



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo e caratterizzazione sperimentale di tubi di calore realizzati tramite tecniche di additive manufacturing

Anselmo Cecere, Raffaele Savino



DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
INDUSTRIALE

SVILUPPO E CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI TUBI DI CALORE REALIZZATI TRAMITE TECNICHE DI ADDITIVE MANUFACTURING

Anselmo Cecere, Raffaele Savino (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università Degli Studi di Napoli Federico II)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Materiali di frontiera per usi energetici

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

Linea di attività: LA 4.16 Analisi dei requisiti di tubi di calore stampati tramite tecniche di Additive Manufacturing

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia ENEA

Responsabile del Work package: Federica Bezzi ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Università degli Studi di Napoli Federico II "Tubi di calore stampati tramite tecniche di additive manufacturing".

Responsabile scientifico ENEA: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile scientifico Università Degli Studi di Napoli Federico II: Anselmo Cecere

Gli autori desiderano ringraziare la ditta 3Dna per il supporto nella realizzazione dei prototipi.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1 SALITA CAPILLARE IN UNA STRUTTURA POROSA OTTENUTA MEDIANTE STAMPA 3D	6
2.1.1 <i>Setup sperimentale</i>	8
2.1.2 <i>Confronto teorico numerico</i>	9
2.2 SVILUPPO DI UN PROTOTIPO DI HEAT PIPE DI TIPO FLAT.....	12
2.2.1 <i>Prototipi</i>	12
2.2.2 <i>Visualizzazione della distribuzione di liquido</i>	15
2.2.3 <i>Setup sperimentale</i>	16
2.2.4 <i>Prove di vuoto e di riempimento</i>	18
2.2.5 <i>Risultati sperimentali</i>	19
3 CONCLUSIONI.....	21
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	21
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	22

Sommario

Il documento descrive le attività svolte nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale e l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, intitolato "Tubi di calore stampati tramite tecniche di Additive Manufacturing". Lo scopo dell'attività di ricerca è analizzare e testare le prestazioni di tubi di calore, e/o di alcune sue componenti, sviluppati utilizzando tecniche di Additive Manufacturing. Nel primo anno di attività sono state analizzate le maggiori soluzioni per lo scambio termico basate sulla tecnologia Heat Pipe assieme alle diverse tecnologie di Additive Manufacturing attualmente presenti sul mercato, concentrandosi in particolare su quelle più promettenti per la produzione di dispositivi metallici come i tubi di calore. Sono state analizzate le varie strutture capillari ed i vari prototipi di scambiatori di calore realizzati ad oggi mediante stampa 3d. Successivamente è stata analizzata una struttura capillare di tipo tetraedrico realizzabile mediante tecniche di Additive Manufacturing e si sono ricavate le curve teoriche che descrivono la perdita di pressione e la salita capillare al variare del fluido di lavoro utilizzato, confrontando infine le performance capillari, ricavate dalla struttura in esame, con quelle di altre tipologie di strutture presenti in letteratura.

Nel secondo anno di attività la struttura capillare è stata realizzata tramite la tecnica Selective Laser Melting. Le prestazioni capillari della struttura realizzata in lega di alluminio AlSi10Mg-0403, sono state misurate sperimentalmente attraverso delle misure di salita capillare. Successivamente sono stati designati e poi stampati tre prototipi di scambiatori di calore bifase utilizzando la stessa tecnica e lo stesso materiale e considerando la stessa struttura reticolare caratterizzata durante la fase iniziale. Alcuni di questi prototipi sono stati utilizzati per verificare la distribuzione del liquido all'interno della struttura capillare. Il prototipo finale invece è stato disegnato con un opportuno sistema di ingresso per consentirne il riempimento con un opportuno liquido di lavoro. Sono stati quindi messi a punto degli apparati sperimentali per la caratterizzazione delle prestazioni termiche del prototipo finale. In particolare, sono state eseguite sia delle visualizzazioni preliminari della distribuzione del liquido all'interno del setto poroso sia prove di vuoto e di riempimento. Attraverso questi setup sono state eseguite delle prove di laboratorio tese a valutare le prestazioni dello scambiatore di calore realizzato in 3d.

1 Introduzione

I tubi di calore sono dispositivi passivi in grado di trasferire un'enorme quantità di calore tra un'interfaccia calda ed una più fredda. In virtù della loro semplicità, economicità ed elevata conducibilità termica, essi hanno un ruolo chiave in molti dei problemi di ingegneria legati allo scambio termico. Un tipico tubo di calore (Heat Pipe (HP)) può avere una forma cilindrica (trasferimento del calore monoassiale) oppure forme più complesse che meglio si adattano alla particolare applicazione considerata. Esempi sono tubi di calore di tipo piatto (Flat Heat Pipe (FHP)) che possono facilmente esseri messi a contatto con superfici piane e per questo motivo trovano applicazione nel raffreddamento delle CPU o anche nel settore aeronautico [1]. Il trasferimento di calore avviene grazie al processo di evaporazione da una sorgente calda (evaporatore) verso una sorgente fredda (condensatore) dove il liquido ricondensa e torna verso la zona calda grazie all'azione capillare esercitata da una struttura porosa realizzata sulle pareti interne del dispositivo. I materiali utilizzati ed il fluido di lavoro dipendono dall'applicazione e possono essere, ad esempio, rame/acqua che hanno delle eccellenti prestazioni termiche ma anche alluminio/etanolo o alluminio/metanolo che hanno il vantaggio di essere leggeri e facilmente realizzabili. Fondamentale è la compatibilità e la bagnabilità del fluido di lavoro con la struttura capillare considerata [2].

La struttura capillare viene generalmente saturata dalla fase liquida del fluido di lavoro. È ben noto che la pressione capillare in un tubo di raggio R è esprimibile mediante la relazione di *Gauss-Young-Laplace*: $\left(\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \cos \theta\right)$ dove σ è la tensione di vapore dell'interfaccia liquido-vapore, mentre θ è l'angolo di contatto liquido/solido che misura la bagnabilità del liquido di lavoro rispetto alla superficie con la quale viene a contatto. In un tubo di calore una buona bagnabilità del fluido di lavoro può portare ad un significativo recupero di liquido dal condensatore all'evaporatore, il quale a sua volta può influenzare l'aumento delle prestazioni termiche. Affinché un tubo di calore funzioni correttamente, infatti, è opportuno che sia verificata la seguente condizione:

$$\Delta P_{c_{max}} \geq \Delta P_l + \Delta P_g$$

dove al secondo membro figurano le perdite di pressione connesse alle perdite di carico necessarie per riportare il liquido dal condensatore all'evaporatore e le perdite di pressione dovute alle forze gravitazionali, che possono dare contributo positivo o negativo a seconda dell'inclinazione del condotto termico rispetto alla verticale locale. Se questa condizione non viene soddisfatta, la struttura capillare raggiungerà delle condizioni critiche (dry-out) all'evaporatore e il ritorno di liquido non sarà sufficiente a garantire il corretto funzionamento del dispositivo. Si comprende quindi l'importanza di massimizzare tale pressione capillare.

Le strutture capillari più comuni sono grooves, screen mesh, e sintered. Le loro prestazioni vengono valutate in termini di pressione capillare, ma anche di porosità e di permeabilità al fluido di lavoro utilizzato. La capillarità è una misura della potenza di pompaggio della struttura capillare, la permeabilità K misura lo sforzo necessario per far muovere il fluido di lavoro attraverso la struttura porosa, mentre la porosità rappresenta il rapporto tra il volume di vuoto e quello totale della struttura capillare. Un altro parametro chiave è il rapporto K/R_{eff} che caratterizza il limite capillare della struttura porosa ed è spesso indicato con il nome di prestazione capillare. Il raggio effettivo R_{eff} è un parametro utilizzato per descrivere l'aumento di pressione per il pompaggio dei liquidi ed è definito come $R_p / \cos \theta$ dove R_p è il raggio idraulico e θ è l'angolo di contatto del fluido di lavoro con il materiale della struttura.

Idealmente si richiede che la struttura generi un'elevata pressione capillare, combinata con alta permeabilità, tuttavia, le soluzioni normalmente utilizzate non soddisfano completamente tali esigenze. Ad esempio, una struttura screen genera una pressione capillare moderata e una bassa permeabilità, ma comunque maggiore rispetto ad una struttura sintered, mentre le prestazioni dei grooves sono buone in termini di permeabilità, ma scarse in termini di pressione capillare. Altri problemi tecnologici sono legati ai processi di produzione, ed in particolare alle tecnologie necessarie per alloggiare la struttura capillare

all'interno dello scambiatore di calore. Mentre una struttura groove è facilmente realizzabile direttamente per estrusione le strutture mesh e sintered richiedono particolari processi produttivi e peccano di una minore affidabilità rispetto alle strutture grooves. Di recente la ricerca si è rivolta verso l'analisi di strutture più avanzate che forniscono prestazioni maggiori con processi di lavorazione più complessi. Alta permeabilità ed elevata pressione capillare sembrano essere due esigenze apparentemente contrastanti poiché la prima è solitamente mantenuta da una struttura porosa con numerosi piccoli pori, mentre la seconda richiede una struttura scanalata. Questi due requisiti contrastanti possono essere parzialmente soddisfatti grazie alla recente dedizione della ricerca verso le strutture composite che combinano una struttura groove ad una struttura porosa.

Negli ultimi anni, la stampa 3d è stata una delle tecnologie fondamentali di quella che attualmente viene denominata Industria 4.0. Uno degli obiettivi alla base del processo di innovazione dell'industria 4.0, infatti, è quello di sfruttare i vantaggi delle tecnologie additive per la realizzazione di componenti meccanici complessi. Nell'ambito della tecnologia HP, ad oggi, la stampa 3d è stata utilizzata sia per realizzare delle strutture porose di forma complessa sia per lo sviluppo di interi scambiatori di calore [3]. I vantaggi intrinseci sono legati sia alla possibilità di realizzare dispositivi con geometrie complesse (virtualmente di ogni forma), sia alla possibilità di aumentarne le prestazioni ottimizzando la fluidodinamica interna con delle geometrie ad hoc. Lo stampa 3D permette infatti di realizzare delle strutture capillari composite, opportunamente disegnate in base al tipo di applicazione ed al fluido di lavoro utilizzato. Inoltre, l'utilizzo della stampa 3D permette la realizzazione diretta del dispositivo, senza la necessità di integrare la struttura capillare durante la fase di produzione. Questo permette di avere dei tubi di calore affidabili, perché non soggetti ad usura, e con una maggiore efficienza nello scambio termico dovuta all'ottimizzazione delle strutture capillari interne.

In questo report un tubo di calore metallico di tipo flat è stato disegnato e stampato utilizzando l'Additive Manufacturing (AM). Inizialmente una struttura capillare con una geometria tetraedrica (10x10x70) è stata realizzata utilizzando la tecnica Selective Laser Melting (SLM). I valori di permeabilità e porosità di tale struttura sono stati analizzati attraverso un'analisi microscopica mentre la risalita capillare è stata misurata sperimentalmente in laboratorio e confrontata con i valori teorici ottenibili da modelli già presenti in letteratura. Successivamente sono stati designati e poi stampati dei prototipi di scambiatori di calore bifase utilizzando la stessa geometria e lo stesso materiale della stessa struttura reticolare caratterizzata durante la fase iniziale. Alcuni di questi prototipi sono stati utilizzati per verificare la distribuzione del liquido all'interno della struttura capillare. Il prototipo finale invece è stato disegnato con un opportuno sistema di ingresso per consentirne il riempimento con un opportuno liquido di lavoro. Sono stati quindi messi a punto degli apparati sperimentali per la caratterizzazione delle prestazioni termiche del prototipo finale. In particolare, sono state eseguite sia delle visualizzazioni preliminari della distribuzione del liquido all'interno del setto poroso sia prove di vuoto e di riempimento. Attraverso questi setup sono state eseguite delle prove di laboratorio tese a valutare le prestazioni dello scambiatore di calore realizzato in 3d.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Salita capillare in una struttura porosa ottenuta mediante stampa 3D

Nel corso delle attività sono state prima analizzate le prestazioni, in termini di permeabilità, porosità e salita capillare di una struttura capillare (60x10x10 mm) stampata in alluminio utilizzando la tecnica di Additive Manufacturing (AM) nota come Selective Laser Melting (SLM), e bagnata con etanolo. La risalita capillare è stata misurata sperimentalmente mediante una termocamera. I risultati ottenuti sono stati successivamente confrontati considerando la salita teorica ottenuta mediante un opportuno modello matematico, sia nell'ipotesi di trascurabilità degli effetti gravitazionali, sia tenendo in considerazione gli stessi.

La Figura 1a) mostra la struttura capillare porosa disegnato e successivamente stampato in 3D. Tale modello è stato realizzato in alluminio utilizzando una SLM renishaw AM400. La tecnica SLM è risulta essere

la più ragionevole sia in termini di costi che di accuratezza [4] del processo di stampa. La struttura è stata ottenuta attraverso la ripetizione nello spazio tridimensionale di una cella unitaria con parti metalliche di forma cilindrica di dimensioni pari a $400 \mu m$. Il raggio idraulico è stato disegnato pari a $350 \mu m$. Le caratteristiche della struttura capillare sono state sottoposte ad analisi microscopica (vedi Figura 1b)) durante il primo anno di attività [5] utilizzando un microscopio digitale HIROX KH-8700 con lo scopo di analizzare la precisione con cui la macchina è riuscita a soddisfare le richieste dimensionali del disegno CAD.

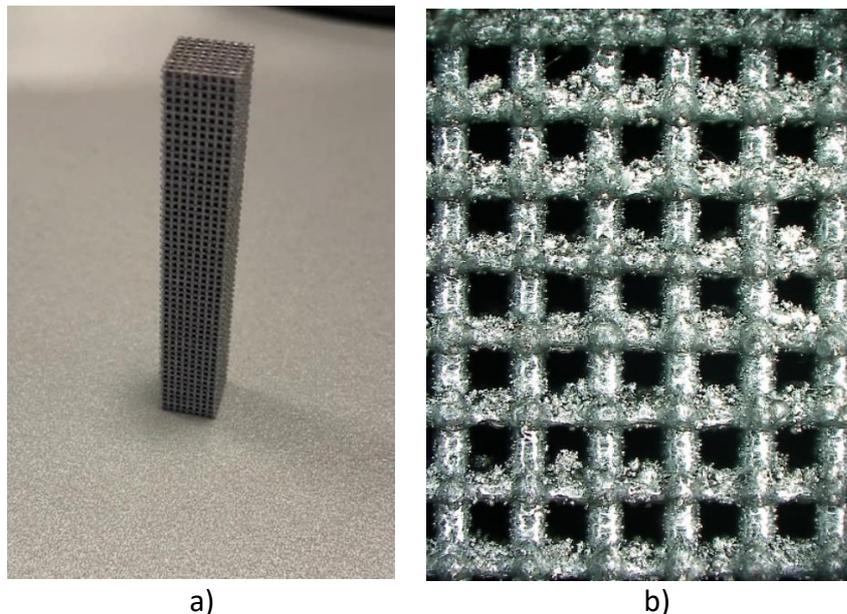


Figura 1 - a) struttura capillare realizzata in alluminio tramite tecnica SLM. b) particolare della struttura capillare osservata utilizzando un microscopio digitale HIROX KH-8700.

Utilizzando i dati disponibili dall'analisi microscopica si è eseguita, un'analisi statistica finalizzata alla ricerca della media e della varianza campionaria della dimensione del raggio idraulico. La dimensione D del foro è risultata mediamente pari $643.6 \mu m$ con un errore percentuale rispetto alla dimensione originale pari a 8.04% (nei calcoli si utilizzerà un valore nominale per la dimensione del foro D pari a $700 \mu m$ e, conseguentemente, un valore nominale del raggio effettivo R_{eff} pari a $350 \mu m$).

È stata, inoltre, ricavata attraverso delle considerazioni geometriche sulla cella elementare la porosità ε della struttura utilizzando la relazione:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_{tot}}$$

in cui V_p è il volume di vuoto, mentre V_{tot} è il volume totale del pezzo, ottenendo una porosità di 0.58.

Per prevedere la permeabilità della struttura porosa è stata utilizzata la relazione di Kozeny-Carman scritta per textile assembly [6], che è comunemente la più utilizzata in letteratura. Per numeri di Reynolds bassi, che sono anche i valori di interesse del nostro studio, tale modello correla la permeabilità con la porosità e la dimensione del poro D secondo la seguente relazione:

$$K = \frac{D^2 \varepsilon^3}{16C(1 - \varepsilon)^2}$$

Dove C è un fattore geometrico che dipende dalle proprietà della struttura porosa, e viene generalmente determinato sperimentalmente. Per la struttura in esame i valori di C comunemente utilizzati sono 122, 150 e 180. In accordo con il riferimento [7], si è utilizzata la relazione di *Kozeny-Carman* con un valore di C pari a 122 che, per valori bassi della velocità del fluido, permette di ottenere un migliore accordo tra i valori calcolati e quelli misurati. Avendo calcolato una porosità di $\varepsilon = 0.58$, in base alla precedente formula si ottiene un valore di permeabilità della struttura in esame pari a $K = 2.776 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. In Tabella 1 sono riassunte le caratteristiche geometriche della struttura capillare in termini di porosità e permeabilità.

Tabella 1 Proprietà geometriche e capillari della struttura porosa in esame.

Caratteristiche geometriche della struttura porosa	
Raggio idraulico, R_p	321.8 [μm]
Permeabilità, K	$2.776 \times 10^{-10} \text{ [m}^2\text{]}$
Porosità, ε	0.58

2.1.1 Setup sperimentale

Nella presente sezione si riporta il *set-up* sperimentale, allestito presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università degli studi di Napoli Federico II, per osservare la salita capillare dell’etanolo all’interno della struttura capillare mostrata nel paragrafo precedente, quando immersa in un bagno riempito con etanolo.

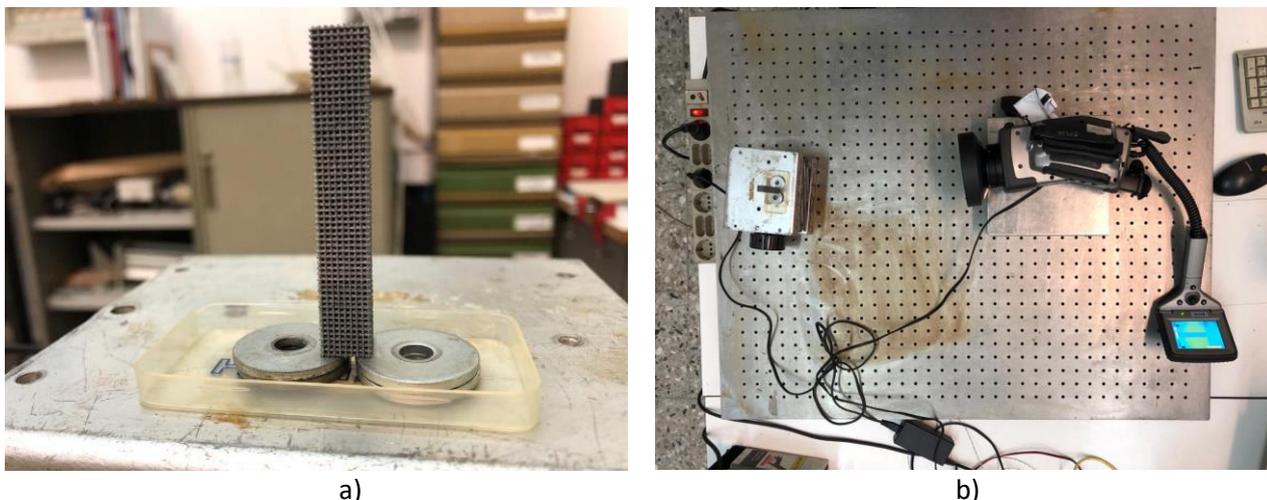


Figura 2 – a) struttura capillare immersa in un disco Petri durante le prove di salita capillare, b) setup sperimentale utilizzato per la misura di salita capillare.

La Figura 2 mostra il set-up sperimentale messo a punto per la misura di salita capillare e costituito da una piastra Petri nel quale viene posizionato il prototipo, figura 2a), che ha funzione di contenitore per il liquido lavoro, ed una termocamera FLIR Thermocam P40 per la visualizzazione della salita capillare, figura 2b). La misura consiste nel riempire il disco di Petri con del fluido di lavoro tramite una pipetta da laboratorio ed osservare la risalita del fluido dovuta all’azione capillare. Nell’apparato sperimentale, sono stati utilizzati quattro spessori per sollevare il provino in modo tale da simulare correttamente l’azione di suzione dello stesso. La visualizzazione avviene grazie ai diversi valori di emissività che hanno l’alluminio (da 0.09 a 0.24 [8]) ed il fluido di lavoro (etanolo ~ 0.89 [9]).

In Figura 3 si riportano le immagini termografiche ottenute con la termocamera FLIR, in particolare in Figura 2a) è possibile osservare la condizione a secco, mentre in Figura 2b) quella bagnata, ove si evince la salita capillare in condizioni stazionarie.

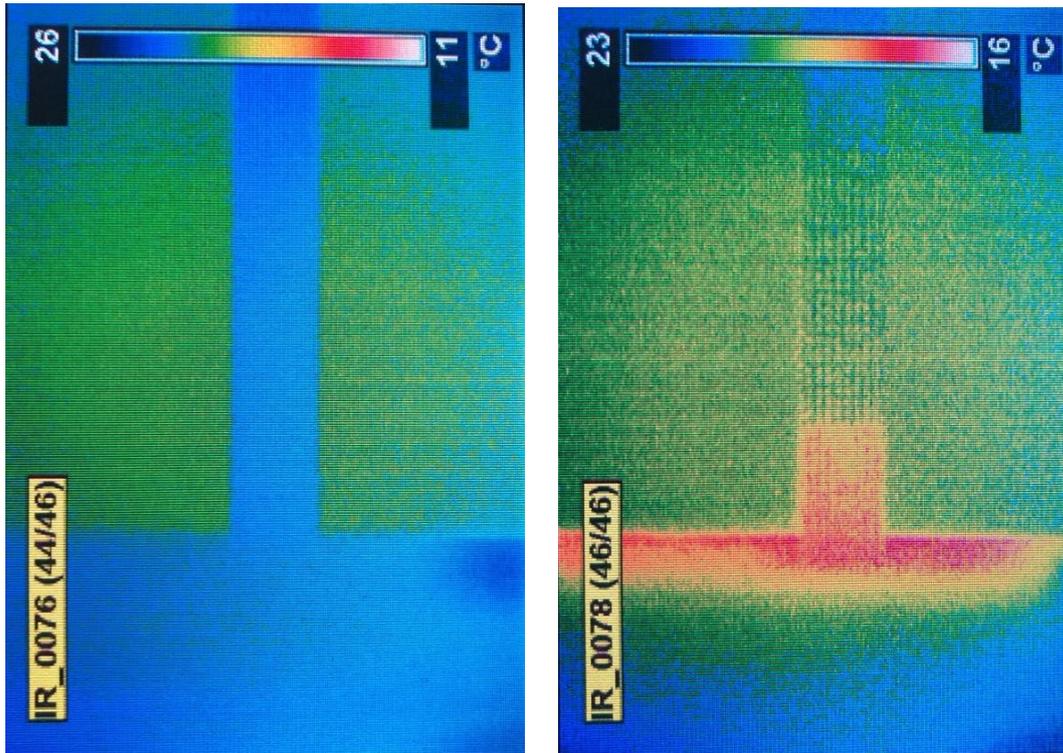


Figura 3 – salita capillare della struttura reticolare bagnata con etanolo. a) immagine termografica in assenza di liquido, b) immagine termografica quando la struttura è bagnata con etanolo.

Dall'analisi delle immagini è stata ricavata una altezza capillare pari a 17.1mm.

2.1.2 Confronto teorico numerico

La risalita capillare teorica h all'interno di strutture porose può essere ottenuta ricordando che in condizioni dinamiche la pressione capillare data dalla legge di Gauss-Young-Laplace $\left(\frac{2\sigma}{R_{eff}}\right)$ deve essere uguale, alle perdite di carico dovute al deflusso del liquido $\left(\frac{\mu\epsilon h}{K}\left(\frac{dh}{dt}\right)\right)$ date dalla legge di Darcy e da quelle gravitazionali date dalla legge di Stevino. L'equazione che descrive la risalita capillare sarà quindi:

$$\frac{2\sigma}{R_{eff}} = \frac{\mu\epsilon h}{K}\left(\frac{dh}{dt}\right) + \rho_L g_0 h$$

dove $\left(\frac{dh}{dt}\right)$ rappresenta la velocità di risalita capillare, μ è la viscosità dinamica, ρ_L la densità del liquido, $R_{eff} = R_p$ (cioè, $\theta = 0^\circ$) il raggio idraulico del fluido di lavoro. Gli effetti gravitazionali risultano essere trascurabili solo nel caso in cui non sia accettabile l'ipotesi di numero di Bond molto minore dell'unità. Nel caso di effetti gravitazionali non trascurabili la precedente equazione può essere riscritta nel modo seguente:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2\sigma K}{R_p \mu \epsilon} \left(\frac{1}{h}\right) - \frac{\rho g K}{\mu \epsilon}$$

che si riduce all'equazione di Washburn solo se la gravità risulta trascurabile:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2\sigma K}{R_p \mu \varepsilon} \left(\frac{1}{h}\right)$$

In questo secondo caso, è solo lo spostamento a cambiare nel tempo. Risolvendo l'equazione differenziale si ottiene l'andamento di h al variare del tempo nell'ipotesi di trascurabilità degli effetti gravitazionali:

$$h = \sqrt{\frac{4K\sigma t}{R_p \mu \varepsilon}}$$

Sotto queste ipotesi ($g=0$), la salita capillare può essere generalmente valutata tramite la classica espressione di *Washburn* in cui $h(t) \sim \sqrt{t}$ viceversa nel caso di non trascurabilità degli effetti gravitazionali è necessario risolvere numericamente l'equazione differenziale completa partendo da un'opportuna condizione iniziale $h(t = 0) = h_0 = 0$.

In Tabella 2 sono riportate le proprietà termofluidodinamiche dell'etanolo a 20°C adoperate per il calcolo della salita capillare in entrambi i casi.

Tabella 2 Proprietà termofluidodinamiche dell'etanolo a 20°C.

Tensione superficiale, σ [N/m]	0.0232
Densità del liquido, ρ_L [Kg/m³]	789
Viscosità dinamica, μ_L [N · s/m²]	0.0012
Angolo di contatto, θ °	~0

L'equazione è stata risolta numericamente utilizzando il software Matlab. L'andamento della quota capillare con il tempo viene mostrato in figura 4a) nel caso di effetti gravitazionali trascurabili ed in Figura 4b) nel caso di effetti gravitazionali non trascurabili.

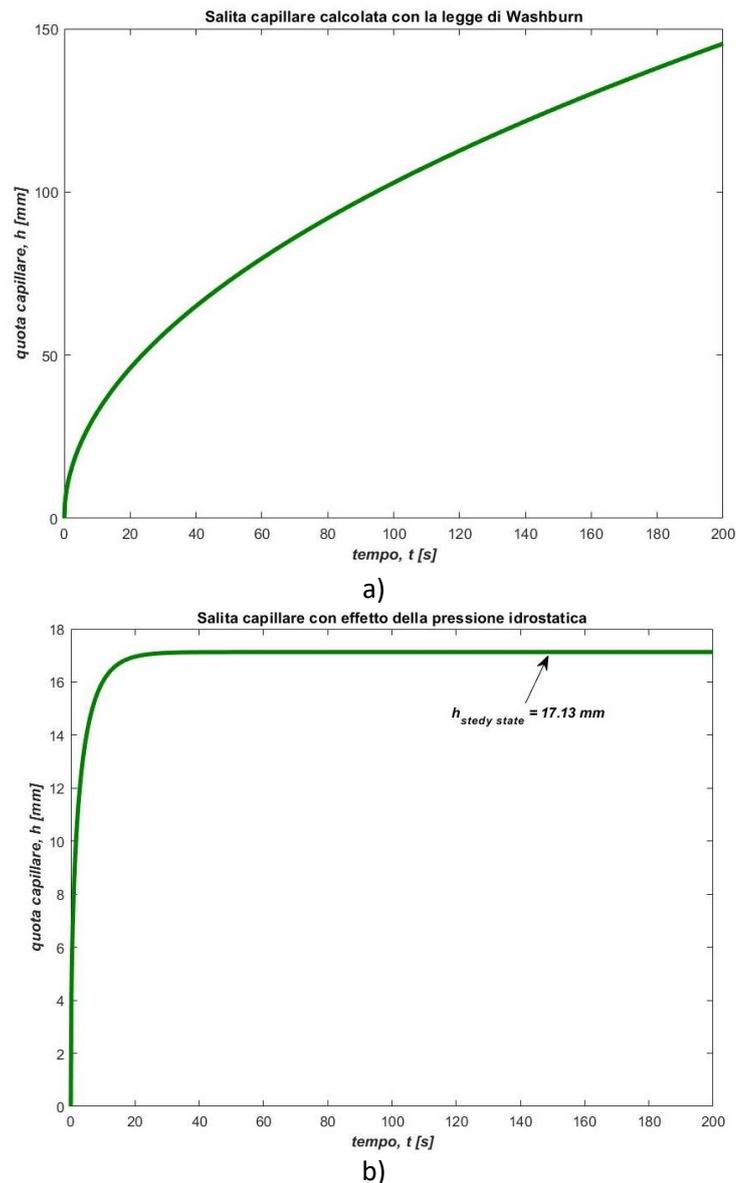


Figura 4 Salita capillare nel tempo per il provino in esame bagnato con etanolo con senza effetto gravitazionale a) ed in presenza di effetti gravitazionali b).

La figura 4b) mostra una rapida risalita dovuta alle forze capillari che prevalgono su quelle gravitazionali e viscosive. All'aumentare del tempo a causa degli effetti gravitazionali, h raggiunge un valore stazionario che dipende dalle proprietà del fluido, quali la tensione superficiale, la densità e la viscosità. In accordo con i valori misurati sperimentalmente. Il valore di quota capillare allo stazionario è pari a $h_{steady\ state} = 17.13\ mm$. In conclusione, possibile ulteriormente sottolineare come, confrontando i dati sperimentali presenti in letteratura con i risultati del modello teorico oggetto di studio, gli effetti gravitazionali per questo tipo di strutture non sono trascurabili. L'effetto gravitazionale gioca, pertanto, un ruolo significativo nella struttura stampata in 3D, causando una risalita più lenta.

2.2 Sviluppo di un prototipo di heat pipe di tipo flat

2.2.1 Prototipi

A partire dalla geometria descritta nei paragrafi precedenti, sono stati realizzati tre prototipi di scambiatori di calore mostrati in Figura 5.

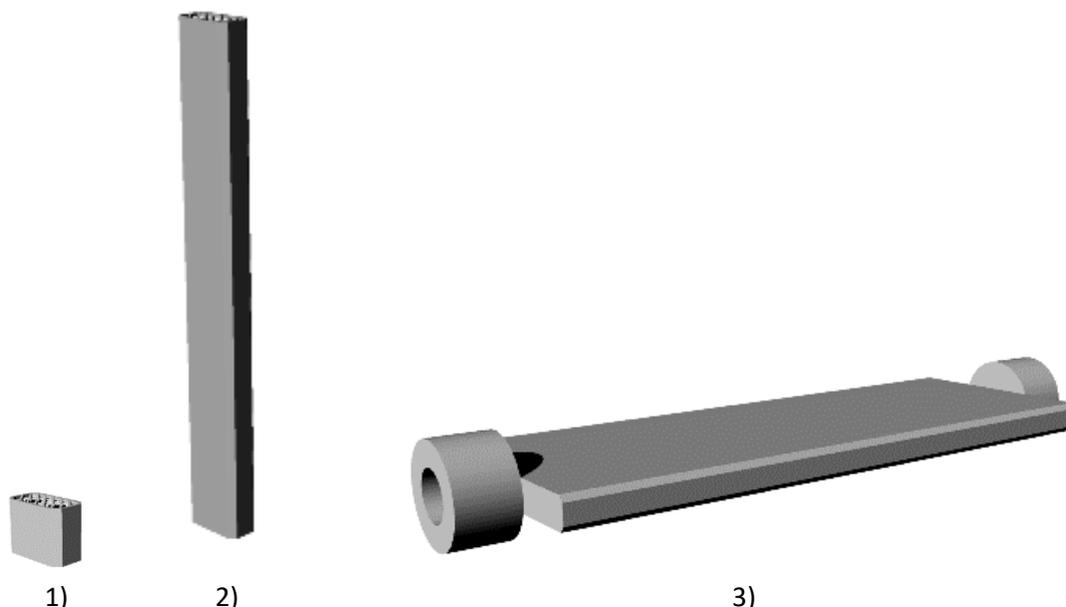


Figura 5 – CAD dei tre prototipi realizzati tramite SLM. 1 2 3

In particolare:

- 1) il primo prototipo di dimensioni $10 \times 12.7 \times 6.8 \text{ mm}^3$ è stato realizzato per studiare la distribuzione di liquido all'interno della struttura porosa
- 2) il secondo prototipo $100 \times 12.7 \times 6.8 \text{ mm}^3$ è stato realizzato per investigare la possibilità di rimuovere i residui del processo di stampa dalla struttura porosa.
- 3) il terzo prototipo $100 \times 42.8 \times 6.8 \text{ mm}^3$ è invece un vero e proprio dispositivo per lo scambio termico ed è uno scambiatore di calore del tipo Flat Heat Pipe (FHP). Il tipo di geometria è stato scelto perché è quello che meglio si adatta all'applicazione del raffreddamento delle CPU.

Tutti e tre i prototipi sono in alluminio e hanno una struttura interna mostrata in Figura 6b) e basata sulla cella elementare descritta nel paragrafo precedente mostrata in Figura 6a). La struttura capillare oltre ad avere una struttura reticolare con i valori di permeabilità discussi in precedenza forma anche dei macrocanali di forma triangolare lungo la direzione longitudinale del dispositivo e per questo risulta essere una struttura composita. La stampa 3d ha permesso di realizzare la struttura capillare integrata con le pareti esterne del dispositivo. Uno dei problemi riscontrati è dato dalla necessità di rimuovere i residui del processo di stampa che viene normalmente rimosso utilizzando aria compressa. Il primo ed il secondo prototipo sono aperti alle estremità e sono stati realizzati sia per studiare la distribuzione del liquido all'interno della struttura capillare sia per verificare la possibilità di rimuovere la polvere residua.

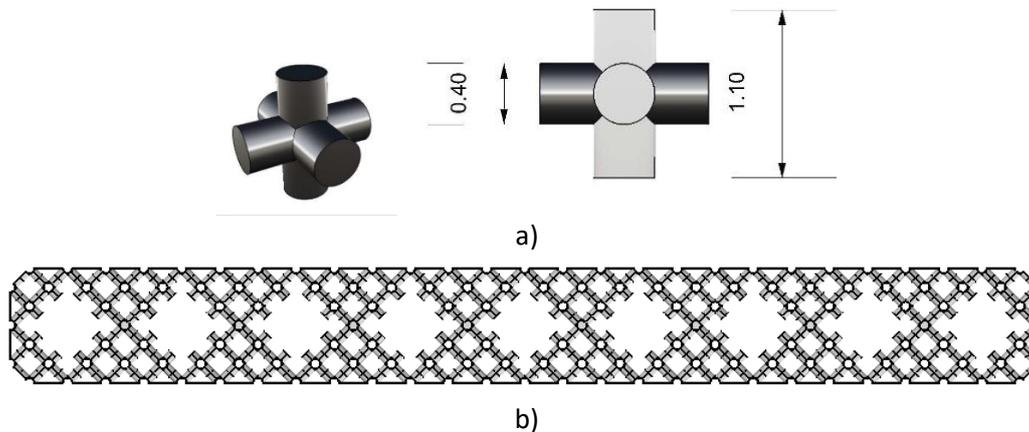


Figura 6 – Cella elementare e quote della cella elementare in millimetri a), struttura capillare del prototipo finale b).

In Figura 7 sono mostrate le dimensioni del prototipo finale. Per poter garantire il corretto funzionamento il dispositivo deve essere opportunamente riempito con un fluido di lavoro. E' stato necessario quindi munire il dispositivo con degli ingressi che hanno avuto la duplice funzione di rimozione dei residui del processo di stampa 3d e di ingresso e/o rimozione del fluido di lavoro. Questo è stato realizzato attraverso dei fori connessi a dei connettori commerciali mostrati in figura 8a). Un sistema di microtubi collega inoltre il connettore direttamente alle strutture porose e permettono il passaggio dell'aria compressa. In tabella 3 sono mostrate le dimensioni finali dei tre prototipi e le caratteristiche principali.

Tabella 3 Dimensioni finali dei tre prototipi realizzati.

	L (mm)	W (mm)	H (mm)	Raggio idraulico (μm)	N° canali
Prototipo 1	10	12.7	6.8	350	2
Prototipo 2	100	12.7	6.8	350	2
Prototipo 3	100	42.8	6.8	350	9

Il disegno del prototipo finale è composto da circa 87500 superfici ed ha richiesto un notevole sforzo sia in termini di risorse informatiche che di stampa 3d. In figura 9 vengono mostrati i tre prototipi realizzati tramite SLM.

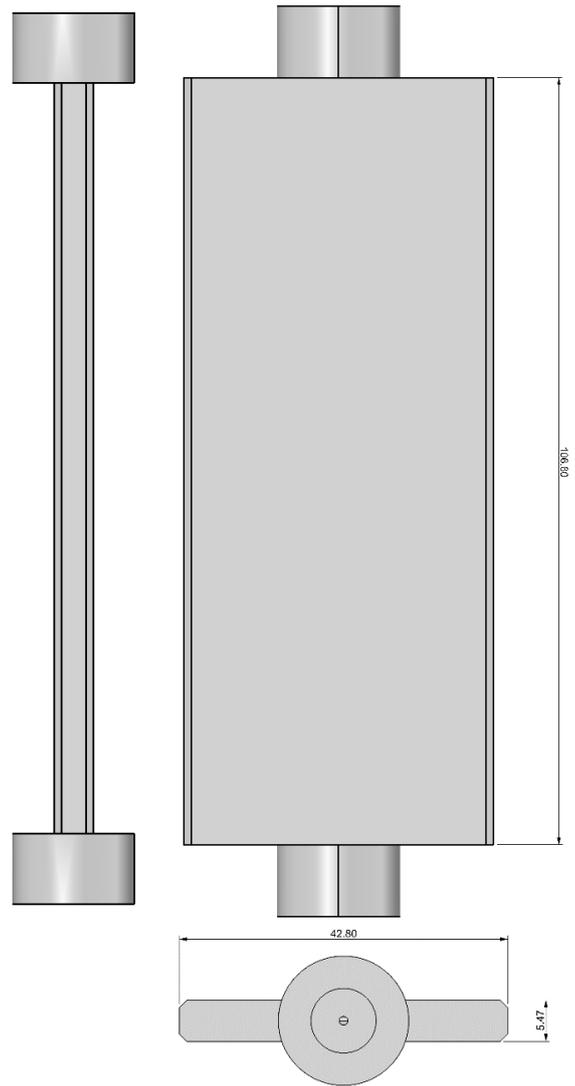


Figura 7 – prototipo di FHP da realizzare tramite tecniche AM.

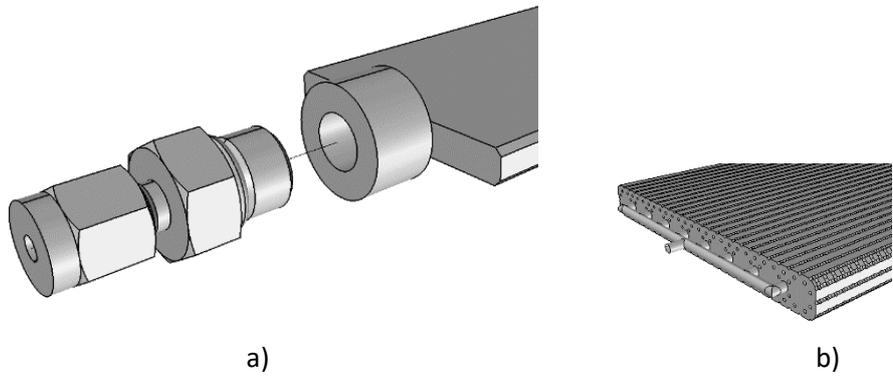


Figura 8 – Particolari del sistema di riempimento utilizzato nel caso di prototipo di heat pipe di tipo flat.

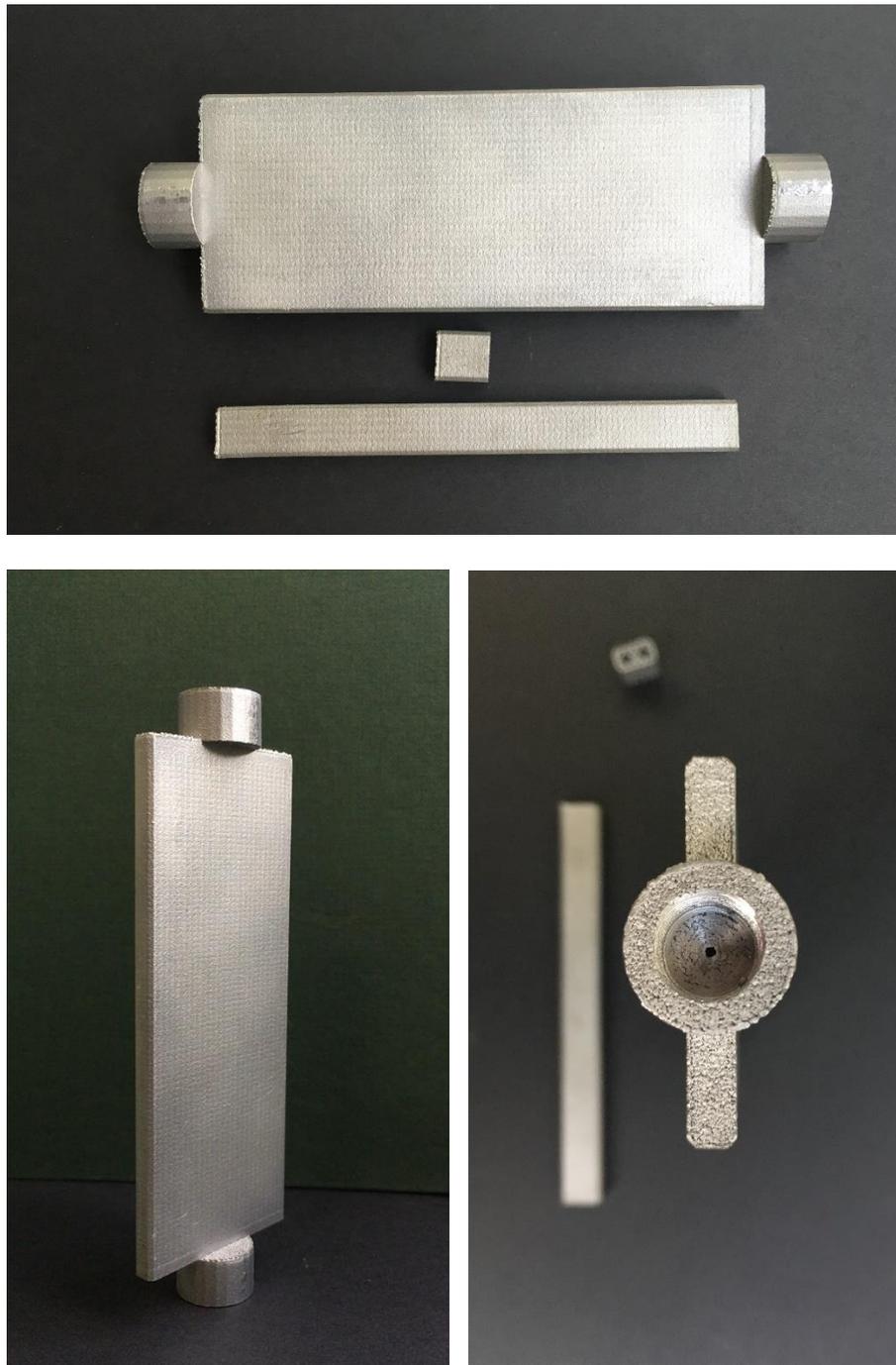


Figura 9 – prototipi realizzati in lega di alluminio AlSi10Mg-0403 tramite SLM.

Tutti e tre i prototipi sono stati sottoposti a dei test sperimentali descritti di seguito.

2.2.2 Visualizzazione della distribuzione di liquido

Per visualizzare la distribuzione di liquido in condizioni statiche è stata utilizzata una microcamera (risoluzione 752 x 582 pixels) equipaggiata con una lente macroscopica (zoom 6.5x). Il dispositivo (prototipo 1 in Fig. 2) è stato retroilluminato con un diffusore. In figura 10 sono mostrati i risultati ottenuti considerando l'etanolo come liquido di lavoro. In particolare a partire da una condizione a secco (Figura 10 a)) il setto poroso è stato riempito con etanolo e successivamente lasciato evaporare (Figura b) ,c) d)).

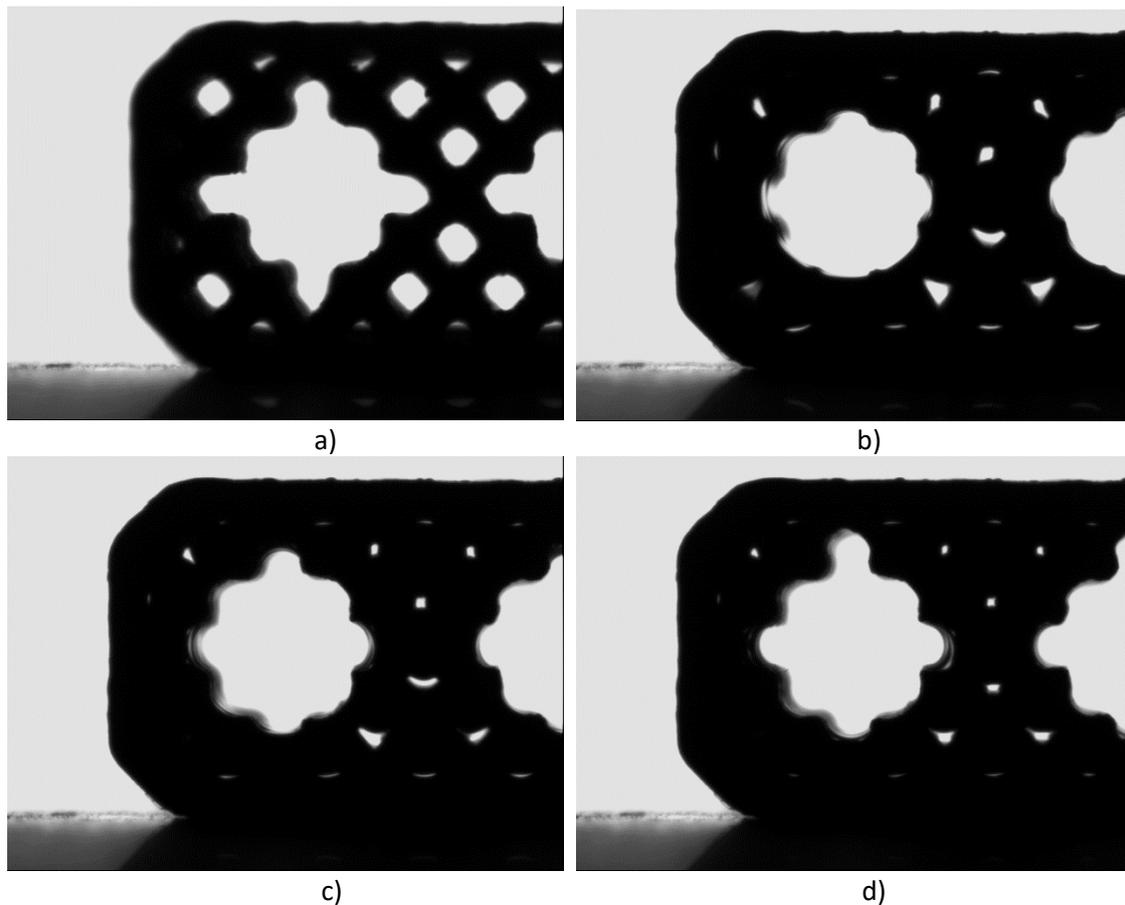


Figura 10 – evaporazione del liquido di lavoro all’interno della struttura capillare. a) prototipo 1 senza liquido di lavoro, b) con liquido di lavoro.

Il raggio idraulico relativamente piccolo è sufficiente a trattenere il liquido di lavoro che forma dei menischi all’interno della struttura porosa. A causa della volatilità dell’etanolo, l’evaporazione fa sì che questi menischi recedano all’interno della struttura porosa. È comunque evidente l’effetto della gravità che parzialmente modifica la distribuzione di liquido durante l’evaporazione.

2.2.3 Setup sperimentale

Il prototipo finale mostrato in figura 11a) è stato munito di due connettori Swagelok che hanno la funzione di connettere il sistema ad un sistema di riempimento descritto nei paragrafi successivi. Il setup sperimentale, figura 11b) è costituito da:

1. Alimentatore
2. Bagno termostatico (HAAKE – MOD. DC3)
3. Data Logger (Keithley 7200)
4. Pompa da vuoto (BOC Edwards XDS5)
5. Termocamera (FLIR Thermocam P40)
6. Prototipo a sua volta montato su di un banco ottico per poterne regolare l’orientazione

L’alimentatore viene utilizzato per alimentare una sorgente calda tramite dei riscaldatori elettrici, mentre il bagno termostatico raffredda una sorgente fredda. La pompa da vuoto è stata utilizzata per evacuare il

prototipo finale mentre la termocamera e il data logger sono stati utilizzati per misurare la temperatura superficiale del prototipo e le temperature della sorgente calda e della sorgente fredda.

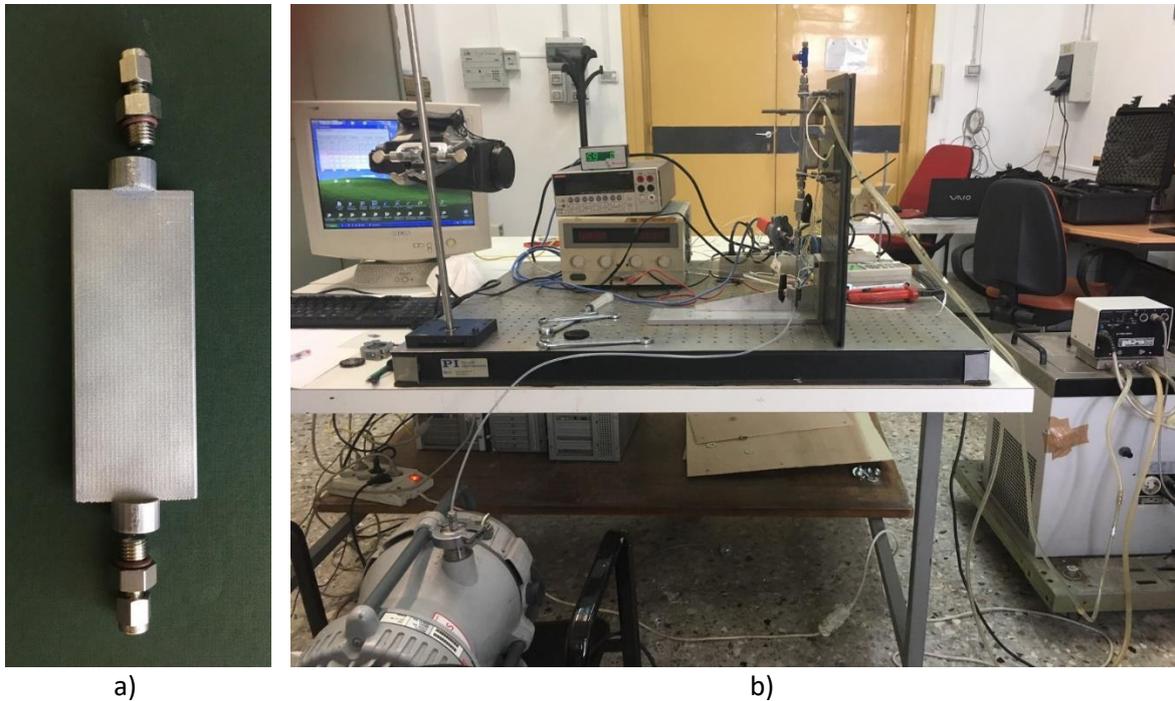


Figura 11 – setup sperimentale allestito per le misure di resistenza e costituito da un alimentatore, un bagno termostatico, un data logger, una pompa da vuoto ed il prototipo.

Il prototipo mostrato in figura 12 è stato equipaggiato con un evaporatore costituito da un blocchetto di alluminio di dimensioni 50x40mm nel quale sono inseriti due riscaldatori a cartuccia alimentati dal power supply, un condensatore delle stesse dimensioni dove viene fatta circolare acqua a temperatura costante (la temperatura dell'acqua è controllata attraverso il criostato), e due termocoppie di tipo K inserite all'evaporatore ed al condensatore che consentono la misura della differenza di temperatura (ΔT) tra l'evaporatore e il condensatore.

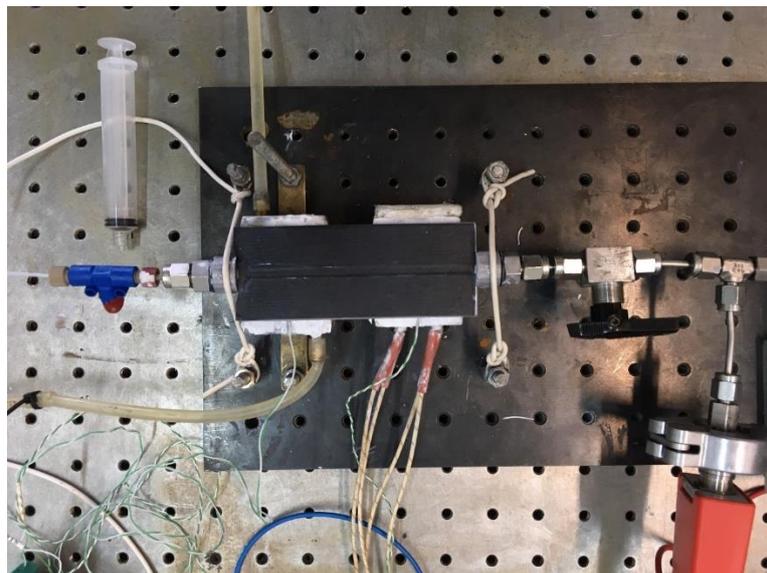


Figura 12 – Setup sperimentale. Il prototipo viene riscaldato e raffreddato alle due estremità utilizzando dei riscaldatori a cartuccia

Il setup permette sia il riempimento del prototipo con un opportuno liquido di lavoro attraverso un sistema di riempimento sia l'analisi delle prestazioni attraverso la misura di Resistenza Termica (RT). È stato inoltre coperto con del nastro adesivo di colore nero per massimizzare l'emissività superficiale e poter essere analizzato tramite la termocamera ad infrarosso.

2.2.4 Prove di vuoto e di riempimento

Il sistema è stato sottoposto a prove di vuoto e di riempimento. La figura 13 mostra il prototipo durante la prova. Il tubo di calore è connesso tramite delle valvole ad un sensore di pressione, a sua volta collegato alla pompa da vuoto e ad una siringa riempita con il liquido di lavoro. Durante la prova il dispositivo è stato evacuato fino a pressioni di 1mbar.

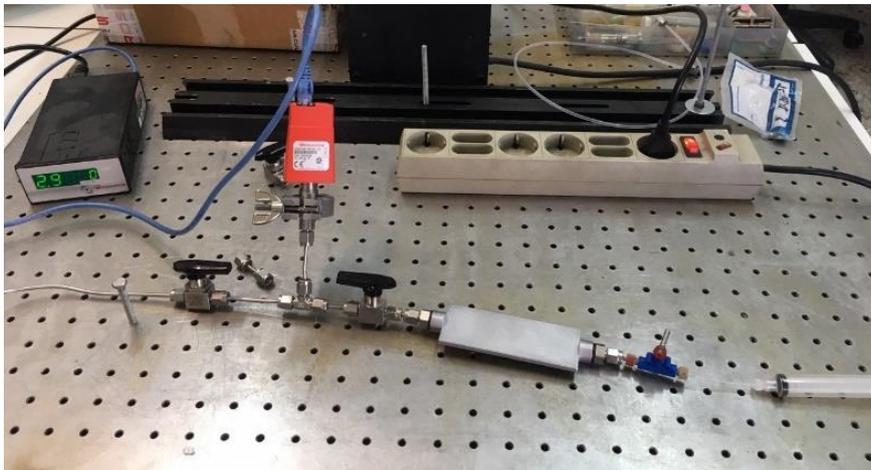


Figura 13 – prototipo di FHP durante la prova di vuoto.

Il sistema è stato successivamente riempito con un 1ml di etanolo e testato a potenza fissa senza l'ausilio del condensatore. La temperatura superficiale è stata acquisita tramite la termocamera settando un'emissività pari ad 1.

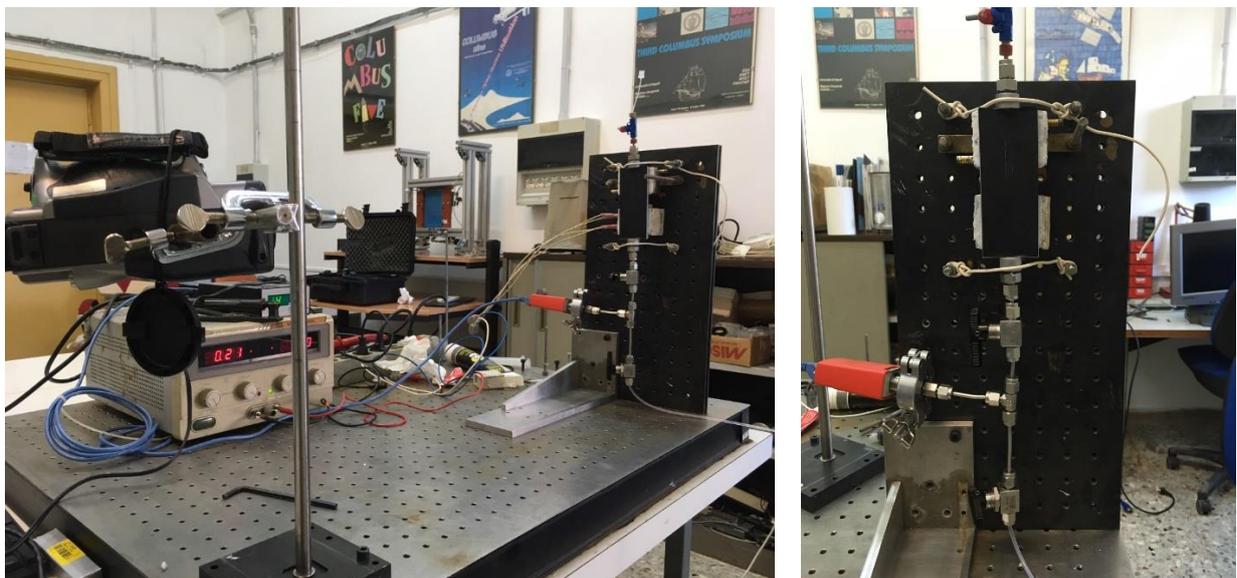


Figura 14 – Impianto sperimentale durante la fase di riempimento.

La figura 15 mostra i risultati sperimentali ottenuti senza liquido di lavoro Figura 15a) e dopo la fase di riempimento, Figura 15b).

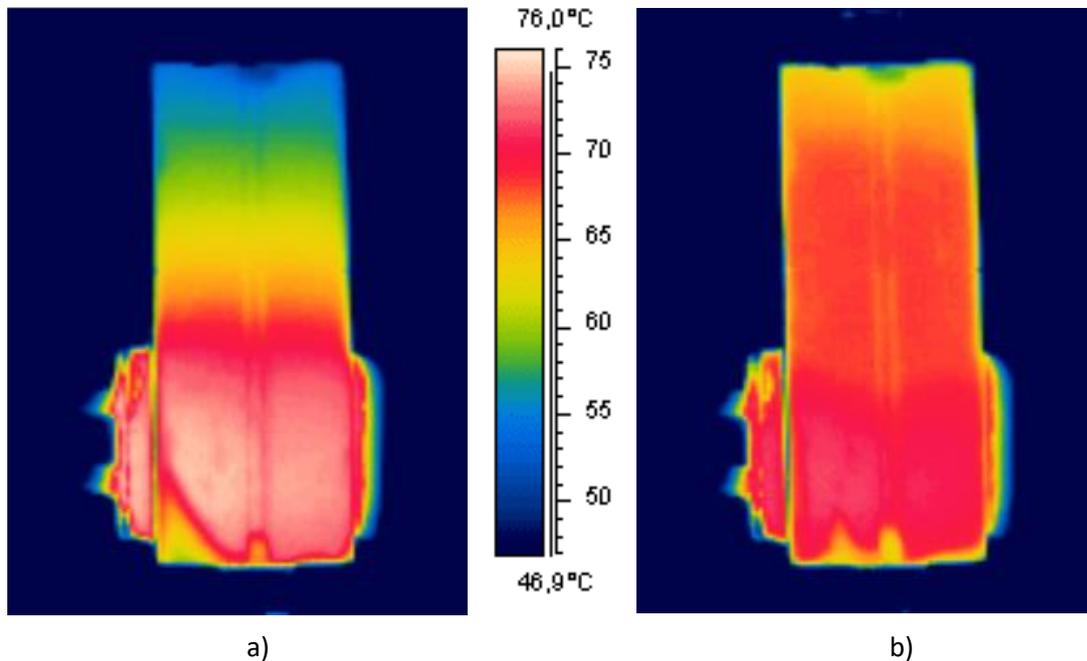


Figura 15 – immagini termografiche prima a) e dopo b) la fase di riempimento.

La distribuzione pressoché uniforme della temperatura superficiale in Figura 15b) mostra il corretto funzionamento del dispositivo. Il trasporto di calore dall'evaporatore verso il condensatore è infatti dovuto al processo di evaporazione e condensazione del liquido di lavoro.

2.2.5 Risultati sperimentali

Test preliminari sono stati condotti al variare del volume di liquido col fine di ottimizzarne le prestazioni, valutate in termini di Resistenza Termica (RT) definita dalla relazione

$$RT = \frac{\Delta T}{Q}$$

Dove ΔT è la differenza di temperatura tra evaporatore e condensatore e Q è la potenza in input. In Figura 16 viene mostrata come varia la resistenza termica (RT) al variare del volume di liquido considerando una potenza all'evaporatore di 15 Watt ed una temperatura al condensatore fissa a 20°C. Il dispositivo è stato disposto in una configurazione verticale.

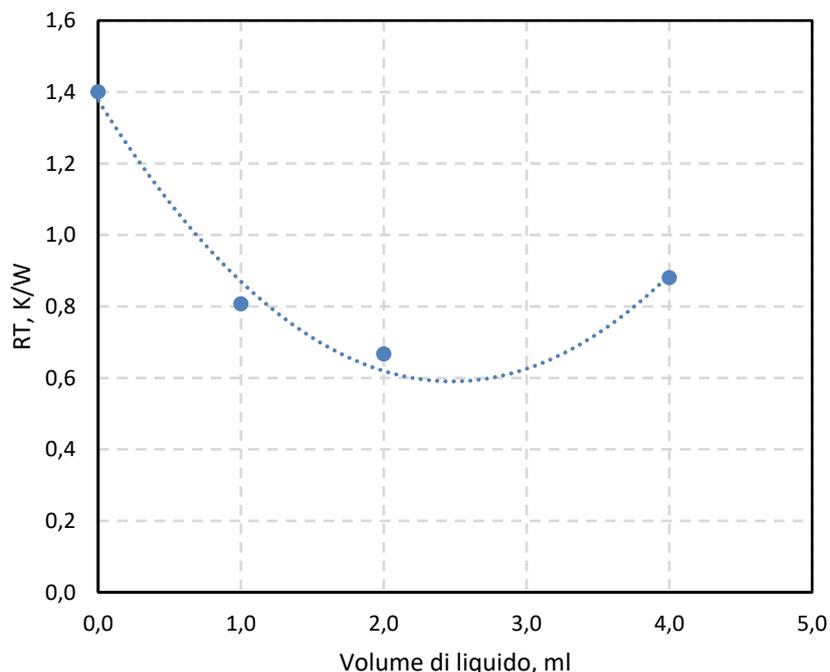


Figura 16 – RT al variare del volume di liquido all’interno della struttura porosa. Potenza all’evaporatore di 15 Watt, temperatura al condensatore fissa a 20°C.

Successivamente sono stati eseguite delle prove sperimentali sia in configurazione verticale che orizzontale. La temperatura al condensatore è stata fissata a 20°C mentre la potenza in input è stata fatta variare in un range di 0-20 Watt. Nella tabella 3 vengono riportati i risultati sperimentali in termini di resistenza termica.

Tabella 4 Resistenze termiche

Potenza in input [W]	Temperature difference [K]		RT [K/W]	
	Configurazione verticale	Configurazione orizzontale	Configurazione verticale	Configurazione orizzontale
10.01	7.5	7.7	0.75	0.77
15.10	8.4	8.2	0.56	0.54
21.15	9.2	9.3	0.46	0.46

Nei regimi di potenza considerati, il prototipo ha mostrato un buon funzionamento sia in configurazione verticale che orizzontale mostrando valori di resistenza simili in entrambi le configurazioni. Questo lo si deve alla struttura capillare presente realizzata nel dispositivo tramite stampa 3d.

3 CONCLUSIONI

In questa linea di attività l'obiettivo principale è stato quello di realizzare uno scambiatore di calore bifase passivo di tipo flat utilizzando tecniche di Additive Manufacturing. Lo scambiatore di calore è stato realizzato in lega d'alluminio utilizzando la tecnica Selective Laser Melting ed è stato munito di una struttura capillare composita basata su una geometria regolare di tipo tetraedrica. Sono stati inoltre sviluppati degli apparati sperimentali che hanno permesso di osservare la risalita capillare all'interno della geometria tetraedrica, la distribuzione del liquido all'interno della struttura capillare e la resistenza termica del prototipo finale. In particolare, è stato messo in evidenza:

- L'utilizzo della stampa 3d permette di realizzare geometrie complesse
- Attraverso tecniche AM la struttura capillare può essere integrata e realizzata direttamente assieme al dispositivo
- È possibile controllare accuratamente la porosità della struttura capillare fino a raggi idraulici dell'ordine di 350 micron

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] A. Faghri, Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology, J. Heat Transfer. Dec 2012, 134(12): 123001 (18 pages)
- [2] D. Reay, P. Kew, Heat Pipes – Theory, Design and Applications, 5th ed., Ed. Elsevier, 2006, Burlington, MA, USA.
- [3] D. Jafari, W. W. Wits, The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 91, August 2018, Pages 420-442
- [4] Chor Yen Yap, K. Z. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews 2, 041101 (2015).
- [5] Cecere A., Savino R., Analisi dei requisiti di tubi di calore stampati tramite tecniche di additive manufacturing, Rapporto tecnico, 2019.
- [6] D. Jafari, W. W. Wits and B. J. Geurts, An investigation of porous structure characteristics of heat pipes made by additive manufacturing" 2017 23rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/THERMINIC.2017.8233841.
- [7] D. Deng, Y. Tang, G. Huang, L. Lu, D. Yuan, Characterization of capillary performance of composite wicks for two-phase heat transfer devices, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 56, Issues 1–2, 1 January 2013, Pages 283-293.
- [8] Z. Lanc, B. Strbac, M. Zeljkovic, A. Zivkovic, M. Hadzistevic, EMISSIVITY OF ALUMINIUM ALLOY USING INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUE, Materials and Technologies MTAEC9, 52(3)323(2018).
- [9] D. Brutin, Z. Q. Zhu, O. Rahli, et al., Evaporation of Ethanol Drops on a Heated Substrate Under Microgravity Conditions, Microgravity Science and Technology 22(3):387-395.

5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI

AM Additive Manufacturing

FHP Flat Heat Pipe

RT Resistenza Termica

SLM Selective Laser Melting