



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione di scambiatori di calore mediante AM: testing degli scambiatori di prova e ottimizzazione del progetto

Daniele Mirabile Gattia, Giuseppe Corallo, Luciano Pilloni

Report RdS/PTR(2020)/285

REALIZZAZIONE DI SCAMBIATORI DI CALORE MEDIANTE AM: TESTING DEGLI SCAMBIATORI DI PROVA E OTTIMIZZAZIONE DEL PROGETTO

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

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Materiali di frontiera per usi energetici

Work package: WP4 - Realizzazioni sperimentali di componenti Additive Manufacturing, a favore delle industrie dei componenti metallici

Linea di attività: LA 4.8 - Realizzazione di uno scambiatore di calore: testing dello scambiatore di prova e ottimizzazione del progetto

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	6
2.1 REALIZZAZIONE DEL BANCO PROVA SCAMBIATORI.....	6
2.2 STAMPA DI SCAMBIATORI IN MATERIALE POLIMERICO E MISURE SPERIMENTALI	10
3 CONCLUSIONI.....	25
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	26

Sommario

Nella prima annualità è stata introdotta la possibilità di realizzare scambiatori di calore mediante tecnologie di stampa 3D, ad integrazione di quelle tradizionali sottrattive. Partendo dagli studi pregressi condotti da ENEA sulle macchine ad assorbimento per la realizzazione di sistemi di condizionamento, è stato ripreso il progetto di uno scambiatore di calore, inizialmente realizzato mediante l'assemblaggio di piastre metalliche pre-forate e successiva saldobrasatura. Questo tipo di scambiatore si era rivelato particolarmente efficiente dal punto di vista dello scambio termico pur presentando delle perdite di carico leggermente superiori rispetto ad uno commerciale di dimensioni analoghe del tipo a piastre corrugate. Lo scambiatore è di tipo a piastre, con flussi in controcorrente incrociati per massimizzare lo scambio termico. L'attività della seconda annualità ha previsto quindi: la realizzazione di questo scambiatore in materiale polimerico in un unico blocco mediante una stampante 3D; il test in condizioni reali di esercizio dello scambiatore; la riprogettazione dello scambiatore sulla base delle necessità introdotte dai processi di stampa 3D. Dopo aver completato la progettazione del banco di prova degli scambiatori e dopo averlo realizzato, sono stati stampati alcuni scambiatori con differenti materiali polimerici, ognuno con peculiari proprietà termiche e meccaniche. In parallelo sono state condotte delle simulazioni termo-fluidodinamiche, ottimizzate rispetto al primo anno, delle diverse geometrie stampabili. Sono stati condotti inoltre numerose prove di stampa anche con diverse tecnologie. Questo ha permesso di individuare le tecnologie che meglio si prestano alla realizzazione di questi sistemi. Gli scambiatori sono stati tutti testati e qualificati per ore nell'intervallo di temperature 20-60 °C e con portate fino a 1500 l/h. Sono state calcolate le perdite di carico e lo scambio termico globale. L'attività ha dimostrato che è possibile realizzare scambiatori di calore compatti, comprensivi degli attacchi filettati, mediante stampa 3D e che questi sono funzionali allo scopo. Anche se non di specifico interesse iniziale, dato che la loro realizzazione serviva unicamente a dimostrarne la stampabilità in 3D, le potenzialità di questi scambiatori in materiali polimerici si sono mostrate particolarmente interessanti per applicazioni con bassi carichi termici e flussi di fluidi particolarmente corrosivi. Inoltre potrebbero diventare estremamente interessanti dal punto di vista tecnologico, per la loro leggerezza e compattezza, a patto di riuscire ad aumentare la conducibilità dei materiali di stampa. L'attività ha previsto quindi l'ottimizzazione del progetto iniziale dello scambiatore che si è concretizzata in uno scambiatore con perdite di carico ridotte rispetto al precedente. Nella terza annualità è prevista la realizzazione di questo scambiatore in lega metallica.

1 Introduzione

Le tecnologie additive hanno avuto negli ultimi anni uno sviluppo enorme, e dopo un primo periodo nel quale sono state utilizzate per la prototipazione di componenti cominciano a trovare applicazione anche per la produzione seriale. Tra i vantaggi di queste tecnologie possono essere citate la possibilità di realizzare delle geometrie complesse, difficili o impossibili da realizzare mediante le tecniche sottrattive o di fonderia, la limitata quantità di materiale di scarto, essendo possibile la realizzazione di componenti near-net-shape, una potenziale riduzione dell'energia di produzione e migliore gestione dei tempi di produzione, vista la possibilità, in alcuni casi di interrompere la stampa e di riprenderla in un altro momento. A fronte di questi vantaggi, le tecnologie additive risentono ancora degli elevati costi di investimento iniziali, del numero limitato di materiali a disposizione, che richiede una sempre più intensa attività di ricerca e sviluppo e della bassa velocità di produzione e in alcuni casi della non completa riproducibilità delle caratteristiche dei prodotti. Diversi autori però riportano come queste tecnologie potranno presto arrivare alla produzione di componenti con un limitato utilizzo di lavorazioni meccaniche e alla produzione di massa di componenti con caratteristiche personalizzate, lì dove l'avvio di una nuova produzione con tecnologie tradizionali potrebbe avere costi troppo elevati [1].

I processi additivi sono rappresentati da un ventaglio di tecnologie, ognuna con le proprie caratteristiche e con i suoi materiali "stampabili". Viste le peculiarità di questi processi una delle applicazioni più interessanti è quella della realizzazione di componenti dove è previsto lo scambio termico, sia per raffreddamento che per riscaldamento. Ad esempio sono stati prodotti stampi, per materiali polimerici, in lega metallica con condotti interni per il raffreddamento. La realizzazione di questi stampi con metodi sottrattivi avrebbe richiesto l'assemblaggio di più componenti per la creazione di canali convoluti all'interno dello stampo. I canali sono stati progettati in maniera tale da ottimizzare la temperatura nello stampo, riducendo del 50% il tempo di raffreddamento e di produzione [2]. La possibilità di realizzare geometrie complesse può essere applicata quindi anche per la realizzazione di scambiatori di calore. In letteratura alcuni autori riportano la realizzazione di scambiatori di calore sia in materiale polimerico che in lega metallica mediante stampa 3D. Gli scambiatori in materiale polimerico possono essere utilizzati in applicazioni dove le temperature non sono elevate in ambienti corrosivi [3,4,5]. Uno degli svantaggi nell'uso dei polimeri è la loro bassa conducibilità termica, in genere inferiore a 0.5 W/mK [6]. La soluzione è realizzare delle pareti di scambio molto sottili, inferiori al millimetro, a scapito però della resistenza meccanica limitando quindi i campi di applicazione. Diversi studi mostrano i tentativi di aumentare la conducibilità termica inserendo all'interno del polimero delle particelle di materiali con elevata conducibilità, in genere metalli. E' stato dimostrato infatti come una matrice di poliammide caricata con particelle di rame può raggiungere valori di conducibilità termica pari a 12 W/mK , prossimi a quelli dell'acciaio inossidabile [7]. La conducibilità termica del polycarbonato è stata incrementata di due ordini di grandezza, da 0.23 a 20.1 W/mK , disperdendo all'interno fibre di carbonio [8].

Sono state effettuate delle prove di realizzazione di scambiatori di calore in materiale polimerico mediante stampanti 3D. Utilizzando una stampante di tipo a filamento fuso, FDM, è stato realizzato uno scambiatore aria-acqua [9]. M.A. Arie e colleghi hanno realizzato in materiale composito, ABS e fibre di Al, uno scambiatore di calore da 350 W gas-liquido, con il gas usato per sottrarre calore al liquido, ottenendo un miglioramento del 220% e del 125 % del flusso di calore dissipato per massa e per volume rispettivamente, rispetto a uno convenzionale di riferimento, e una riduzione delle perdite di carico con uno scambiatore più leggero e con minori costi di produzione [10]. J.H.K. Haertel e colleghi hanno utilizzato l'ottimizzazione topologica per progettare un condensatore raffreddato ad aria da realizzare mediante stampa 3D in materiale polimerico caricato. Gli autori riportano alcuni risultati descrittivi del comportamento termofluidodinamico del condensatore, ottenuti considerando valori di conducibilità del materiale composito pari a 5 W/mK , facendo intendere che questo valore possa essere prossimo a quello effettivo ottenibile mediante dispersione di particelle in polimeri [11].

In un altro lavoro è descritta la realizzazione di uno scambiatore di calore aria-acqua da 100 W di potenza scambiata realizzato mediante ABS. Anche in questo caso gli autori considerano la possibilità di incrementare la conducibilità termica utilizzando filamenti caricati con materiali conduttivi, quali grafite, carbon black, fibre di carbonio particelle metalliche [12]. Un piccolo scambiatore di calore è stato realizzato con stampante SLA per applicazioni nel campo biomedico [13]. I lavori presenti in letteratura mostrano quindi come anche scambiatori in materiale polimerico e composito possano essere interessanti per applicazioni energetiche e come la stampa 3D offra nuove possibilità realizzative. Oltre a quelli già citati sono stati pubblicati diversi lavori che riportano la produzione di scambiatori in lega metallica. In un caso è stato realizzato uno scambiatore in metallo con canali di dimensioni sub-millimetriche per la microfluidica [14]. Diversi lavori descrivono la stampa di sistemi aria-acqua o di "heat sink" con geometrie ottimizzate [15,16], mentre non sono molti quelli che descrivono gli scambiatori liquido-liquido realizzati mediante AM, risultando, nonostante le enormi potenzialità, la letteratura carente [17].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Realizzazione del banco prova scambiatori

In vista delle prove sperimentali per qualificare gli scambiatori realizzati con stampa 3D, è stato allestito un banco di prova apposito per registrare tutte le variabili primitive e derivate coinvolte, secondo lo schema di Figura 1.

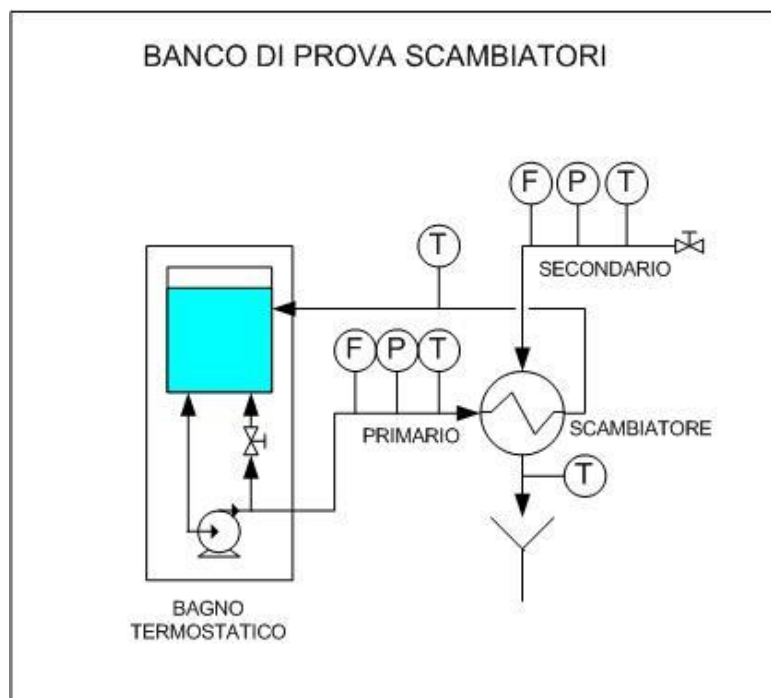


Figura 1: schema banco di prova scambiatori

Per la realizzazione del banco di prova per il testing degli scambiatori è stato acquisito un bagno termostatico a circolazione tipo LAUDA mod. VC5000. Tale apparecchiatura è caratterizzata da una stabilità termica di 0.05 °C e presenta una potenza 4.5 kW in riscaldamento e 5 kW in raffreddamento (Figura 2).

Dato che può lavorare nel campo di temperatura -20 / +80°C, è stato riempito con una soluzione di acqua-Glicole Etilenico al 50 % in peso, ed è stato impiegato per realizzare il flusso primario verso lo scambiatore da provare. Il volume massimo di liquido all'interno della vasca è pari a 33 litri, mentre la pressione della pompa e la portata sono pari rispettivamente a 3.2 bar e 27 l/min.



Figura 2: immagine del refrigeratore di circolazione con potenza di 4.5 kW in riscaldamento e 5 kW in raffreddamento

Per Il flusso secondario degli scambiatori in prova è stata invece utilizzata acqua di rete, che si trova normalmente ad una temperatura che oscilla tra i 15 e i 18 °C.

La tipologia dei sensori scelti per misurare le grandezze primitive, temperature **T** portate **F** e pressioni **P**, è stata selezionata in base a criteri di affidabilità e precisione sulla scorta di passate esperienze di laboratorio simili.

Sono stati acquisiti quindi:

- n° 4 sensori di temperatura Pt100 a 4 fili, mod. RS PRO, tarati nel campo 0-100 °C, con precisione < 0.1 °C per valutare i salti termici sui due lati dello scambiatore.
- n° 2 sensori di flusso tipo magnetico KROHNE OPTIFLUX 5100C, con precisione di lettura 0.3.% del valore letto, per misurare le portate che scorrono nello scambiatore (Figura 3).
- n° 2 misuratori di pressione di tipo resistivo, mod. RS PRO DIN 43650 C da 1 Barg di fondo scala e precisione pari a 0.25% f.s., per valutare le perdite di carico.



Figura 3: immagine del misuratore di portata e del trasduttore di pressione usato per la misura delle perdite di carico

I misuratori di portata di tipo magnetico hanno richiesto l'installazione di opportune flange e di un tratto rettilineo di tubo con diametro da 1". Questa configurazione assicura un corretto flusso del liquido all'interno della sezione ceramica dove sono presenti gli elettrodi e una maggiore accuratezza della misura.

Per registrare i dati sperimentali durante le varie prove da effettuare è stato realizzato un apposito Sistema di Acquisizione Dati, SAD, basato su un datalogger KEYSIGHT mod. DAQ 973A corredato di schede multiplexer mod. DAQM901A, per l'interfacciamento con i sensori analogici e sul software HTBASIC (TransEra) per Windows (Figura 4).

Il datalogger è poi stato a sua volta collegato ad un Personal Computer dotato di scheda GPIB per consentire la trasmissione/memorizzazione dei dati digitalizzati.



Figura 4: immagine del datalogger utilizzato per l'acquisizione dei dati di misura del banco prova scambiatori

Il SAD, una volta impostato il tempo di campionamento ed alcune grandezze geometriche dello scambiatore, Superficie di scambio **S**, Diametro equivalente **D**, Superficie di passaggio **S_a**, acquisisce in modo automatico tutte le grandezze primitive e le elabora per ottenere le seguenti variabili derivate, per entrambi i lati dello scambiatore:

- Densità ρ , kg/m³ (1)
- Viscosità dinamica μ , kg/m sec (1)
- Conducibilità termica **K**, W/m °C (1)
- Calore specifico **C_p**, kJ/kg °C (1)
- Velocità **V**, m/sec
- Numero di Reynolds $Re = \rho \cdot V \cdot D / \mu$
- Numero di Prandtl $Pr = C_p \cdot \mu / K$
- Potenza scambiata $P = (T_{out} - T_{int}) \cdot F \cdot \rho \cdot C_p$, kW

Da cui in cascata si possono determinare le due grandezze globali:

- Delta T medio logaritmico ΔT_{ML} , °C
- Coefficiente globale di scambio termico $U_d = P / (S \cdot \Delta T_{ML})$, kW/m² °C

Il set di variabili primitive e derivate così ottenuto insieme all'orario di campionamento, viene memorizzato di continuo in un file di testo denominato dalla data del giorno e dalla sua eventuale ripetizione giornaliera (01May2021_001 May2021_1....) con formato dei valori separato da virgole (CSV).

Le grandezze termo fisiche ρ , μ , **k**, **C_p**, dei fluidi primario e secondario sono state interpolate da tabelle di dati disponibili su varie fonti mediante polinomi interpolatori a due variabili indipendenti (concentrazione di glicole e temperatura) ed inserite in una subroutine del programma di acquisizione dati che viene chiamata automaticamente di volta in volta ad ogni campionamento: il campo di validità di tali polinomi è 0-70°C ; 0-60 % di glicole etilenico in peso.

Le misure vengono effettuate secondo la seguente procedura:

¹ Alla temperatura media tra ingresso ed uscita di ogni lato dello scambiatore

i) inizialmente viene collegata allo scambiatore la linea di un fluido al fine di testare la tenuta dei canali e per effettuare delle misurare delle perdite di carico. Lo scambiatore viene sollecitato in questa configurazione per qualche decina di minuti e si verifica l'assenza di liquido nell'altro canale per verificare l'integrità delle superfici di scambio;

ii) lo scambiatore viene collegato, mediante opportuni raccordi alle tubazioni di mandata e di scarico dei due fluidi. Per rendere omogenei gli attacchi sono stati usati raccordi filettati 1/2 " gas. Sono stati provati diversi tipi di attacchi, sia metallici che polimerici. Per limitare il peso dei raccordi, considerata la strumentazione presente, si è preferito optare per raccordi in PVC.

Inoltre per evitare che gli attacchi sugli scambiatori (stampati) potessero subire sollecitazioni elevate durante il montaggio e lo smontaggio delle tubazioni, sono stati utilizzati dei giunti a 3 pezzi in PVC con o-ring.

Gli scambiatori vengono collegati in maniera tale da avere i flussi in controcorrente, massimizzando lo scambio termico.

iii) una volta collegato lo scambiatore alle linee dei due fluidi, caldo e freddo, vengono effettuate delle prove di tenuta dei giunti. Per eliminare le perdite è stato utilizzato del Teflon intorno alle filettature.

iv) dopo aver verificato l'assenza di perdite è possibile effettuare i test sullo scambiatore. Per prima cosa viene impostata una determinata temperatura sul display del refrigeratore di circolazione e vengono monitorate le grandezze misurate fino alla stabilizzazione per alcuni minuti. Successivamente si passa a un nuovo valore di temperatura. In alcuni casi sono state ripetute le misure modificando i valori della portata.

2.2 Stampa di scambiatori in materiale polimerico e misure sperimentali

Una parte dell'attività del secondo anno è stata dedicata alla scelta della stampante da acquisire per la stampa di scambiatori. Alcuni aspetti sono stati presi in considerazione:

- Tenuta dei liquidi e dei gas;
- Comportamento meccanico;
- Dimensione del piatto di stampa

Sono state per prima cosa effettuate alcune prove, ulteriori rispetto a quelle dell'annualità precedente, per verificare la tenuta di componenti stampate con metodi differenti. E' stato quindi realizzato, in ABS, uno scambiatore di dimensioni nel piano (piastre) analoghe a quelle dello scambiatore realizzato mediante saldobrasatura di piastre forate, ma di altezza minore, con un solo canale caldo e uno freddo (Figura 5).

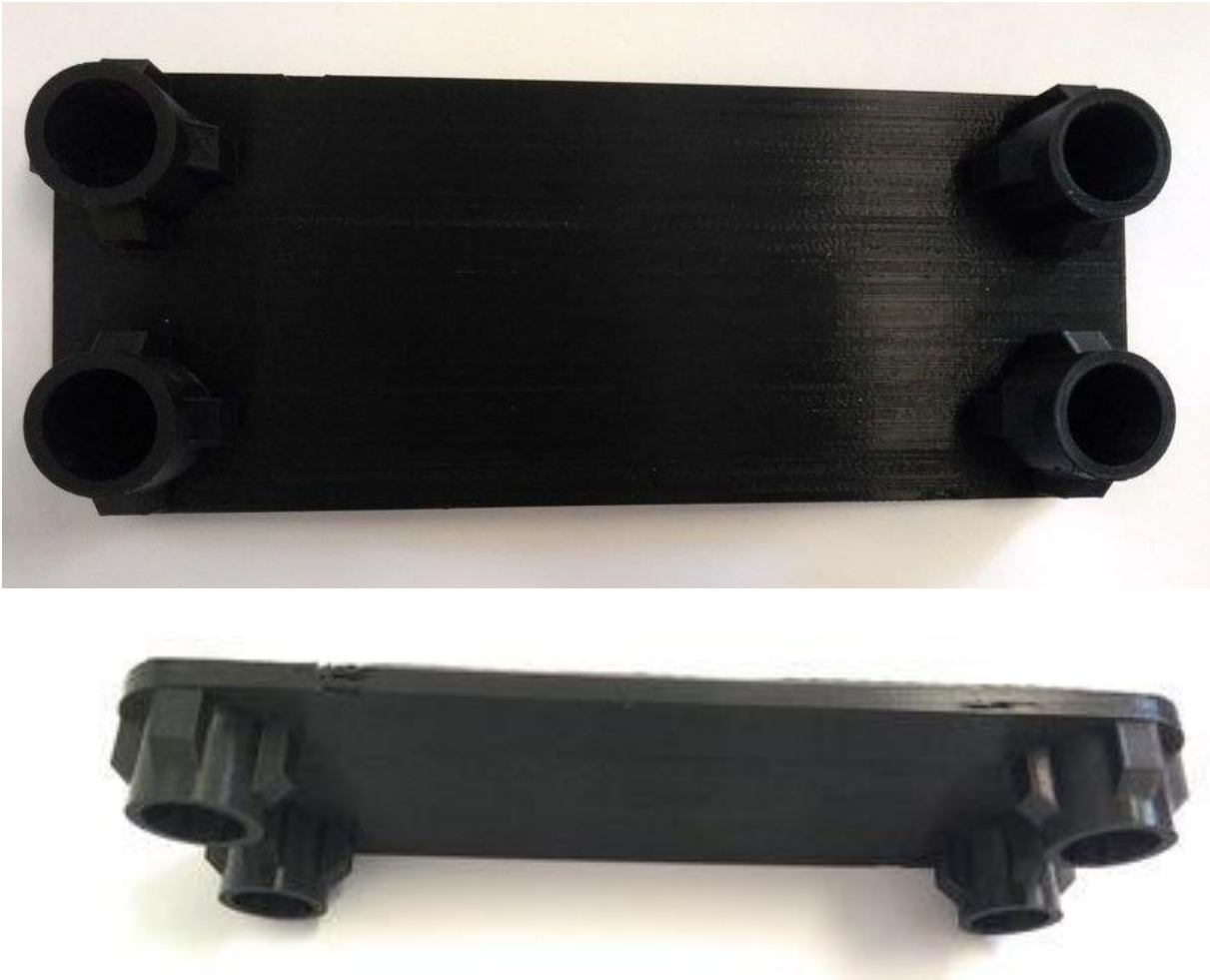


Figura 5 immagini dello scambiatore di prova realizzato mediante FDM

Lo scambiatore è stato testato collegando uno dei canali a una linea di aria compressa e immergendo lo scambiatore in acqua. Il test ha dimostrato la presenza di numerosi punti dai quali usciva l'aria Figura 6.



Figura 6: immagine dello scambiatore stampato mediante FDM durante il test di tenuta.

Visti i risultati non soddisfacenti è stato quindi realizzato uno scambiatore identico al precedente mediante una stampante SLA (Figura 7).

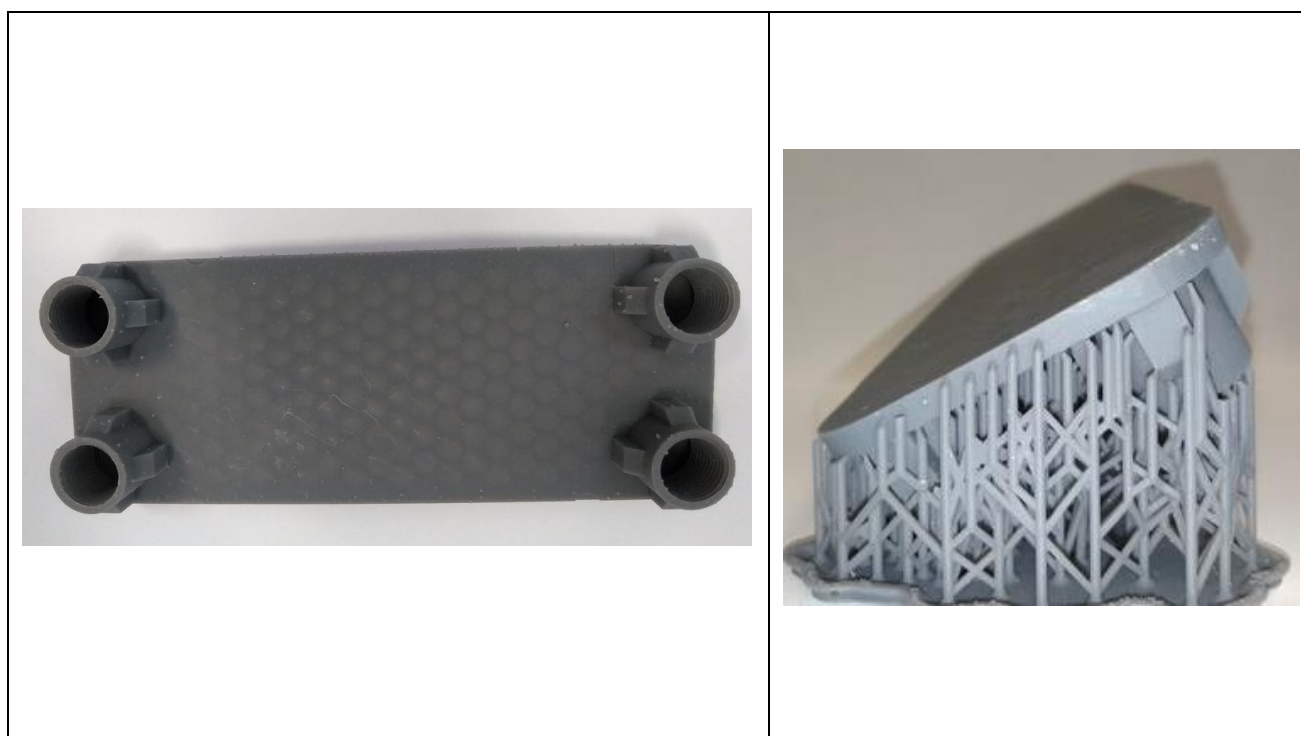




Figura 7: immagini dello scambiatore di prova realizzato mediante processo SLA

Lo scambiatore realizzato mediante SLA presenta una finitura superficiale migliore rispetto a quello stampato FDM e non ha presentato perdite durante la prova con aria compressa. Il confronto tra la stampa FDM e SLA, seppur limitato a due tecnologie, ha permesso di decidere con quale stampante poter effettuare le prove di stampa degli scambiatori con il fine di realizzarne alcuni da qualificare sul banco prova in condizioni di esercizio. L'utilizzo delle stampanti di tipo FDM per applicazioni che prevedano l'utilizzo di fluidi non è escluso dai risultati di questo rapporto. E' possibile infatti ottimizzare i parametri e per alcuni materiali, per esempio l'ABS, effettuare trattamenti mediante solventi, quali l'acetone, che consentono di "sigillare" le porosità che si creano durante la stampa, in particolare tra uno strato e l'altro e in punti particolari [18,19]. Visti però i tempi delle attività progettuali si è ritenuto opportuno procedere con l'acquisto della stampante di tipo SLA con piatto di stampa 33.5x20x30 cm. Queste dimensioni consentono di stampare uno scambiatore di dimensioni identiche a quello realizzato in passato mediante saldobrasatura (21x8.2x4.08 cm). La stampante consente di impostare diverse dimensioni degli strati di stampa nell'intervallo 25-300 μm , in funzione però del tipo di materiale, e ha 2 laser da 250 mW ciascuno, che consentono appunto di coprire un'area più larga di stampa. La scelta della stampante è stata inoltre dettata dalla presenza sul mercato di alcuni tipi di resine con cariche, particelle disperse omogeneamente, che modificano, anche se di poco le proprietà termiche del materiale di base: in genere dimetacrilati. Questo tipo di resine richiedono un trattamento aggiuntivo alla fine della stampa in un sistema che riscalda i componenti e li illumina con lampade UV. Gli oggetti stampati devono essere rimossi dal piatto di stampa e lavati in alcool isopropilico per rimuovere la resina in eccesso. Questo consente di raggiungere ottimizzare le proprietà della resina dopo polimerizzazione, in termini di resistenza meccanica.

Gli scambiatori sono stati realizzati inizialmente partendo dal progetto realizzato nella precedente annualità. Uno degli obiettivi è stato quello di realizzare lo scambiatore in un unico pezzo, senza componenti da assemblare, comprensivo dei bocchelli per il collegamento con le tubazioni di ingresso e uscita dei fluidi di lavoro. Come già accennato la stampa mediante SLA consente di realizzare i bocchelli con le filettature. Al fine di rendere omogenei i collegamenti con l'impianto di prova si è deciso di utilizzare raccordi da 1/2 " gas.

Durante le prove i bocchelli realizzati inizialmente si sono fessurati a causa degli sforzi generati dal peso della strumentazione collegata agli scambiatori. Per questo motivo è stata incrementata la dimensione esterna dei bocchelli.

In Figura 8 sono mostrati i bocchelli realizzati: a sinistra è visibile la prima versione del bocchello, che si è più volte fessurato durante la fase di collegamento con le linee dei fluidi di lavoro, mentre a destra è visibile quello rinforzato.

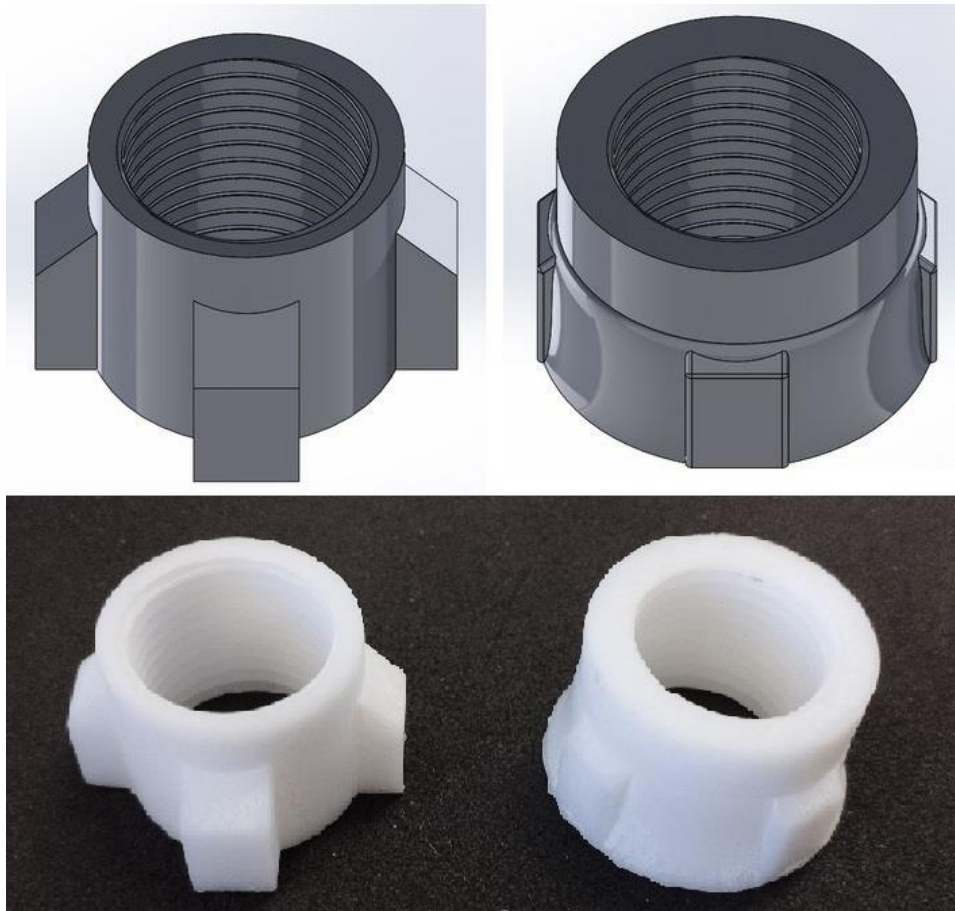


Figura 8: bocchelli con filettatura 1/2 " gas per il collegamento dello scambiatore alle linee dei fluidi di lavoro e alla strumentazione di misura. A destra il bocchello rinforzato.

In Figura 9 è mostrata la stampante utilizzata per realizzare gli scambiatori in materiale polimerico e il sistema per il post-trattamento.

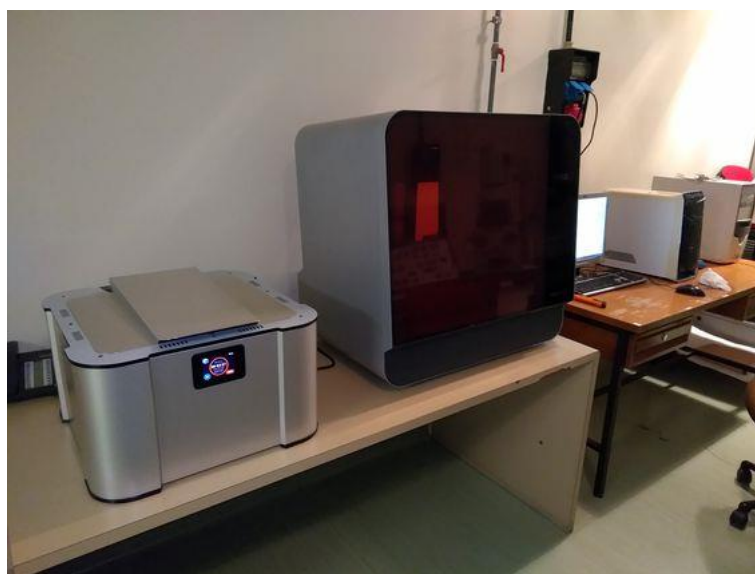


Figura 9: immagine della stampante SLA utilizzata per la stampa degli scambiatori e sistema UV per la polimerizzazione della resina

In Figura 10 sono visibili diverse fasi della stampa degli scambiatori mediante la stampante SLA. E' possibile osservare come lo scambiatore viene realizzato strato dopo strato e come vengono posizionati i supporti necessari alla crescita degli strati successivi.

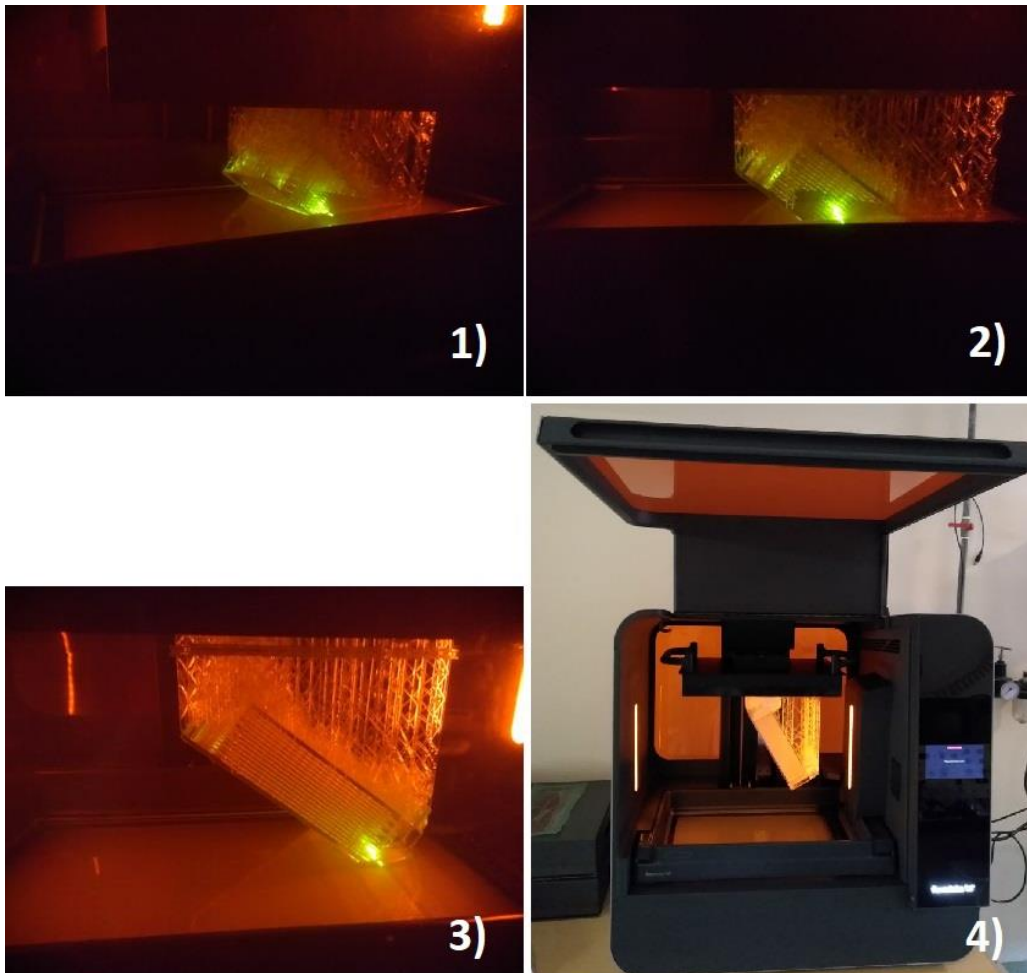


Figura 10: immagine che mostra le diverse fasi di crescita dello scambiatore durante il processo di stampa e a stampa ultimata.

Dopo la stampa i componenti devono essere rimossi dal piatto di stampa (Figura 11). La rimozione risulta abbastanza semplice e richiede pochi minuti mediante l'utilizzo di opportuni attrezzi.

In Figura 12 sono visibili due scambiatori realizzati mediante il processo SLA. Gli scambiatori sono stati realizzati con una resina a base di dimetacrilato. La resina utilizzata in quello di destra, nell'immagine, contiene delle sfere di vetro di dimensioni inferiori a $5\ \mu\text{m}$. La conducibilità termica del vetro può variare da 0.7 a $1.4\ \text{W/mK}$. Anche se questa conducibilità è ancora molto bassa rispetto a quella dei metalli, è un ordine di grandezza superiore rispetto a quella dei materiali polimerici ($0.2\ \text{W/mK}$) [20]. Questo consente di avere un materiale con conducibilità termica superiore a quello dello stesso materiale polimerico di base e quindi di verificare le potenzialità dell'utilizzo di questo processo di stampa per la realizzazione di compositi con proprietà implementate.

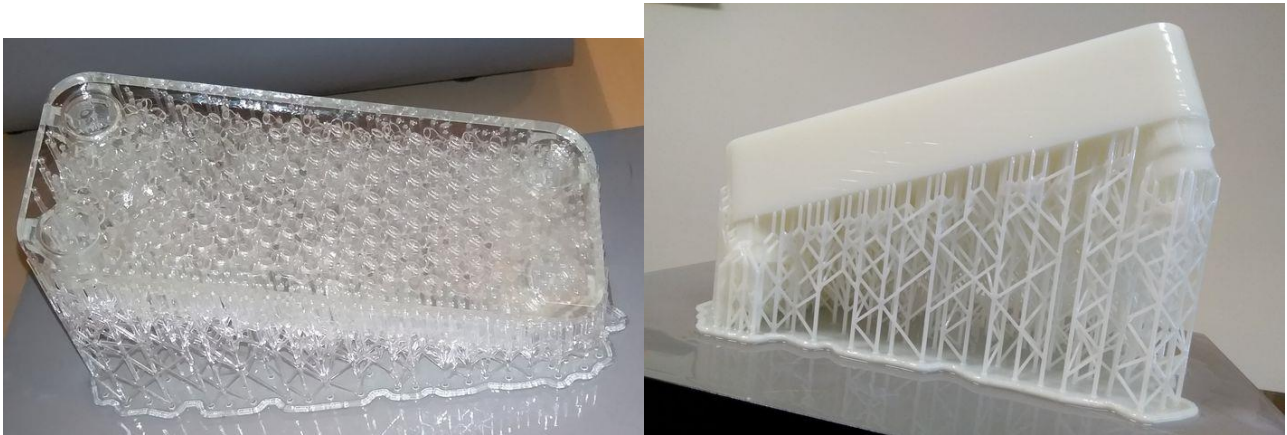


Figura 11: scambiatori appena stampati mediante SLA prima di essere rimossi dal piatto di stampa.

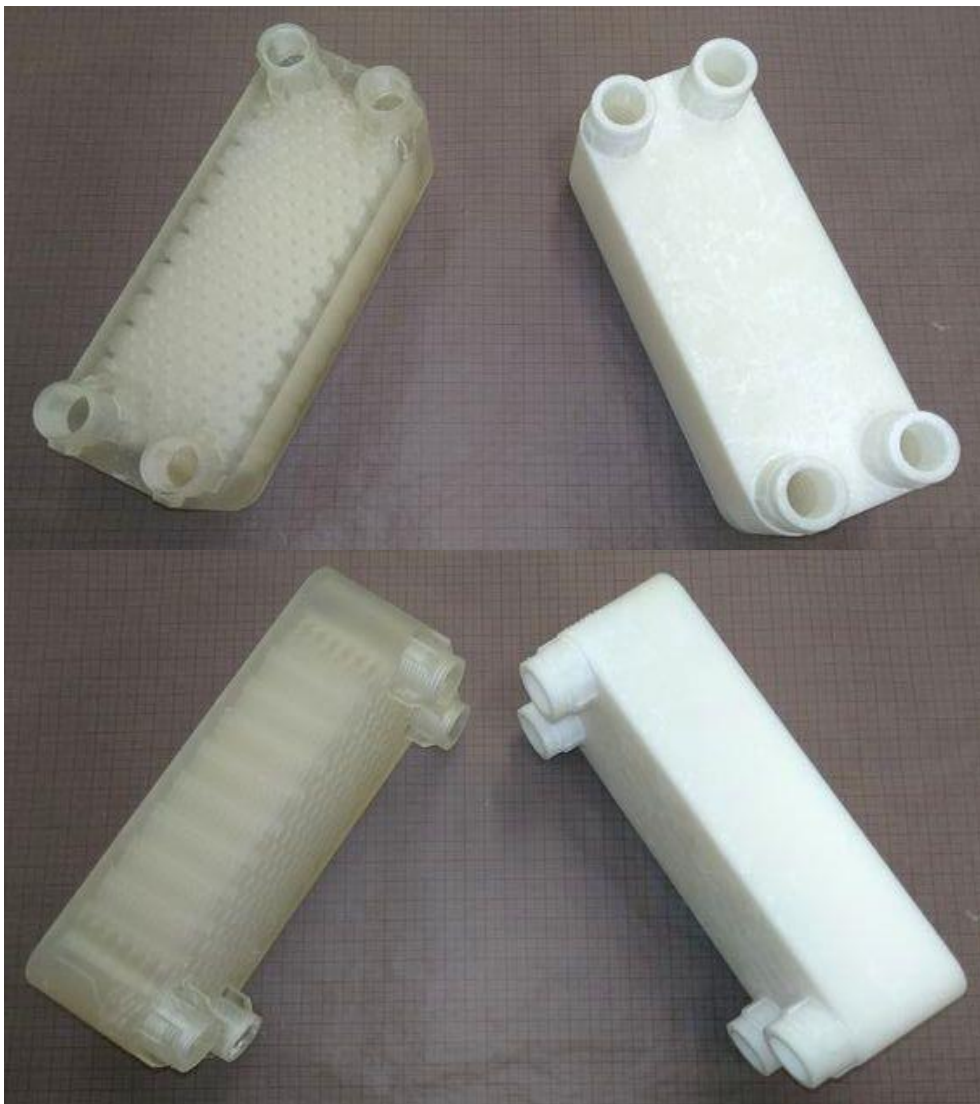


Figura 12: alcuni degli scambiatori di calore realizzati mediante processo SLA.

Una volta verificata la possibilità di stampare mediante la tecnologia SLA scambiatori di calore in un unico blocco, sono state effettuate alcune simulazioni del comportamento termo-fluidodinamico di ulteriori geometrie al fine di definire una geometria interna idonea alla stampa 3D e che porti a miglioramenti delle

prestazioni dello scambiatore. Per questo motivo è stata realizzata una geometria non basata su dei cerchi, ma su quadrati.

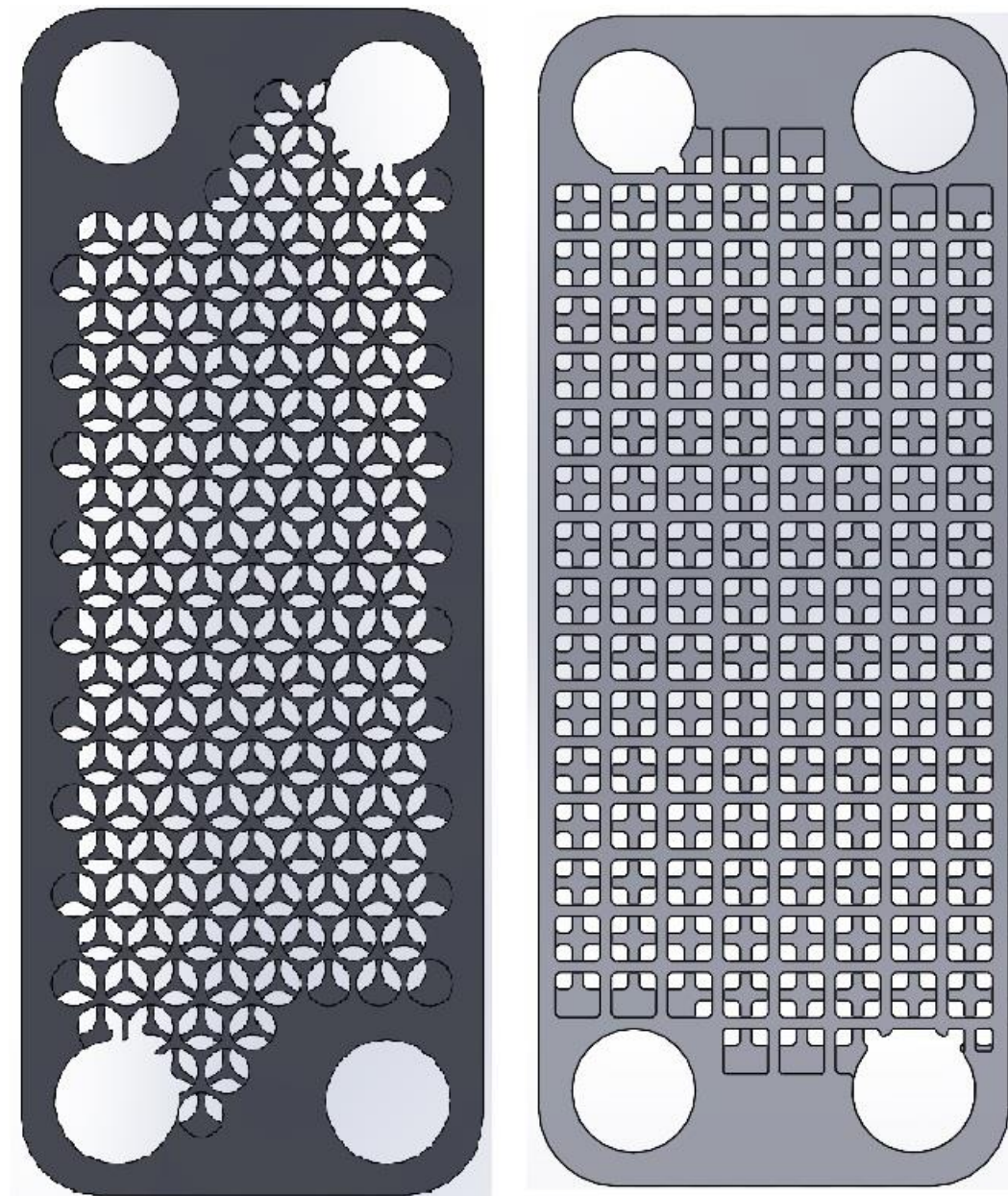


Figura 13: turbolatori con le due diverse geometrie a cerchi e a quadrati.

Le simulazioni hanno mostrato come sia possibile, utilizzando questa geometria, ottenere delle perdite di carico inferiori rispetto a quelle ottenute con la geometria basata sui cerchi dell'ordine del 20%.

In Figura 14 è riportato l'andamento della temperatura nel fluido lato caldo, ottenuto mediante simulazione termo-fluidodinamica dello scambiatore con geometria interna a quadrati. La simulazione è stata effettuata considerando il fluido caldo in ingresso a 60°C, quello freddo a 16°C e i flussi in controcorrente, con una portata massica pari a 0.0397 kg/s. I modelli di scambiatori utilizzati per le simulazioni prevedono 2 canali lato caldo e 2 lato freddo con spessore delle zone di passaggio pari a 1.6 mm e spessore della piastra di separazione di 1 mm.

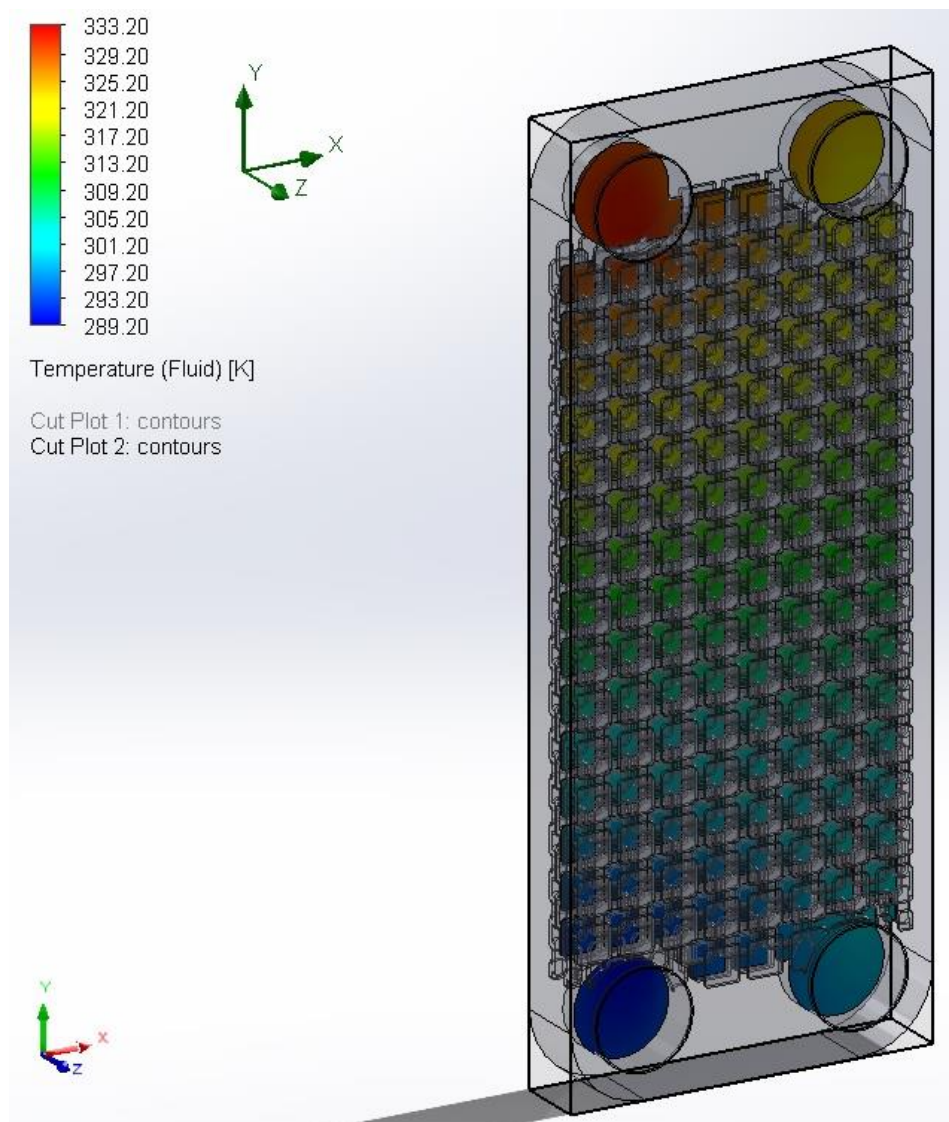


Figura 14: andamento della temperatura nel fluido lato caldo, ottenuto mediante simulazione termo-fluidodinamica dello scambiatore con geometria interna a quadrati

In Tabella 1 sono riportati le temperatura in ingresso e in uscita lato caldo per i due tipi di scambiatore ottenute mediante la simulazione termo-fluidodinamica. I risultati mostrano come le prestazioni dello scambiatore con la nuova geometria interna siano comparabili, se non superiori rispetto al precedente disegno.

Tabella 1: temperature in ingresso e in uscita lato caldo ottenute mediante le simulazioni termo-fluidodinamiche.

Tipo	T in (°C)	T out (°C)
Cerchi	60.00	48.36
Quadrati	60.00	40.13

Sono stati quindi realizzati mediante SLA alcuni scambiatori con le due geometrie interne, in materiale polimerico e composito (resina con particelle disperse all'interno). Sono state prima effettuate le prove di tenuta dei due canali mettendoli in pressione, uno alla volta, con aria compressa dopo aver immerso lo scambiatore in un contenitore pieno d'acqua. Gli scambiatori sono stati successivamente testati sul banco prova (Figura 15). Per prima cosa sono state misurate le perdite di carico e successivamente sono state effettuate le prove in temperatura.



Figura 15: immagine di uno scambiatore di calore in materiale polimerico durante i test su banco prova

Le misure effettuate sul banco prova hanno permesso di verificare il comportamento fluidodinamico degli scambiatori con diverse geometrie interne. Si considerano di seguito i risultati ottenuti alle prove in esercizio degli scambiatori a sette canali con le due geometrie interne a cerchi e a quadrati. Questi hanno una dimensione analoga allo scambiatore di riferimento realizzato assemblando piastre pre-forate e successiva saldobrasatura.

Come ipotizzato al momento della progettazione e come risulta dalla simulazione termo-fluidodinamica, gli scambiatori con geometria interna a quadrati presentano perdite di carico inferiori, di circa il 20%, effettuando le misure a portata di circa 1000 l/h, rispetto a quelle con geometria interna a cerchi (tipologia 1). Le misure sono ripetute per gli stessi scambiatori stampati anche utilizzando un altro tipo di resina contenente vetro come materiale di riempimento (tipologia 2). Anche in questo caso l'andamento delle perdite di carico mostra valori inferiori per la geometria con i quadrati.

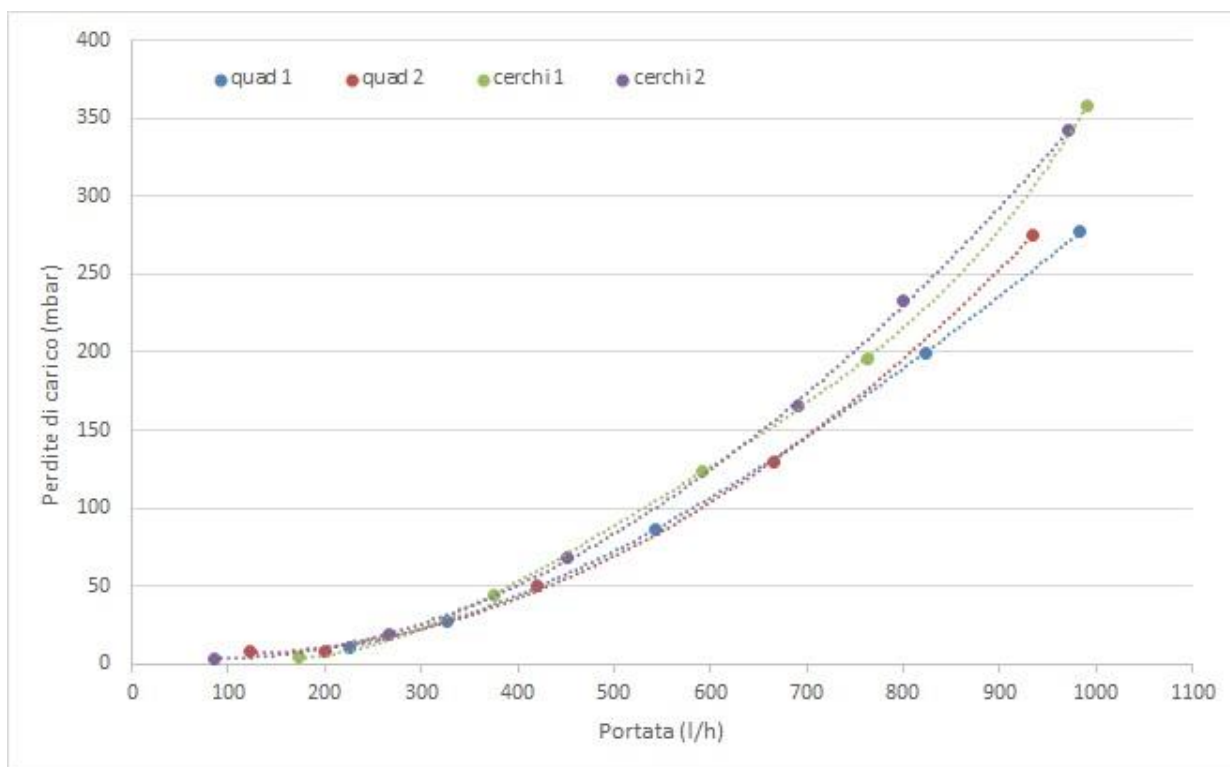


Figura 16: perdite di carico misurate per gli scambiatori con due geometrie interne differenti: cerchi e quadrati.

La Tabella 2 riporta le tipologie di scambiatori a 7 canali in materiale polimerico qualificati sul banco prova.

Tabella 2: tipologia di scambiatori a 7 canali in materiale polimerico qualificati sul banco prova

Tipo	Geometria	Materiale	Spessore piastre turbolatore (mm)	Spessore piastra separatrice (mm)
A	Cerchi	Resina	1	1.2
B	Cerchi	Resina con carica 1	1	1.2
C	Quadrati	Resina con carica 2	1	1.2
D	Quadrati	Resina con carica 1	1	1.2
E	Cerchi	Resina	0.8	0.8

In Figura 17 sono riportati i valori ottenuti sperimentalmente dello scambio termico globale in funzione della conducibilità termica dei materiali utilizzati per realizzare i diversi tipi di scambiatori.

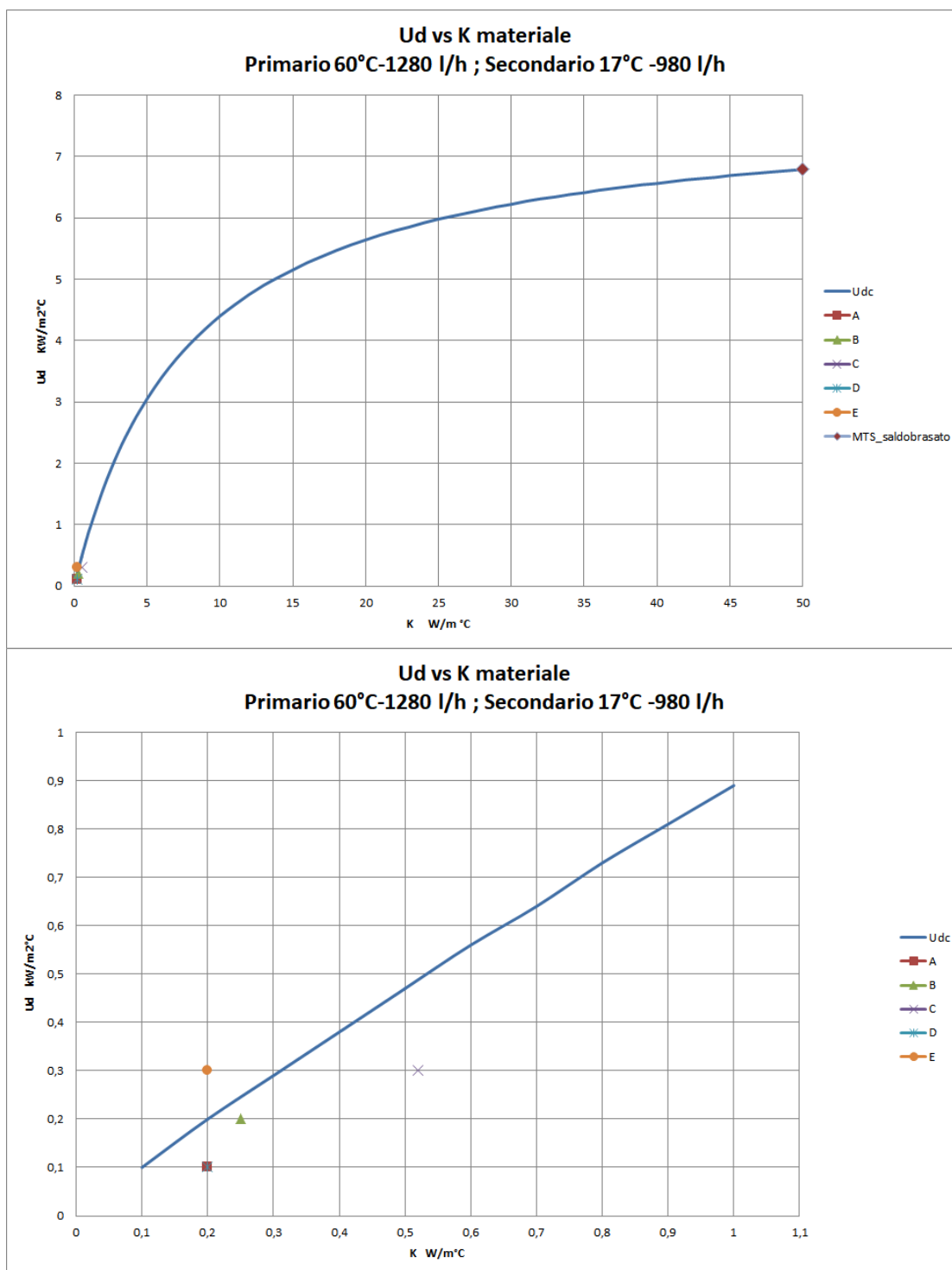


Figura 17: misure sperimentali dello scambio termico globale per diversi tipi di scambiatori di calore polimerici

Nella figura 17 sono riportati i risultati ottenuti dai vari scambiatori realizzati in termini di scambio termico, confrontandoli con una curva ottenuta dalla regressione sui dati sperimentali ricavati a suo tempo per lo scambiatore saldo brasato, la cui geometria ha ispirato tutti quelli attuali.

Data la bassissima conducibilità termica dei polimeri utilizzati, i punti sperimentali dei nuovi scambiatori si trovano tutti sull' estrema sinistra del grafico, nella zona controllata dalla conducibilità termica del materiale.

Infatti è noto che per il coefficiente globale di scambio U_d vale la seguente relazione:

$$\frac{1}{Ud} = \frac{1}{h_1} + \frac{s}{k} + \frac{1}{h_2}$$

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

Per valori di k molto piccoli, come in questo caso, il valore di $1/Ud$ si riduce a:

$$\frac{1}{Ud} \cong \frac{s}{k}$$

perché i termini $1/h_1$ e $1/h_2$ sono trascurabili. Quindi il coefficiente globale di scambio dipende dalla sola conducibilità e dallo spessore della piastra di separazione tra il fluido caldo e quello freddo.

Per questo motivo si è anche rinunciato a effettuare delle regressioni sui dati sperimentali di Ud al fine di determinare le relazioni per calcolare i coefficienti h_1 e h_2 , cosa che verrà fatta successivamente per gli scambiatori che si intende realizzare mediante AM in materiale metallico.

Le misure confermano infatti come il coefficiente di scambio termico globale aumenti con piccole variazioni dello spessore del separatore (da 1.2 a 0.8 mm, da tipo A a E) e con piccole variazioni della conducibilità termica (da 0.2 a 0.51 W/m °C, da tipo A a E). Questo risultato permette di considerare gli scambiatori in materiale composito interessanti per applicazioni nel settore domestico e industriale qualora si riuscisse ad ottenere valori di conducibilità termica almeno pari a 10 volte quelle dei materiali utilizzati in questo lavoro. L'attività richiede sicuramente ulteriori sperimentazioni che esulano dallo scopo ultimo del presente lavoro che è quello di realizzare scambiatori di calore in lega metallica.

La Tabella 3 mostra le caratteristiche degli scambiatori in materiale polimerico realizzati mediante stampa 3D, mentre nella Tabella 4 sono riportate le prestazioni dei diversi scambiatori in termini di potenza scambiata e coefficiente di scambio globale. Dai dati riportati è possibile ipotizzare l'utilizzo di scambiatori in materiale polimerico nel caso sia necessaria una potenza di scambio termico ridotta, con basse portate di fluidi corrosivi.

Tabella 3: Caratteristiche degli scambiatori polimerici realizzati

Scambiatore	Superficie scambio m ²	Spaziatura / Spessore piastre mm	Polimero	Conducibilità termica W/m °C	Foratura interna
A	0.1632	2/1.2	Resina	0.2	Cerchi
B	0.1632	2/1.2	Resina con carica 1	0.25	Cerchi
C	0.1764	2/1.2	Resina con carica 2	0.52	Quadrati
D	0.1764	2/1.2	Resina con carica 1	0.2	Quadrati
E	0.1632	1.6/0.8	Resina con carica 1	0.25	Cerchi

Tabella 4: Prestazioni in condizioni simili di massimo salto termico

scambiatore	T calda IN °C	T fredda IN °C	Portata calda l/h	Portata fredda l/h	Potenza kW	Ud kW/m ² °C
A	60.09	17.60	1292.7	989.2	0.75	0.1
B	60.01	17.53	1286.2	970	0.88	0.2
C	60.07	18.78	1305.9	987.4	1.91	0.3
D	60.04	18.47	1326.7	983.9	0.81	0.1
E	60.01	18.10	912.7	791.8	1.55	0.3

In ultimo è stata valutata la possibilità di realizzare geometrie interne degli scambiatori alternative a quelle descritte in precedenza. E' stata progettata quindi una nuova geometria che permette, mediante l'alternarsi di sinusoidi di generare un complesso percorso del fluido, visibile nella simulazione termofluidodinamica riportata in Figura 18. Seppur interessante dal punto di vista dello scambio termico, la realizzazione di questo scambiatore mediante SLA, ha presentato però dei problemi per le difficoltà riscontrate nella rimozione della resina dai canali interni. Modificando la forma delle sinusoidi è possibile aumentare la dimensione dei canali per superare questo problema, riducendo anche le perdite di carico, ma a discapito dello scambio termico.

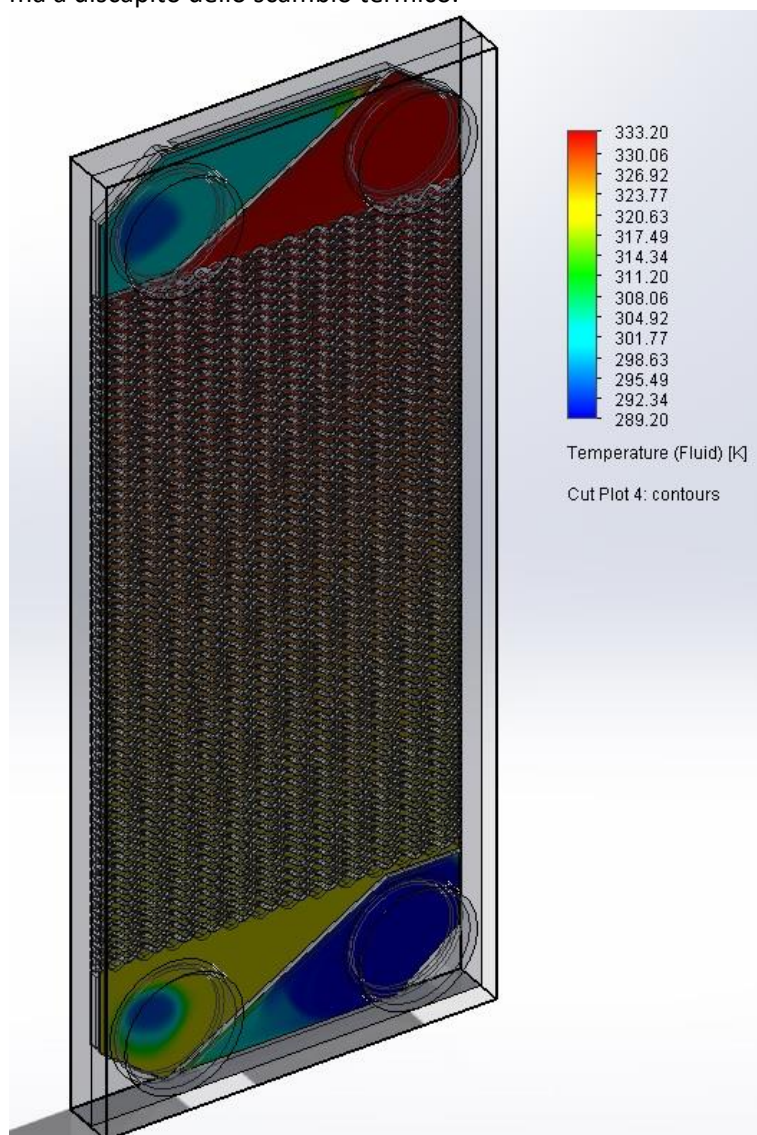


Figura 18: scambiatore con geometria interna realizzata mediante un intreccio di sinusoidi.

Oltre alla geometria riportata in precedenza sono stati presi in considerazione anche i giroidi. Questi sono delle superfici minime periodiche infinitamente connesse che non contengono linee rette, scoperte nel 1970 da A. Schoen [21]. I giroidi sono molto interessanti per la realizzazione di scambiatori di calore essendo delle superfici altamente convolute, che creano quindi un percorso turbolento del fluido e presentano un'elevata area superficiale funzionale allo scambio termico.

Sono state fatte quindi delle prove di stampa di giroidi come riportato in Figura 19. In queste immagini è possibile osservare la struttura senza (a) e con i supporti (b) generati dal software per la preparazione della stampa. La struttura presenta pareti con inclinazioni variabili che richiedono in diversi punti la realizzazione di supporti. La rimozione di questi supporti in un componente chiuso non è realizzabile dal punto di vista

pratico. Una soluzione perseguibile, potrebbe essere quella di creare delle geometrie, partendo da formule matematiche, tali da non richiedere i supporti.

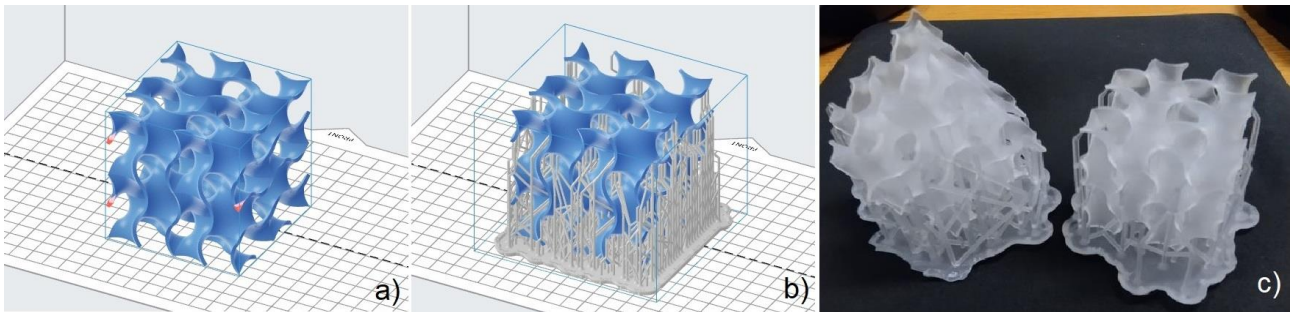


Figura 19: immagini di giroidi senza (a) e con i supporti (b) e dopo la stampa mediante SLA (c).

Alcuni autori hanno descritto in maniera estesa l'utilizzo di questo tipo di strutture per applicazioni strutturali e la loro realizzazione mediante la stampa 3D, sia di polimeri che di metalli, evidenziando il problema dei supporti [22].

3 Conclusioni

Nel presente report sono riportate le attività svolte nel secondo anno del progetto relativamente alla realizzazione di scambiatori di calore mediante stampa 3D. Sono state effettuate delle prove di stampa mediante diverse tecnologie che hanno permesso di selezionare la tecnologia SLA per la stampa degli scambiatori. E' stato inoltre allestito un banco prova per qualificare scambiatori di calore. Il banco prova prevede l'utilizzo di un sistema di refrigerazione e riscaldamento con potenze rispettivamente di 5 e 4 kW. Inoltre è possibile acquisire le temperature e la pressione in ingresso e in uscita dei fluidi dallo scambiatore e le loro portate. L'acquisizione in continuo dei dati permette di effettuare una successiva elaborazione, come descritto nel rapporto, e per determinare le principali grandezze termo-fluidodinamiche. La temperatura massima e minima di lavoro sono rispettivamente -20°C e 80°C. Il banco prova sarà funzionale anche nel terzo anno del progetto per la qualifica degli scambiatori di calore realizzati in lega metallica.

L'attività ha previsto quindi la prototipazione dello scambiatore di calore mediante la stampa in materiale polimerico e composito, a partire dal progetto realizzato nel primo anno. Sono stati realizzati diversi scambiatori di calore utilizzando materiali polimerici e compositi con conducibilità termica nell'intervallo 0.2 – 0.51 W/mK. La stampa degli scambiatori ha permesso di dimostrare la possibilità di realizzare scambiatori di calore in materiale polimerico in un unico blocco, compresi i raccordi per i collegamenti a un impianto. Questi risultati permettono di aprire interessanti considerazioni relative alla possibilità di produrre scambiatori in materiale polimerico. Infatti implementando la conducibilità termica di almeno un fattore 10 si possono raggiungere, con le geometrie ottimizzate, potenze scambiate comparabili con quelli realizzati in materiale metallico, ma con costi energetici di produzione limitati (consumo nominale pari a 650 W, fino a circa 2.2 kW per macchine con dimensioni di stampa di 800x800x500 mm). Scambiatori di questo tipo, potrebbero trovare applicazione ad esempio all'interno di caldaie per l'acqua calda sanitaria e in processi dove i liquidi di lavoro presentino problemi di corrosione (liquidi con elevata salinità, acidi, basi etc.).

Sulla base dei risultati ottenuti, nella prossima annualità verranno realizzati, e qualificati sul banco prova, scambiatori di calore in lega metallica.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Bak, D. (2003), "Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter", *Assembly Automation*, Vol. 23 No. 4, pp. 340-345.
<https://doi.org/10.1108/01445150310501190>
- [2] Park, HS., Dang, XP., Nguyen, DS. et al. Design of Advanced Injection Mold to Increase Cooling Efficiency. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 7, 319–328 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00041-4>
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] J. G. Cevallos, Thermal and manufacturing design of polymer composite heat exchangers, PhD thesis, University of Maryland, College Park, MD, 2014
- [10] M.A. Arie, D.M. Hymas, F. Singer, A.H. Shooshtari, M. Ohadi, An additively manufactured novel polymer composite heat exchanger for dry cooling applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 147, 2020, 118889, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118889>.
- [11] J. H.K. Haertel, G. F. Nellis, A fully developed flow thermofluid model for topology optimization of 3D-printed air-cooled heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 119 (2017) 10–24
- [12] R. A. Felber, N. Rudolph, G. F. Nellis, Design and simulation of 3d printed air-cooled heat exchangers, *Solid Freeform Fabrication 2016: Atti del 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*
- [13] L. Kelava, I. Ivić, E. Pakai, K. Fekete, P. Maroti, R. Told, Z. Ujfalusi, A. Garami, Stereolithography 3D Printing of a Heat Exchanger for Advanced Temperature Control in Wire Myography, *Polymers*, 14 (2022) 471
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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
- [18] Eric J. McCullough, Vamsi K. Yadavalli, Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 6, 2013, Pages 947-954, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.015>.
- [19] A. Milionis, C. Noyes, E. Loth, I. S. Bayer, A. W. Lichtenberger, V. N. Stathopoulos & N. Vourdas (2015): Water-Repellent Approaches for 3-D Printed Internal Passages, *Materials and Manufacturing Processes*, DOI: 10.1080/10426914.2015.1059443

-
- [20] W.D. Callister, Jr, D.G. Rethwisch, Materials Science and Engineering, 8th edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0-470-41997-7
- [21] A.H. Schoen, "Infinite Periodic Minimal Surfaces Without Self-Intersections", NASA technical note D-5541 (1970)
- [22] O. Al-Ketan, R. K. Abu Al-Rub, Multifunctional Mechanical Metamaterials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices, Advanced Engineering Materials, 2019, 21, 1900524