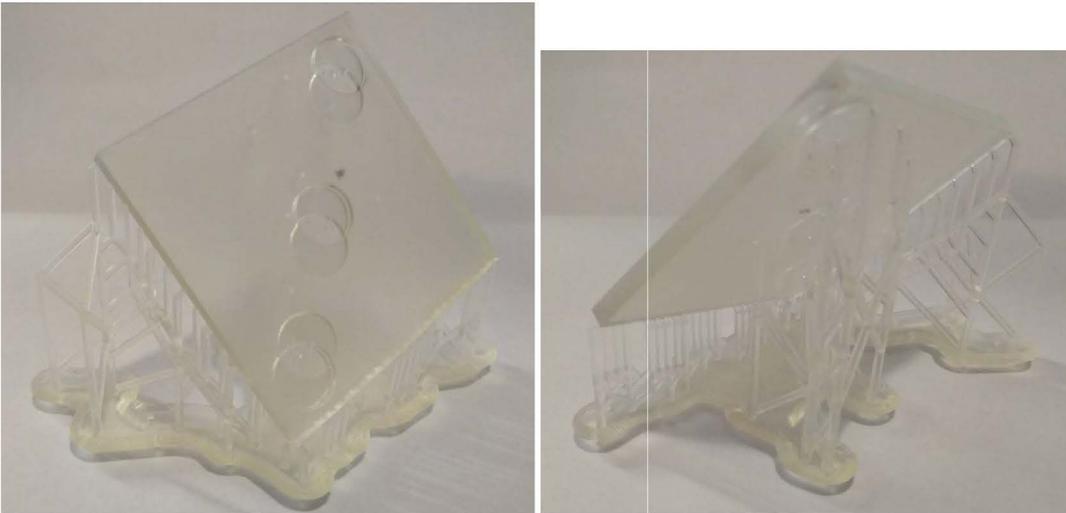


Figura 9: stampa di prova effettuata mediante stampante Formlabs 3 (SLA)

Le tecnologie di stampa 3D presentano tutte una serie di svantaggi. Uno dei problemi principali è la difficoltà a rimuovere la polvere o la resina dagli oggetti stampati. Nel caso della stampa di metalli mediante tecnologie a letto di polvere o a deposizione diretta può risultare difficile rimuovere la polvere dalle zone più interne di un componente. Le tecnologie di stampa di metalli infatti implicano la fusione localizzata del metallo o della lega metallica. Nel caso della stampa mediante fascio di elettroni, EBM, il processo prevede il preriscaldamento del letto a temperature che possono raggiungere temperature anche di 700°C (Figura 10). Il preriscaldamento è necessario durante il processo di deposizione di metalli, ma presenta alcuni svantaggi:

- incremento del tempo totale di durata della stampa e del consumo di energia;
- richiede ulteriore post-processamento per rimuovere le particelle parzialmente sinterizzate (quale ad esempio la sabbiatura);
- in geometrie complesse, la fase di rimozione della polvere, può risultare molto complessa se non impossibile, senza modificare il componente.



Figura 10: fase di preriscaldamento del letto di polvere durante la stampa di un componente in lega di titanio mediante EBM (Arcam A2X)

In Figura 11 è riportata l'immagine di una parte di polvere parzialmente sinterizzata osservata su un campione realizzato mediante EBM che necessita di un processo di sabbiatura per essere rimossa.



Figura 11: polvere sinterizzata su un componente realizzato mediante EBM

La tecnologia EBM utilizza polveri con granulometria maggiore ($40\ \mu\text{m}$) rispetto ai sistemi laser per la stampa di metalli ($20\ \mu\text{m}$), questo rende più semplice la rimozione della polvere da componenti realizzati mediante queste tecnologie e permette di ottenere una maggiore finitura superficiale, a scapito però dei tempi di stampa e della sicurezza legata all'utilizzo delle polveri.

Un altro problema è legato alla necessità di creare dei supporti per permettere la stampa di geometrie che presentano determinate inclinazioni. Sono presenti sul mercato diversi software per effettuare lo "slicing" e per inserire adeguati supporti prima della stampa.

In Figura 12 è riportata l'immagine dell'oggetto stampato mediante SLA, con la stampante Formlabs 3, con i supporti generati in automatico dal software Preform [60].

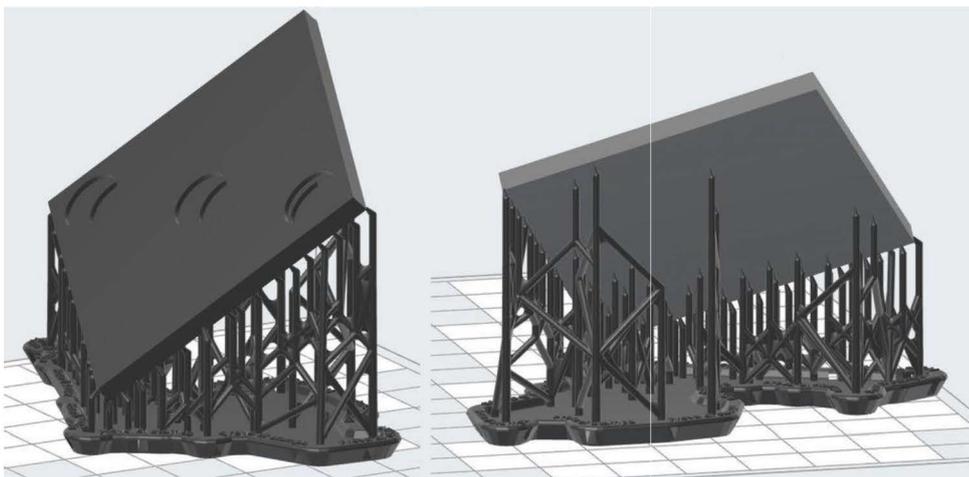


Figura 12: immagine oggetto stampato mediante SLA con i supporti

L'attività ha previsto la preparazione disegno 3D dello scambiatore di calore che è stato precedentemente realizzato mediante saldobrasatura. Per il disegno 3D è stato utilizzato il software Solidworks con il quale è stato anche generato il file *stl*, che contiene il solido con la superficie discretizzata in triangoli, il quale viene utilizzato all'interno dei software utilizzati per lo "slicing" e per la realizzazione dei supporti. Il file così ottenuto, che contiene all'interno i dati necessari per la stampa, può essere inviato alla stampante.

In Figura 13 sono riportate l'immagine 3D dello scambiatore.

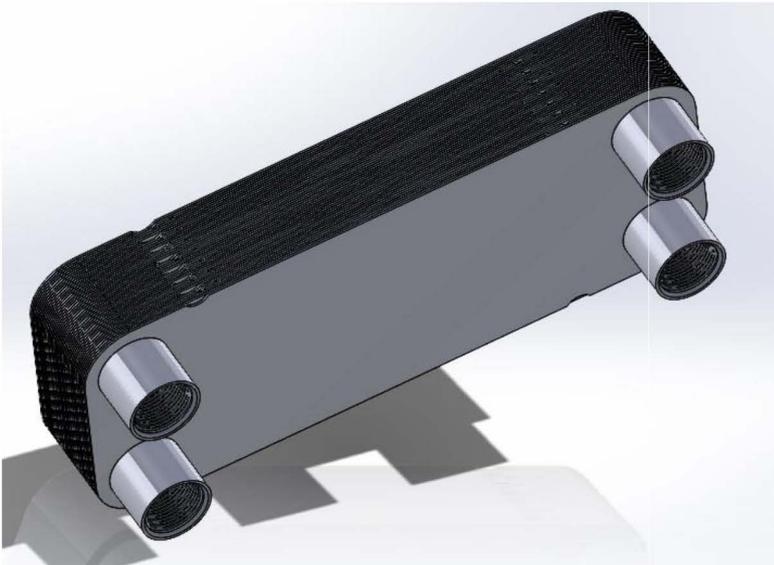


Figura 13: immagine 3D dello scambiatore

In Figura 14 sono riportate le sezioni del percorso dei fluidi lato caldo e lato freddo.

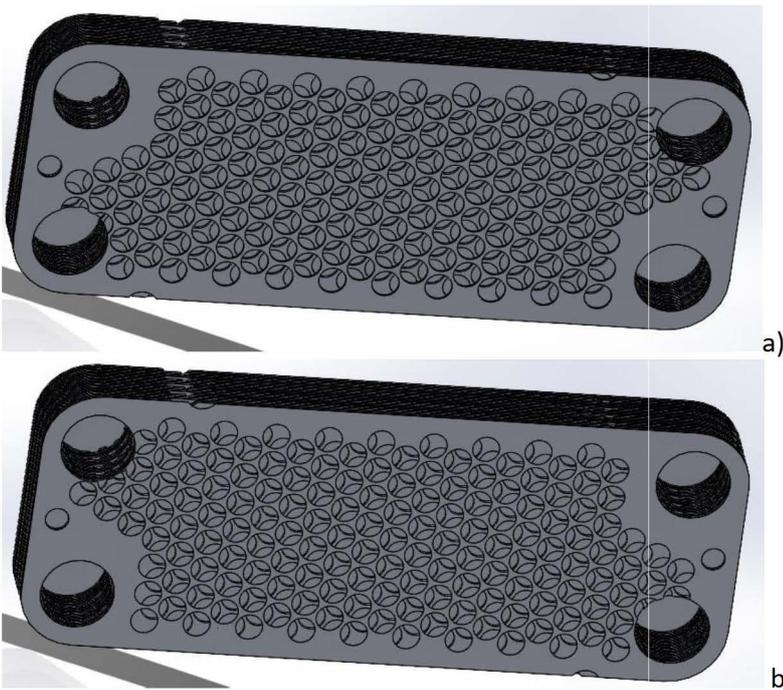


Figura 14: sezioni trasversali del percorso dei fluidi lato caldo e lato freddo

In Figura 15 sono riportate le sezioni trasversali (a) e (b) e longitudinale (c) dello scambiatore, che mostrano l'impacchettamento delle piastre forate. L'alternanza di queste piastre permette di generare un percorso forzato del fluido che da una parte consente di implementare lo scambio termico globale dello scambiatore dall'altra causa un aumento delle perdite di carico.

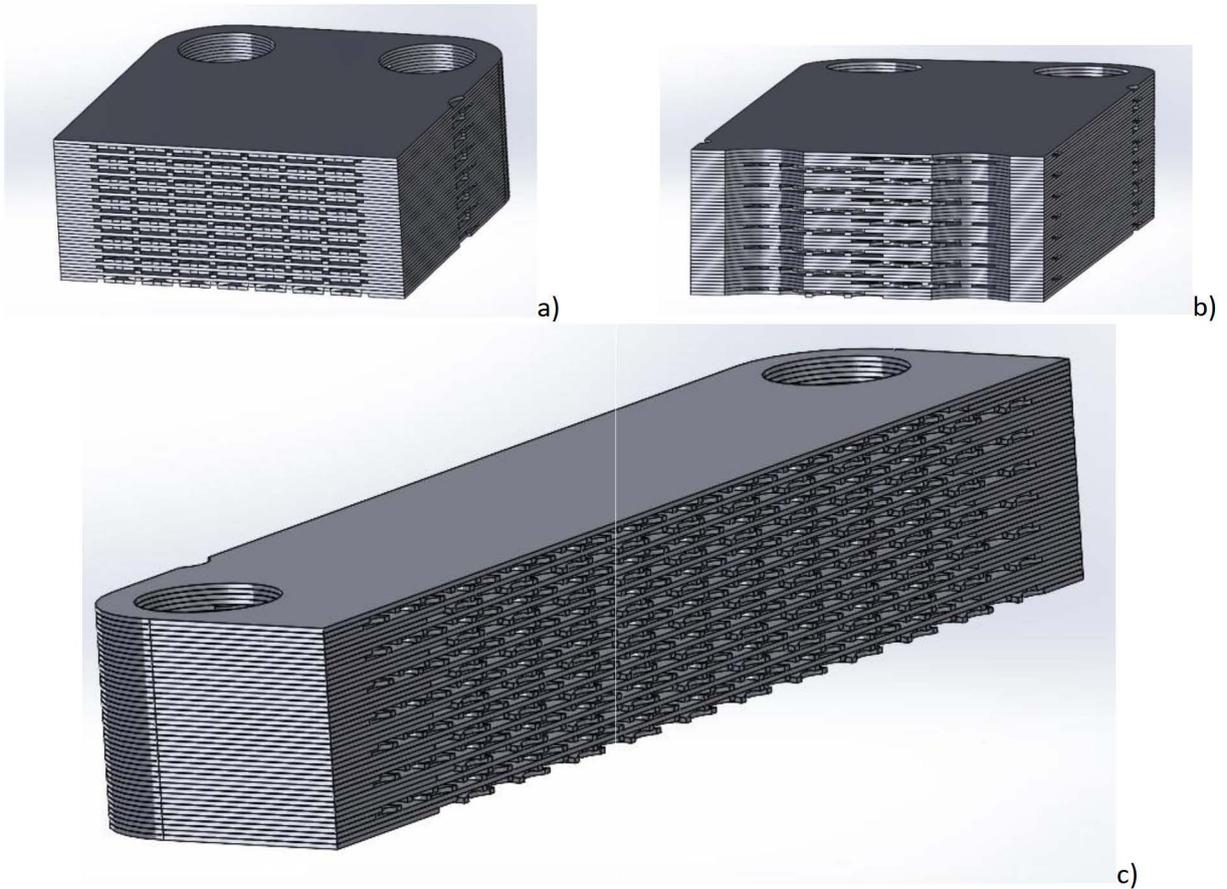


Figura 15: sezioni trasversali (a) e (b) e longitudinali (c) dello scambiatore

In Figura 16 sono visibili i percorsi seguiti dal fluido e la sezione attraversata.

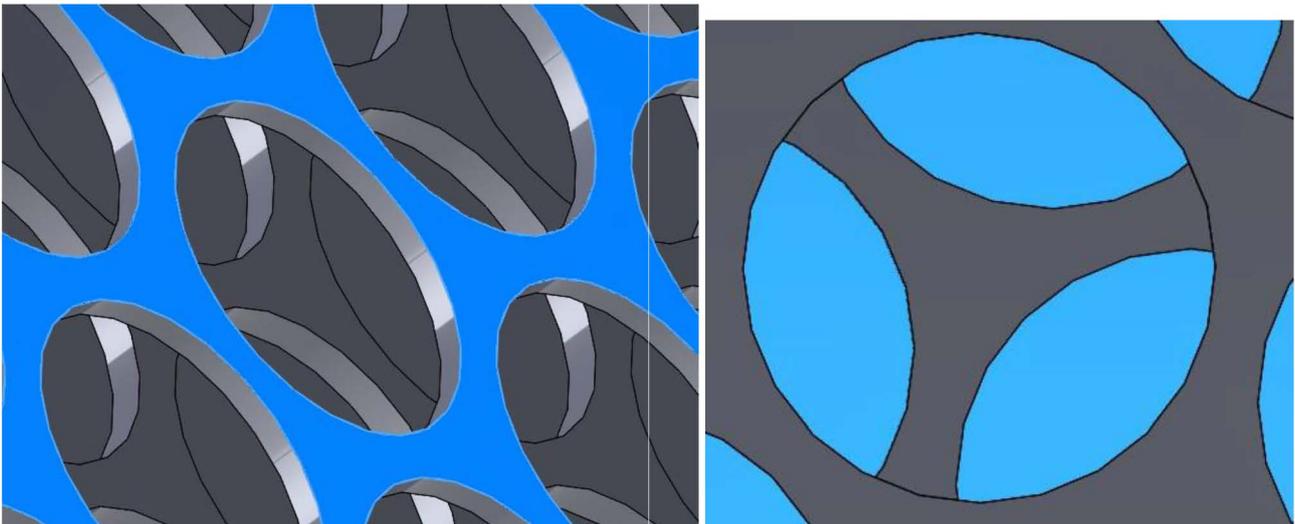


Figura 16: immagine del percorso dei fluidi e della sezione trasversale.

In Figura 17 sono invece visibili i soli percorsi dei fluidi lato caldo e lato freddo all'interno dello scambiatore.

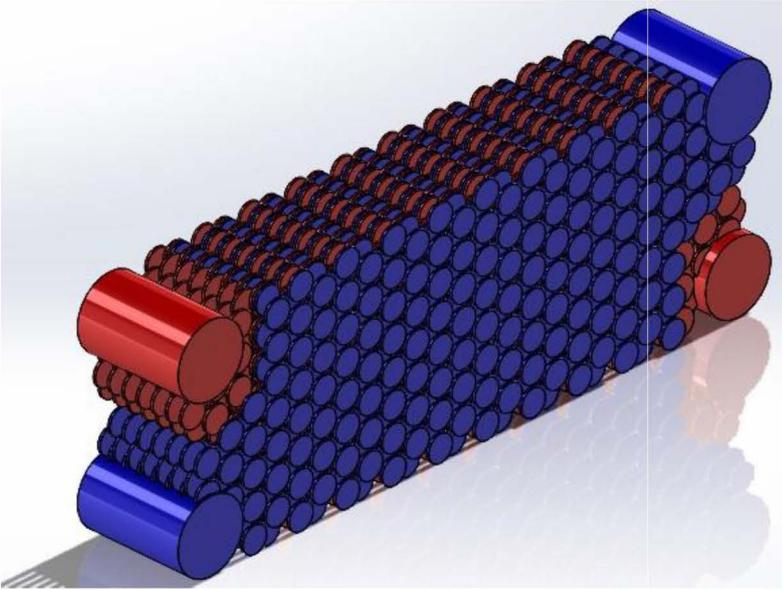


Figura 17: immagine dei percorsi fluidi, lato caldo e lato freddo, all'interno dello scambiatore.

Il volume totale della parte piena dello scambiatore è pari a circa 361 cm^3 (senza bocchelli) a fronte di un ingombro pari a circa 593 cm^3 . Il volume del percorso caldo e del percorso freddo è pari a circa 110 cm^3 . In è riportata l'immagine del percorso dei fluidi, lato caldo (rosso) e lato freddo (blu) ottenuti mediante un'operazione booleana di sottrazione. La superficie del percorso fluido è pari a 1893 cm^2 (considerando però anche il volume di liquido che non partecipa allo scambio termico, ingresso e uscita).

Nella seconda annualità, LA 4.8, verranno realizzati i primi prototipi di scambiatore in materiale polimerico anche al fine dell'ottimizzazione della loro geometria interna. Al fine di valutare l'efficienza di scambio di questi scambiatori e di quelli che verranno realizzati nella terza annualità (LA 4.9) è stato progettato un banco per effettuare le prove sperimentali e per determinare tutti i parametri necessari a definire i principali parametri relativi allo scambio termico e le perdite di carico.

In Figura 18 è riportato lo schema dell'impianto di testing per gli scambiatori che verrà realizzato nella prossima annualità.

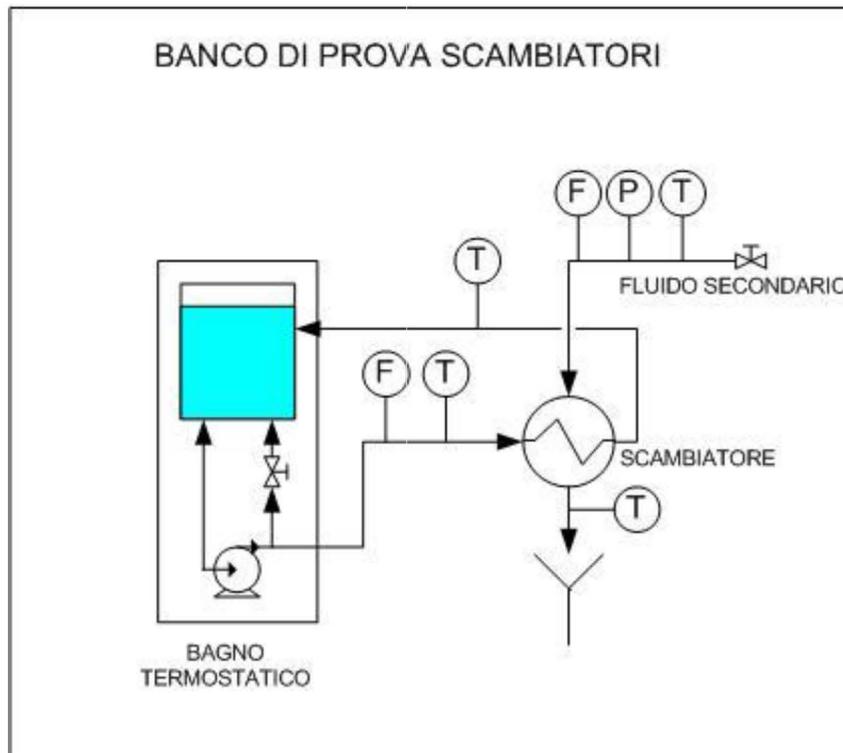


Figura 18: schema di flusso dell'impianto di testing per gli scambiatori
 Legenda: T, termocoppie; F, flussimetro; P, manometro;

Le prove sperimentali verranno effettuate seguendo i passi qui riportati.

Determinazione sperimentale del coefficiente di scambio termico per convezione forzata:

Con riferimento allo schema di Figura 18, il fluido proveniente dal bagno termostatico (acqua con una % di glicole) attraversa uno dei lati dello scambiatore e ne viene letta portata e temperature in ingresso e in uscita.

L' altro lato dello scambiatore viene attraversato da un idoneo fluido secondario, anch'esso misurato in portata e temperature.

Una volta raggiunta la stabilizzazione contemporanea delle grandezze misurate, a meno della precisione voluta, i dati vengono registrati da un sistema di acquisizione computerizzato.

Le temperature medie sui due lati dello scambiatore, saranno in seguito utilizzate per calcolare le proprietà termofisiche dei fluidi impiegati, per la determinazione dei numeri di Reynolds, di Prandtl e di Nusselt.

Determinazione sperimentale delle perdite di carico:

Le prove saranno effettuate variando la portata di acqua di rete sul lato secondario dello scambiatore, nel campo 0-2000 l/h.

Saranno poi ripetute le prove escludendo lo scambiatore, per valutare le perdite di carico spurie dovute alla connessione adottata.

Dalle due serie di dati si otterranno le perdite di carico nette dello scambiatore Δp_n che saranno in seguito interpolate con un polinomio lineare del secondo ordine con termine noto nullo, con Δp_n in mmCa e Q in l/h:

$$1) \quad \Delta p_n = C_0 \cdot Q + C_1 \cdot Q^2$$

Con C_0 e C_1 i due parametri derivanti dalla regressione ai minimi quadrati.

Modelli Rappresentativi:

A) Perdite di Carico

Sulla base delle perdite di carico misurate si è ricavato il coefficiente di attrito f ricavandolo dalla nota formula di Fanning [61]:

$$2) \quad f = \frac{\Delta p}{L} \frac{D_e}{2 \cdot \rho \cdot u^2}$$

Nella 2), Δp è in N/m^2 ; L (m) è la lunghezza della piastra misurata tra i centri dei bocchelli; D_e (m) è il diametro equivalente di passaggio; ρ (kg/m^3) è la densità del fluido che scorre nello scambiatore; u (m/sec) è la velocità del fluido calcolata sulla sezione apparente di passaggio S_a (m^2).

Date: la larghezza utile della piastra L_u (m) calcolata tra le tangenti ai fori esterni delle piastre; la distanza tra le piastre s (m), pari a due volte lo spessore del lamierino della piastra, si ha:

$$3) \quad S_a = L_u \cdot s \cdot N_c$$

$$4) \quad D_e = \frac{4 \cdot S_a}{P_b}$$

dove, N_c è il numero di canali paralleli di passaggio e P_b (m) = $2 \cdot (L_u + s)$ è il perimetro bagnato dal fluido.

I valori di f così ottenuti, vengono interpolati rispetto al numero di Reynolds corrispondente Re , calcolato in base alle grandezze geometriche precedentemente definite ed alle proprietà fisiche del fluido impiegato:

$$5) \quad Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D_e}{\mu}$$

Dove, ρ (kg/m^3) e μ ($kg/m \cdot sec$) sono rispettivamente la densità e la viscosità del fluido di processo impiegato.

Riportando su un grafico in scala logaritmica i valori di f in funzione di Re , per analogia con il moto all'interno di tubi a sezione circolare, si potrà osservare se il moto può essere considerato laminare, oppure turbolento.

Imponendo una forma interpolante del tipo $f = a \cdot Re^b$ [62], si otterranno le formule generalizzate per i vari tipi di moto osservati.

B) Scambio Termico per Convezione Forzata

A partire dai dati sperimentali, si imporrà una legge rappresentativa di tipo classico [61,62]:

$$6) \quad Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^d$$

con:

$$7) \quad Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

Dove Nu è il numero di Nusselt, Pr quello di Prandtl, μ e μ_p sono la viscosità del fluido e quella alla parete della piastra, k ($kW/m \cdot ^\circ C$) è la conducibilità termica del fluido; C_p ($kJ/kg \cdot ^\circ C$) il suo calore specifico.

In seguito verranno calcolati Re ; Pr ; il salto termico logaritmico ΔT_{ML} ($^\circ C$) e la potenza scambiata W (kW), utilizzando le proprietà termofisiche dei fluidi in gioco prese in letteratura [63].

Da ΔT_{ML} e W , si calcola l' U_{ds} ($kW/m^2 \cdot ^\circ C$), il coefficiente di scambio termico globale sperimentale, per mezzo della superficie di scambio complessiva S :

$$8) \quad S = (N_p - 2) \cdot L_u \cdot L$$

Dove N_p è il numero delle piastre.

$$9) \quad U_{ds} = \frac{W}{S \cdot \Delta T_{ML}}$$

I valori sperimentali di U_{ds} così ottenuti sono serviti per avviare una regressione ai minimi quadrati del modello non lineare costituito dal seguente gruppo di relazioni:

$$10) \quad \sum \left(\frac{1}{U_d} - \frac{1}{U_{ds}} \right)^2 = \min$$

$$11) \quad \frac{1}{U_d} = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{sp}{\lambda} \right)$$

$$12) \quad h = \frac{Nu \cdot k}{D_e}$$

Dove per Nu si imporrà la 6); U_d (kW/m² °C) è il coefficiente di scambio globale calcolato; h (kW/m²·°C) è il coefficiente di scambio per convezione sul generico lato dello scambiatore; λ (kW/m·°C) è la conducibilità termica del materiale delle piastre e sp (m) è lo spessore delle piastre.

In realtà la minimizzazione dovrà essere eseguita più volte perché inizialmente non sarà possibile calcolare le temperature di parete e quindi i μ_p .

Nel primo giro il coefficiente d della 6) sarà quindi forzato a zero ($\mu = \mu_p$) per poter avere una prima stima degli h per ogni lato dello scambiatore, in modo da poter calcolare le temperature medie di parete T_p , note le temperature medie \bar{T} ed il carico termico:

$$13) \quad h_i \cdot S \cdot (T_{p_i} - \bar{T}_i) = W \quad (i= 1, 2)$$

Al fine di valutare il comportamento termo-fluidodinamico dello scambiatore è stata messa a punto ed effettuata una simulazione mediante il software COMSOL Multiphysics®. Per ridurre il numero di nodi dell'analisi e di conseguenza il tempo di calcolo, è stato realizzato un modello 3D semplificato dello scambiatore. Questo modello, visibile in Figura 19, presenta solo due canali, uno caldo e uno freddo.



Figura 19: immagine 3D dello scambiatore semplificato con due canali, lato caldo e lato freddo.

Il risultato della simulazione è riportato nelle immagini che seguono. In Figura 20 è riportato il risultato di generazione delle “mesh” tetraedrica non strutturata dei domini solido e liquido. Questa operazione è stata effettuata in maniera tale da ottenere una “mesh” più fine in prossimità delle parti più piccole del sistema.

Il calcolo è stato fatto utilizzando le seguenti condizioni:

- Flussi incrociati in controcorrente;
- Assenza di rugosità;
- Pressione in uscita 4 bar;
- Portata in ingresso lato caldo: 200l/h, corrispondente a $5.76 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$ (Velocità in ingresso=0.15 m/s);
- Temperatura di ingresso lato caldo: 60°C (333.16°K);
- Portata in ingresso lato freddo: 100l/h, corrispondente a $2.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$; (velocità in ingresso=0.0731 m/s);
- Temperatura di ingresso lato freddo: 15°C (288.16°K);
- Condizioni stazionarie (tempo infinito);
- Fluido: acqua;
- Solido: acciaio ferritico AISI 403 rinvenuto a 538°C;
- Isolamento termico del solido e delle uscite liquide.

In Figura 21 è possibile osservare la caduta di temperatura lato caldo e l’incremento di questa sul lato freddo.

In Figura 22 e in Figura 23 sono riportate rispettivamente i valori del modulo della velocità del fluido e della pressione nei canali.

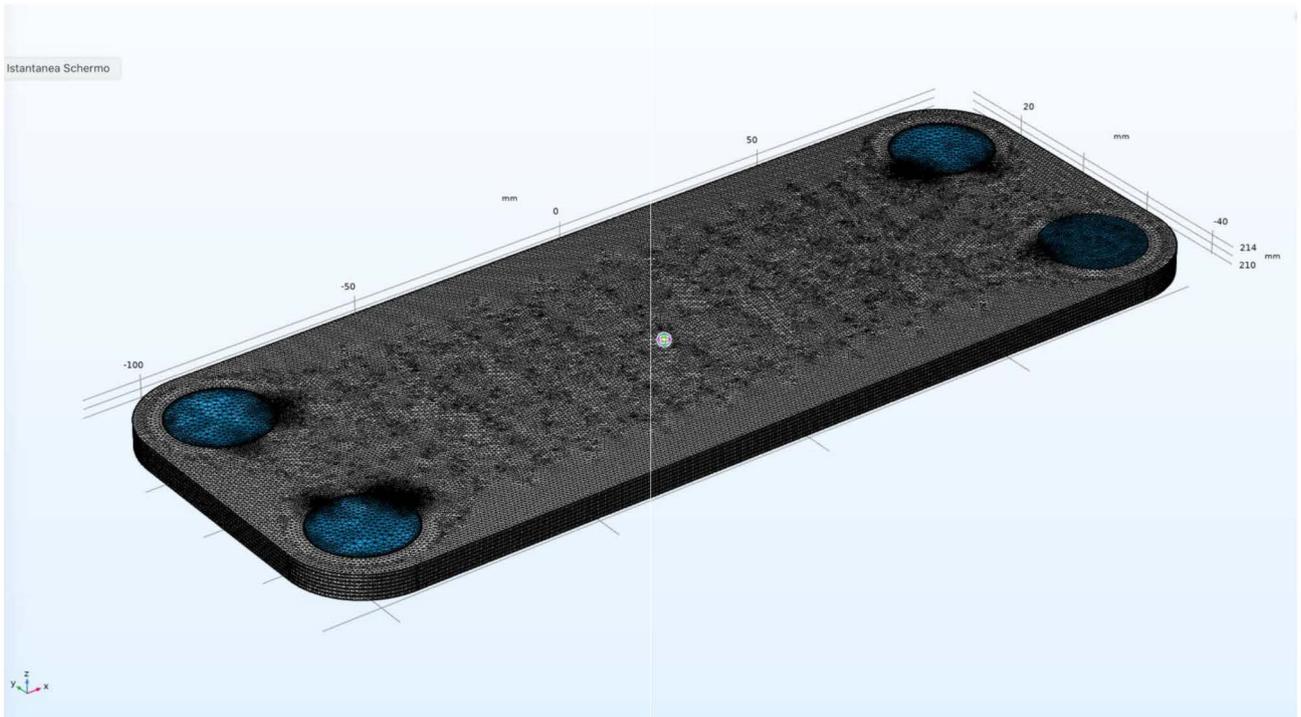


Figura 20: meshatura tetraedrica non strutturata dei domini solido e liquido

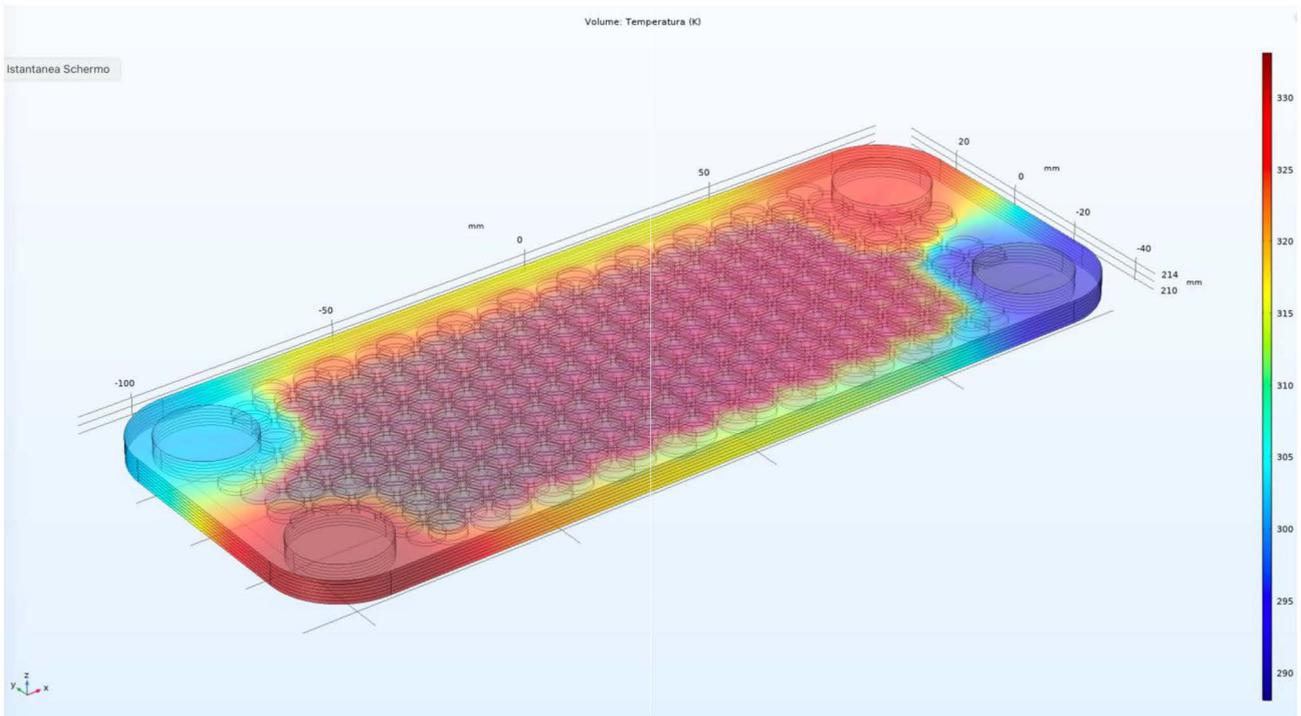


Figura 21: risultato della simulazione termo-fluidodinamica dello scambiatore semplificato. Andamento della temperatura

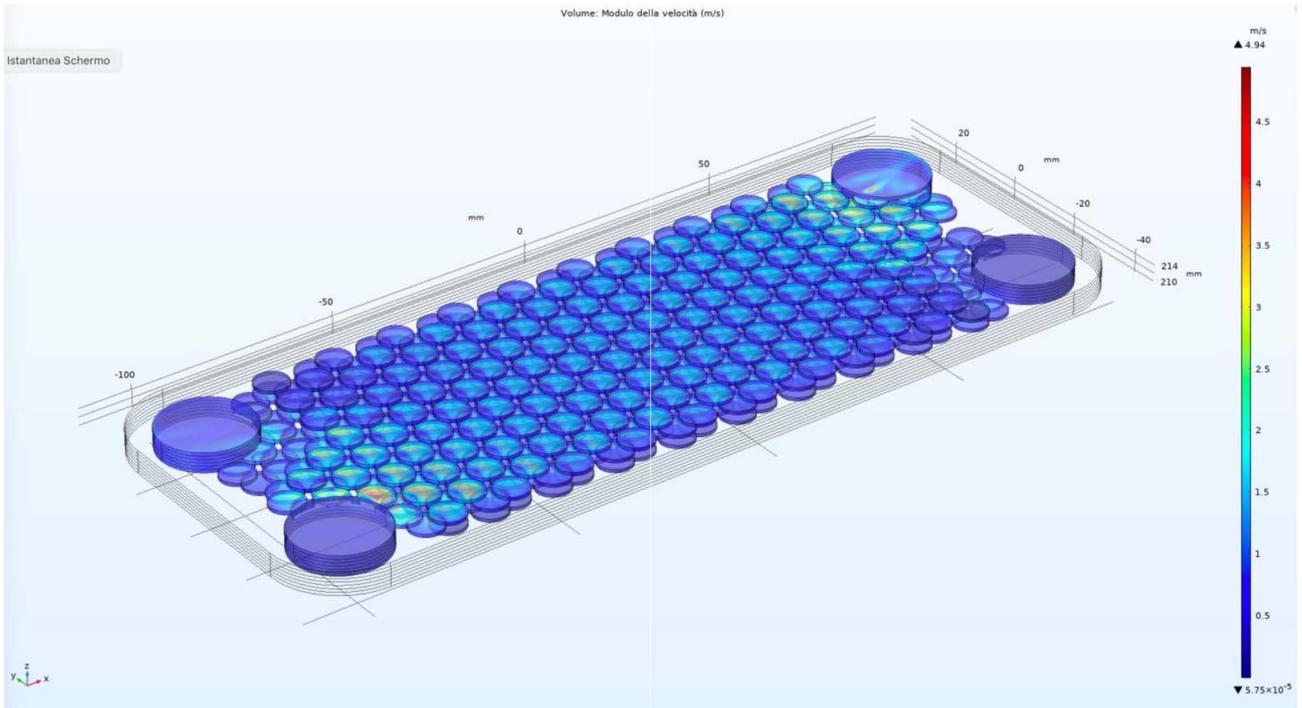


Figura 22: valori del modulo della velocità del fluido

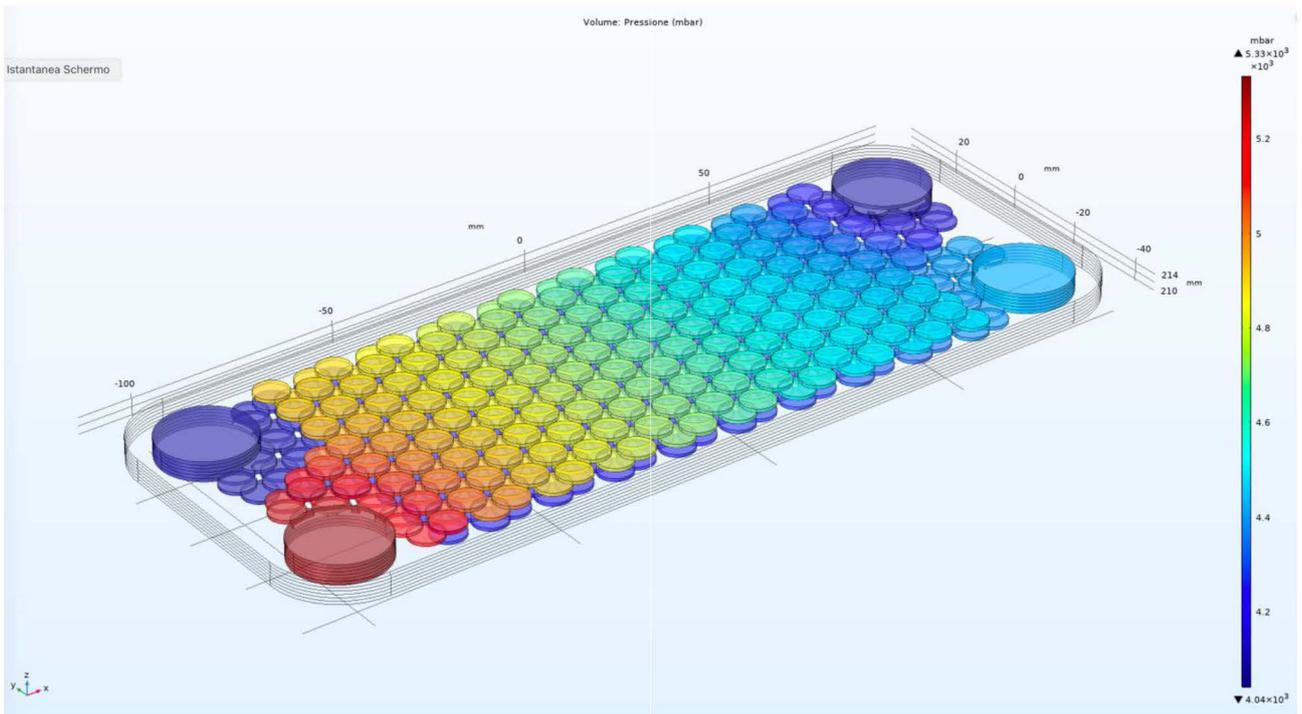


Figura 23: valori di pressione nel fluido

Si può notare che le perdite di carico nel caso ideale di superfici senza rugosità, la perdita di carico del modulo elementare dello scambiatore di calore è circa 1 bar. Poiché lo scambiatore reale è dato dall'impaccamento di un certo numero di scambiatori elementari, collegati dai condotti comuni di entrata/uscita fluido caldo e freddo, si può ragionevolmente pensare che tutti i canali reali lavorano in parallelo e le portate in ingresso vengono equamente ripartite tra i vari scambiatori elementari. Pertanto, la perdita di carico dello scambiatore reale può essere assunta in prima approssimazione analoga a quella dello scambiatore elementare.

Nella successiva annualità si realizzerà la versione semplificata dello scambiatore e verranno confrontati i risultati ottenuti mediante simulazione termo-fluidodinamica. L'obiettivo è quello di modificare se necessario la geometria dello scambiatore, anche in base alle esigenze richieste dai processi di stampa 3D sia per polimeri che per metalli, e di verificare mediante simulazione termo-fluidodinamica l'efficienza dello scambiatore in funzione della sua geometria a parità di condizioni al contorno. Una volta ottimizzata la geometria dello scambiatore si passerà alla fase di stampa e verranno effettuate le verifiche sperimentali sul banco prova per studiarne il comportamento reale.

3 Conclusioni

L'attività delle LA4.7-4.8-4.9 prevedono lo studio e la realizzazione di scambiatori di tipo compatto mediante tecnologie di stampa 3D. L'attività si genera a partire dall'esperienze maturate in passato in ENEA, finalizzate a realizzare dei prototipi di impianti refrigeranti basati su macchine ad assorbimento con cicli acqua/ammoniaca. Tra gli elementi più importanti di queste macchine, oltre alla pompa di ricircolo, ci sono proprio gli scambiatori di calore. Inoltre alla base dell'attività c'è l'idea di valutare la possibilità di utilizzare le tecnologie additive per la realizzazione di scambiatori sia in materiale polimerico che metallico. Sono stati quindi valutati gli aspetti principali collegati agli scambiatori di calore, in particolare quelli compatti, e le metodologie costruttive tradizionali, evidenziandone le criticità. Sono state inoltre descritte le tecnologie di stampa 3D per polimeri e per metalli che potrebbero essere utilizzate per la realizzazione di scambiatori. Gli scambiatori di calore in materiale polimerico verranno utilizzati al fine di ottimizzare, dove possibile, la geometria interna e valutare la realizzabilità mediante tecnologie additive. Al fine di valutare quale tecnologia utilizzare per realizzare degli scambiatori di calore in materiale polimerico sono stati realizzati alcuni campioni e testati per valutarne la tenuta, anche in pressione. Tra le varie tecnologie sono state testate quelle "binder jetting", FDM e SLA. La tecnologia FDM presenta delle criticità, intrinseche nella metodologia di deposizione, legate alle perdite presenti in punti di discontinuità delle geometrie. Le tecnologie "Binder Jetting" e SLA ha permesso di ottenere un campione di prova che, nell'intervallo di pressioni delle prove sperimentali, non presenta perdite. Per la stampa 3D di uno scambiatore analogo a quello realizzato in precedenza mediante saldobrasatura è stato creato il progetto dello scambiatore ed è stato generato il file *stl* che verrà utilizzato nei successivi processi di elaborazione: creazione dei supporti e slicing. Nella seconda annualità verrà realizzato un banco di prova degli scambiatori del quale è stato qui riportato lo schema realizzativo e la procedura che verrà seguita per la misura dei parametri termo-fluidodinamici.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] <https://cordis.europa.eu/project/id/JOU20092/it>
- [2] <https://www.techno-system.it/it/prodotti/idcat:38/>
- [3] <https://www.wallcolmonoy.com/products-capabilities/brazing-alloys/>
- [4] Brevetto RM95A000048, Scambiatore di Calore a di Materia a Piastre Piane, Giacometti P. et Al., N° ENEA 375.1
- [5] Brevetto TO95A001022, Dispositivo per lo Scambio di Materia, Meloni S., N° ENEA 383
- [6] Brevetto TO95A001023, Dispositivo per lo Scambio di Calore e/o Materia, Giacometti P., N° ENEA 384
- [7] Brevetto TO95A001024, Dispositivo per lo Scambio di Calore e/o Materia, Meloni S.
- [8] G. Corallo, "Qualificazione Preliminare di uno Scambiatore di Calore Innovativo a Piastre Saldobrasate", Comunicazione Privata, Marzo 2000
- [9] G. Celata; G. Corallo, "A New Plate Heat Exchanger for Water-Ammonia Absorption Machines ", International Symposium on Compact Heat Exchangers, Grenoble, august 18 – 23, 2002
- [10] <https://www.alfalaval.it/prodotti/scambio-termico/scambiatori-di-calore/scambiatori-di-calore-a-piastre-con-tecnologia-a-fusione-bonding/alfanova/>
- [11] G. Corallo, "Water-Ammonia Absorption Cycles for Solar Cooling and Heating Applications, ISHPC11, Padova 6-8/04/2011

- [12] 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
- [13] Incropera F. P., Dewitt D. P. , Introduction to Heat Transfer, New York, Wiley, 1996
- [14] Heat exchanger design handbook, 2nd edition 2015
- [15] J. Carvill, Mechanical Engineer's data handbook, Butterworth-Heinemann, 2003
- [16] Shah, R.K., 2006, "Advances in Science and Technology of Compact Heat Exchangers," Heat Transfer Engineering, Vol. 27, No. 5, pp. 3-12
- [17] Wang L., Sunden B., "Optimal design of plate heat exchangers with and without pressure drop specifications", Applied Thermal Engineering vol. 23, pp. 295 – 311, 2003
- [18] www.alfalaval.com
- [19] Nicholas M.G. Joining processes: Introduction to Brazing and Diffusion Bonding, Kluwer Academic, 1998
- [20] www.onda-it.com
- [21] environmental-product-declaration_PCT00135EN.pdf, www.alfalaval.com
- [22] D. Southall, Diffusion Bonding in Compact Heat Exchangers, Proceedings of ICAPP '09 Tokyo, Japan, May 10-14, 2009 Paper 9069
- [23] J. G. Cevallos , A. E. Bergles , A. Bar-Cohen , P. Rodgers, S. K. Gupta (2012) Polymer Heat Exchangers—History, Opportunities, and Challenges, Heat Transfer Engineering, 33:13, 1075-1093
- [24] 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
- [25] 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
- [26] Takezawa, M. Akatsuka, and C. Farren, "High thermal conductive epoxy resins with controlled high order structure," Proc. 7th Intern. Confer. Prop. Appl. Diel. Materials, vol. 3, pp. 1146-1149, 2003
- [27] 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
- [28] Weber, E.H., Clingerman, M.L., King, J.A., 2003. Thermally conductive nylon 6.6 and polycarbonate based resins. I. synergistic effects of carbon fillers. Journal of Applied Polymer Science 88, 112–122
- [29] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui, 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective, Composites Part B 110 (2017) 442-458
- [30] J. G. Cevallos, Thermal and manufacturing design of polymer composite heat exchangers, PhD thesis, University of Maryland, College Park, MD, 2014
- [31] A. Bar-Cohen, P. Rodgers, J.G. Cevallos, Application of thermally enhanced thermoplastics to seawater-cooled liquid-liquid heat exchangers, Proceedings 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, 2008
- [32] M.A. Arie, A.H. Shooshtari, R. Tiwari, S. V. Dessiatoun, M.I M. Ohadi, J. M. Pearce. Experimental Characterization of Heat Transfer in an Additively Manufactured Polymer Heat Exchanger. Applied Thermal Engineering. 113, pp. 575–584 (2017)
- [33] S. Tsopanos, C. Sutcliffe, and I. Owen, The manufacture of micro cross-flow heat exchangers by selective laser melting, Proceedings of ECI: Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra Compact Heat Exchangers, Hoboken, NJ, 2005, 410-417
- [34] E. Irissou, J.-G. Legoux, A.N. Ryabinin, B. Jodoin, C. Moreau, Review on cold spray process and technology: part I-intellectual property, J. Therm. Spray Technol. 17 (4) (2008) 495–516
- [35] Y. Cormier, P. Dupuis, A. Farjam, A. Corbeil, and B. Jodoin, Additive manufacturing of pyramidal pin fins: Height and fin density effects under forced convection, International Journal of Heat and Mass Transfer, 75 (2014), 235–244
- [36] M. A. Arie, A.H. Shooshtari, V. V. Rao, S. V. Dessiatoun, M.M. Ohadi, Air-Side Heat Transfer Enhancement Utilizing Design Optimization and an Additive Manufacturing Technique, Journal of Heat Transfer, Vol. 139 (2017) 031901-1

- [37] D. Bacellar, V. Aute, Z. Huang, R. Radermacher, Design optimization and validation of high-performance heat exchangers using approximation, assisted optimization and additive manufacturing, *Science and Technology for the Built Environment*, 23:6 (2017) 896-911
- [38] <https://www.hieta.biz>
- [39] M. Wong, I. Owen, C. J. Sutcliffe, A. Puri. Convective heat transfer and pressure losses across novel heat sinks fabricated by selective laser melting, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. Jan 15, 52 (2009) 281–288
- [40] M. A. Arie, A. H. Shooshtari, S. V. Dessiatoun, M. M. Ohadi, Performance Characterization of an Additively Manufactured Titanium (Ti64) Heat Exchanger for an Air-Water Cooling Application, *Proceedings HT2016-1059, V002T22A002*; 13 pages
- [41] J. D. Bernardin, K. Ferguson, D. Sattler, S.-J. Kim, The Design, Analysis, and Fabrication of an Additively Manufactured Twisted Tube Heat Exchanger, *Proceedings HT2017-4866, V002T10A002*; 8 pages
- [42] 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)
- [43] T. Gutowski et al., Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing, *Journal of Industrial Ecology*, 21 (2017) S69-79
- [44] Kelbassa I, Wohlers T, Caffrey T (2012) Quo vadis, laser additive manufacturing? *Journal of laser applications* 24(5):050101
- [45] SLM Solutions Group AG. 2016. Selective laser melting machine SLM 500. <https://slm-solutions.com/products/machines/slmr500hl>
- [46] Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *J. of Materi Eng and Perform* 23, 1917–1928 (2014)
- [47] Baumers, 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
- [48] <https://www.adsumitalia.com/2016/01/03/parco-caldaie-italia/>
- [49] https://www.anima.it/kdocs/1950551/Studio-statistico_Assotermica_2018.pdf
- [50] <https://puntienergia.com/guida/consumo-medio-energia-elettrica-famiglia>
- [51] <http://www.ecodallecitta.it/notizie/375919/climatizzatori-700000-nuove-installazioni-in-italia-nel-2012/>
- [52] M. Simons, Additive manufacturing—a revolution in progress? Insights from a multiple case study, *Int J Adv Manuf Technol* 96, 735–749 (2018)
- [53] 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
- [54] 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
- [55] <https://www.desktopmetal.com> e www.markforged.com
- [56] <https://www.desktopmetal.com/products/production/>
- [57] 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
- [58] Bonneau, V.; Yi, H.; Probst, L.; Pedersen, B.; Lonkeu, O.K. *The Disruptive Nature of 3D Printing*; European Commission: Brussels, Belgium, 2017
- [59] 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
- [60] <https://formlabs.com/it/software/>
- [61] W. H. Mc Adams, “Heat Transmission” Mc Graw Hill 1954
- [62] HTFS Design Report AERE-R7814 (rev. 1) ; HTFS DR36, Plate Heat Exchangers, Nov. 1984 (riservato)
- [63] Perry and Chilton *Chemical Engineer’s Handbook* Mc Graw Hill 5th Ed.