

Ricerca di Sistema elettrico



Analisi delle prestazioni di tubi di calore realizzati tramite
tecniche di Additive Manufacturing (LA3.7)

Anselmo Cecere



Analisi delle prestazioni di tubi di calore realizzati tramite tecniche di Additive Manufacturing

ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI TUBI DI CALORE REALIZZATI TRAMITE TECNICHE DI ADDITIVE MANUFACTURING (LA3.7)

A. Cecere

Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: *1.4 Materiali di frontiera per usi energetici*

Linea di attività: 3.7

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile del Work Package: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile Linea di Attività: Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 36

Mese fine previsto: 13

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Analisi delle prestazioni di tubi di calore realizzati tramite tecniche di Additive Manufacturing"

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	4
3	Prodotti attesi	4
4	Prodotti sviluppati	5
5	Sintesi delle attività svolte	5
6	Dettaglio delle attività svolte.....	5
6.1	Analisi tomografica	5
6.2	Analisi delle prestazioni termiche	6
6.3	Stampa di strutture capillari in rame	10
6.4	Analisi microscopica e tomografica delle strutture capillari	12
7	Eventi di disseminazione	15

Indice delle figure

Figura 1 – Ricostruzione tomografia di un prototipo di tubo di calore di tipo flat realizzato in lega di alluminio AlSi10Mg con tecniche di stampa 3d. L'analisi ha mostrato l'assenza delle polveri residue dopo il processo di stampa. a) vista del prototipo finale, b) ricostruzione digitale del prototipo di scambiare di calore, c) visualizzazione della struttura interna.	6
Figura 2 – Apparato sperimentale per il riempimento e la misura della resistenza termica dello scambiatore di calore: a) stampa delle strutture di supporto per la zona adiabatica, b) vista dell'evaporatore e del condensatore, c) apparato sperimentale durante la fase di test.	7
Figura 3 – Disegno del setup sperimentale utilizzato per la misura di resistenza termica. a) vista esplosa, b) posizione delle termocoppie lungo lo scambiatore di calore.	8
Figura 4 – Temperature misurate lungo la parete dello scambiatore di calore al variare della potenza in input.	9
Figura 5 – Temperature misurate lungo la parete del tubo di calore con ed in assenza di un liquido di lavoro per una potenza all'evaporatore di 20 Watt.	10
Figura 6 – Esempi di giroidi con diverse porosità.	11
Figura 7 – Disegno di strutture capillari con geometrie di tipo lattice (in figura vengono mostrate anche le celle elementari). a) struttura tipo simple cubic, b) struttura di tipo giroide.	11
Figura 8 – Stampa di strutture capillari realizzate in rame, a) prototipi di strutture capillari realizzate in rame con stampa 3d (foto di MORPHICA srl), b) esempi di strutture capillari (giroidi, e struttura simple cubic).	12
Figura 9 – Strutture capillari realizzati in rame al variare del parametro t e quindi della porosità osservate al microscopio ottico. a) microscopio elettronica, b) t=0.6 (porosità 0,61, b) t=0.7 (porosità 0,54, b) t=0.8 (porosità 0,48),	13
Figura 10 – Analisi microscopica delle strutture capillari di tipo lattice. a) struttura di tipo cross, b) struttura di tipo giroide.	14
Figura 11 – Analisi tomografica delle strutture capillari di tipo lattice.	15

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Temperature superficiali e resistenza termica misurata durante gli esperimenti in assenza di un liquido di lavoro.	9
Tabella 2 – Temperature superficiali e resistenza termica misurata durante gli esperimenti in presenza di un liquido di lavoro.	9
Tabella 3 – Analisi microscopica delle due strutture capillari.	14

1 Risultati attesi

I tubi di calore sono sistemi passivi per lo scambio termico capaci di trasportare ingenti quantità di calore grazie ai processi di evaporazione e condensazione di un liquido di lavoro. Tradizionalmente realizzati di forma cilindrica, essi trovano applicazione in svariati campi dell'ingegneria quali la telefonia mobile, il raffreddamento delle CPU, l'efficientamento energetico degli edifici, e l'ingegneria satellitare. I temi sviluppati nell'ambito del programma di ricerca PTR 2022-24 riguardano la possibilità di utilizzare tecniche di Additive Manufacturing (AM) per la realizzazione di tubi di calore o di alcuni suoi componenti. I possibili vantaggi sono legati sia alla possibilità di realizzare dispositivi e strutture capillari con geometrie complesse, virtualmente di ogni forma, sia alla possibilità di aumentarne le prestazioni ottimizzando la fluidodinamica interna con delle geometrie ad hoc. L'uso della stampa 3D permette infatti la stampa diretta del dispositivo, senza la necessità di assemblarlo 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. Inoltre, la forma del dispositivo può essere adattata alla particolare applicazione ed, in futuro, tali dispositivi, potranno sostituire i tubi di calore normalmente utilizzati in applicazioni quali l'efficientamento energetico dei fabbricati ed i sistemi di raffreddamento delle auto elettriche. Nel corso delle attività saranno sviluppati e testati scambiatori di calore ed alcuni suoi componenti, realizzati utilizzando tecniche di Additive Manufacturing, tenendo conto dei limiti tecnologici imposti dalla stampa 3d dei metalli e utilizzando le tecniche di stampa attualmente disponibili sul mercato. Le prestazioni termiche saranno analizzate sperimentalmente mediante opportuni setup sperimentali mentre la fedeltà di stampa sarà analizzata con tecniche avanzate di diagnostica ottica (microscopia e tomografia computerizzata).

2 Risultati ottenuti

Le attività di ricerca condotte durante il progetto sono state:

- ricostruzione tridimensionale di un prototipo di scambiatore di calore di tipo flat realizzato con tecniche di stampa additiva in lega di alluminio AISi10Mg-0403, ottenute attraverso tecniche di tomografia computerizzata;
- allestimento di un apparato sperimentale per il riempimento e la misura della resistenza termica dello scambiatore di calore;
- stampa con tecnica DMLS di geometrie capillari complesse basate su strutture lattice (celle cubiche, giroidi ed altre) utilizzando come materiale il rame, scelto principalmente per le sue eccellenti capacità termiche;
- analisi microscopica e tomografica delle strutture realizzate.

3 Prodotti attesi

- Ricostruzione tridimensionale di prototipi di scambiatori di calore stampati con tecniche di additive manufacturing
- Realizzazione mediante DMLS di un prototipo di scambiatore di calore

- Allestimento set-up sperimentale per verifica di funzionamento
- Misure di scambio termico

4 Prodotti sviluppati

Nel corso delle attività sono state disegnate e stampate diversi tipi di strutture capillari basate su strutture lattice utilizzando come materiale di riferimento il rame. È stato inoltre allestito un apparato sperimentale per l'analisi delle prestazioni termiche di scambiatori di calore di tipo flat.

5 Sintesi delle attività svolte

Nell'ambito del programma PTR 2022-24 le attività di ricerca hanno riguardato l'utilizzo di tecniche di Additive Manufacturing per la stampa di tubi di calore e di alcuni suoi componenti. Tali dispositivi vengono generalmente realizzati in metallo quali il rame o l'alluminio, ed hanno la possibilità di trasportare ingenti quantità di calore grazie al processo di evaporazione e condensazione di un fluido di lavoro. Sebbene le possibilità offerte dalla stampa 3d siano virtualmente infinite, l'applicazione di tale tecnologia allo sviluppo di scambiatori di calore bifase presenta ancora dei grossi limiti legati alle risoluzioni di stampa. Nel corso delle attività sono state analizzate le prestazioni termiche di uno scambiatore di calore di tipo flat realizzato in lega di alluminio. La fedeltà di stampa è stata analizzata utilizzando tecniche tomografiche. Sono state inoltre realizzate delle strutture capillari con geometrie complesse utilizzando come materiale il rame. I risultati hanno mostrato come sia possibile sviluppare scambiatori di calore bifase e strutture capillari complesse utilizzando la stampa 3d.

6 Dettaglio delle attività svolte

6.1 Analisi tomografica

La figura 1a) mostra un tubo di calore realizzato in lega di alluminio AlSi10Mg tramite la tecnica di stampa Selective Laser Melting. Il prototipo di scambiatore di calore è stato realizzato interamente in stampa 3d ed è munito di un sistema microfluidico (non mostrato in figura) per il riempimento e la rimozione delle polveri residue. A valle del processo di stampa, il prototipo è stato sottoposto ad indagine tomografica utilizzando un tomografo a raggi X della Gilardoni S.p.A (Mod-XE-L HE 450). L'analisi tomografica ha permesso sia la ricostruzione digitale del prototipo mostrato in figura 1b), sia l'analisi della qualità di stampa. In particolare, l'analisi non intrusiva della struttura interna, mostrata in figura 1c), ha messo in evidenza l'assenza dei residui di stampa, ovvero di polveri residue che avrebbero potuto ostruire i canali della struttura capillare. In questo caso la struttura considerata è una struttura di tipo lattice.

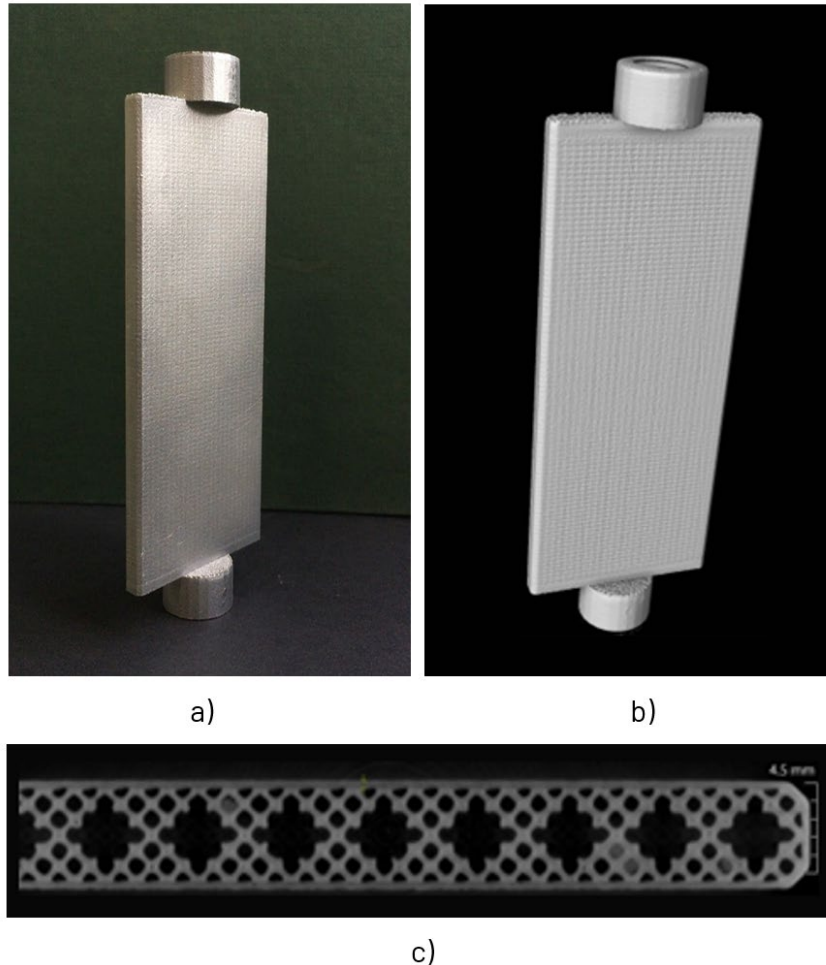


Figura 1 - Ricostruzione tomografia di un prototipo di tubo di calore di tipo flat realizzato in lega di alluminio AISi10Mg con tecniche di stampa 3d. L'analisi ha mostrato l'assenza delle polveri residue dopo il processo di stampa. a) vista del prototipo finale, b) ricostruzione digitale del prototipo di scambiatore di calore, c) visualizzazione della struttura interna.

6.2 Analisi delle prestazioni termiche

I tubi di calore sono composti da una zona calda (evaporatore), una zona fredda (condensatore) ed una zona adiabatica. Il calore viene trasportato dalla zona calda verso la zona fredda, grazie al processo di evaporazione e condensazione di un liquido di lavoro. Le prestazioni del tubo di calore possono essere analizzate misurando la resistenza termica, definita dal rapporto tra la differenza di temperatura fra la zona calda e la zona fredda, e la potenza somministrata all'evaporatore. Per la misura della resistenza termica nel caso di scambiatore di calore di tipo flat, è stato disegnato e sviluppato un opportuno apparato sperimentale mostrato nelle figure 2 e 3.

L'apparato sperimentale consiste di un blocco di materiale isolante, figura 2a), realizzato con l'ausilio di una stampante in resina ad alta risoluzione (Anycubic Photon Mono X2). L'evaporatore ed il condensatore sono stati realizzati entrambi in alluminio e sono stati alloggiati all'interno della struttura in resina tramite degli opportuni inserti, figura 2b). L'evaporatore è stato a sua volta riscaldato con delle resistenze elettriche mentre il condensatore è stato raffreddato tramite un opportuno circuito di raffreddamento collegato ad un bagno termostatico. Una vista esplosa del setup sperimentale viene mostrata nella figura

3a) mentre la figura 3b) mostra la posizione delle diverse termocoppie posizionate lungo la parete del dispositivo.

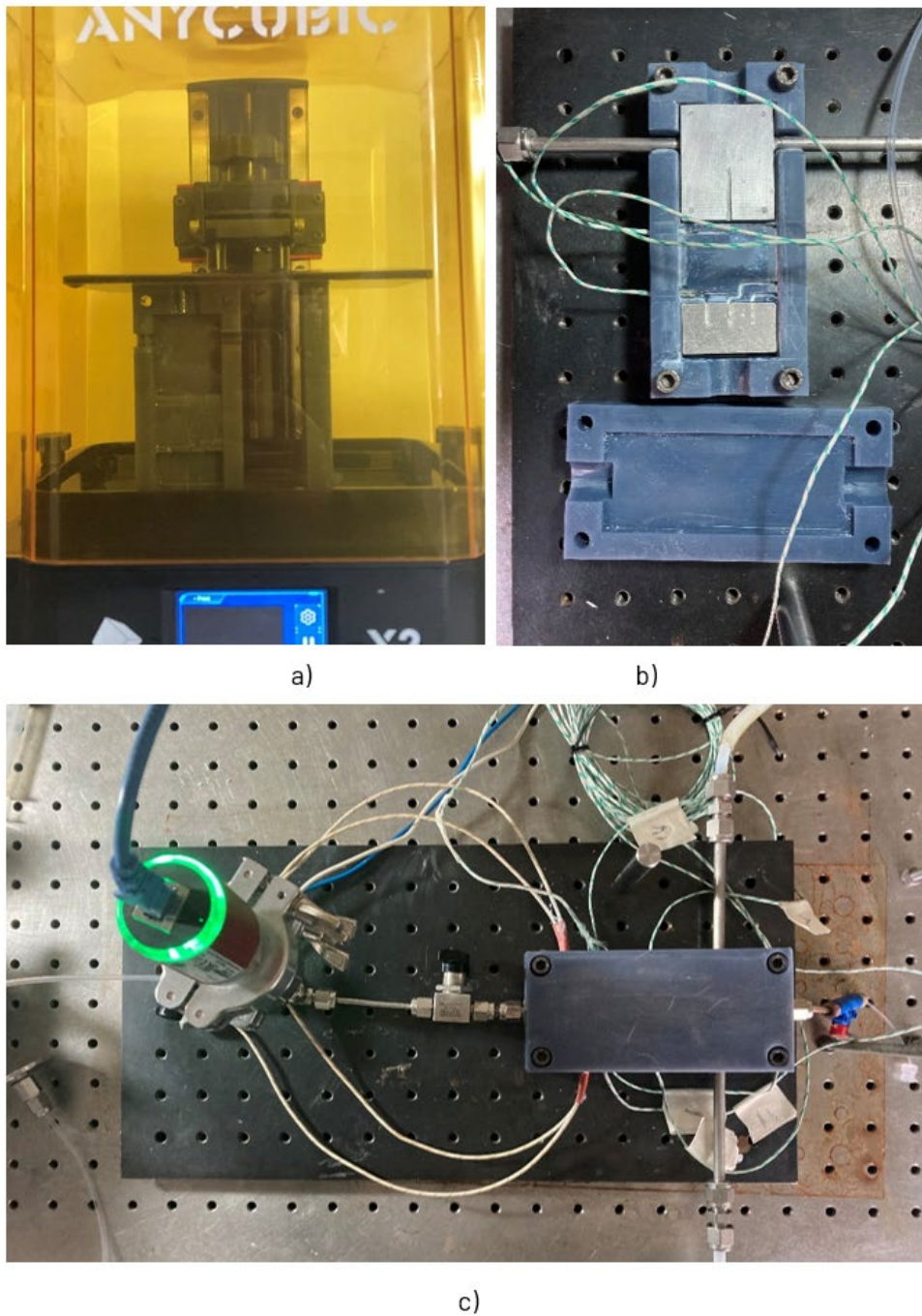


Figura 2 - Apparato sperimentale per il riempimento e la misura della resistenza termica dello scambiatore di calore: a) stampa delle strutture di supporto per la zona adiabatica, b) vista dell'evaporatore e del condensatore, c) apparato sperimentale durante la fase di test.

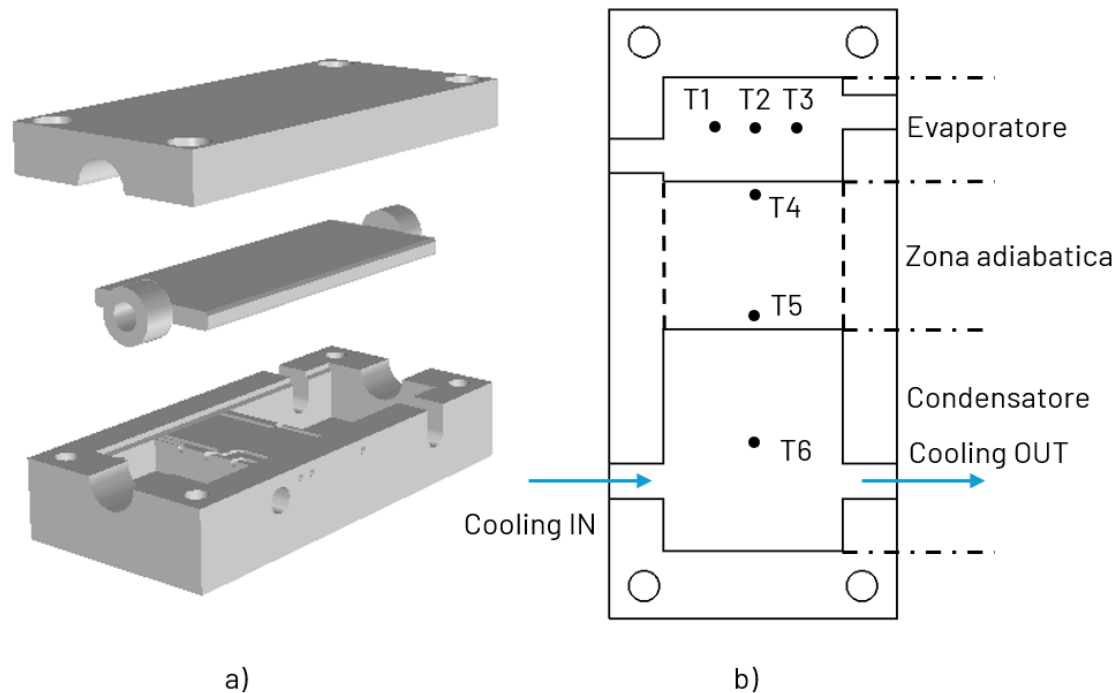


Figura 3 – Disegno del setup sperimentale utilizzato per la misura di resistenza termica. a) vista esplosa, b) posizione delle termocoppie lungo lo scambiatore di calore.

Per la misura della resistenza termica, sono state utilizzate tre termocoppie all'evaporatore (T1, T2 e T3), due nella zona adiabatica (T4 e T5) ed una al condensatore (T6).

Il dispositivo è stato equipaggiato con un sistema microfluidica che, oltre alla rimozione delle polveri, ha permesso il riempimento del dispositivo con un opportuno liquido di lavoro. La procedura sperimentale consiste nell'evacuare il dispositivo tramite un a pompa da vuoto e successivamente riempirlo parzialmente con un liquido di lavoro. il liquido utilizzato è stato l'acetone per le sue proprietà di compatibilità con l'alluminio.

Dopo il riempimento la resistenza termica è stata misurata settando il condensatore ad una temperatura di 10 °C ed aumentando progressivamente la potenza all'evaporatore. La figura 4 mostra le temperature superficiali acquisite durante gli esperimenti mentre le tabelle 4 e 5 vengono mostrano le temperature superficiali acquisite durante gli esperimenti con (tabella 5) ed in assenza di un liquido di lavoro (tabella 4) eseguiti con il dispositivo montato in configurazione orizzontale come mostrato in Figura 2.

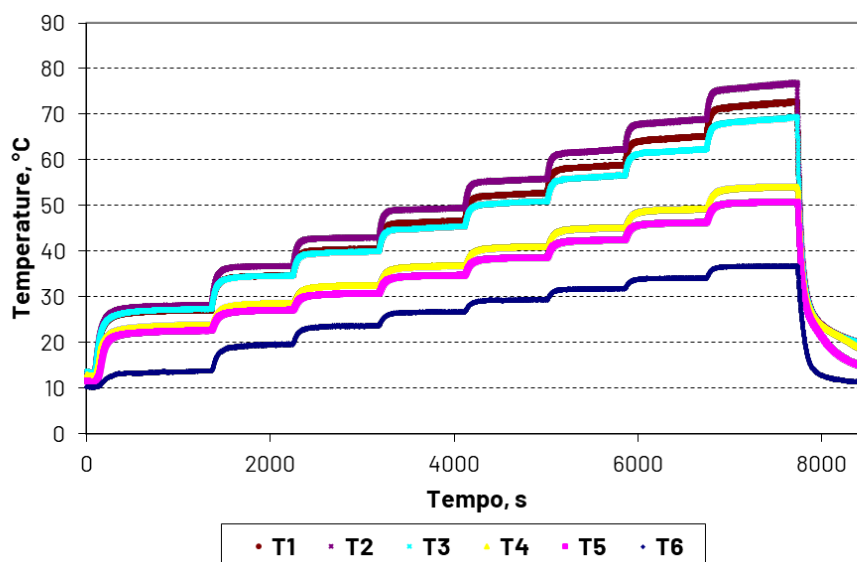


Figura 4 - Temperature misurate lungo la parete dello scambiatore di calore al variare della potenza in input.

Power	T1	T2	T3	T4	T5	T6	DT	R
Watt	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C/Watt
9,9	49,70	49,65	49,22	39,14	24,67	13,13	36,39	3,68
21,12	89,25	88,73	87,60	68,05	39,59	16,15	72,38	3,43
30,34	122,40	121,43	130,67	99,74	46,57	20,06	104,77	3,45

Tabella 1 - Temperature superficiali e resistenza termica misurata durante gli esperimenti in assenza di un liquido di lavoro.

Power	T1	T2	T3	T4	T5	T6	DT	R
Watt	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C/Watt
21,12	34,61	36,69	34,59	28,66	27,17	19,57	15,73	0,74
30,72	40,51	43,02	39,90	32,63	30,87	23,59	17,55	0,57
40,66	46,57	49,39	45,32	36,86	34,80	26,62	20,47	0,50
50,39	52,65	55,68	50,80	41,06	38,70	29,35	23,69	0,47
60,48	58,70	62,14	56,45	45,17	42,50	31,65	27,45	0,45
70,66	64,87	68,68	62,16	49,22	46,31	34,03	31,21	0,44
82,16	72,52	76,47	68,89	54,04	50,79	36,69	35,94	0,44

Tabella 2 - Temperature superficiali e resistenza termica misurata durante gli esperimenti in presenza di un liquido di lavoro.

La figura 5 mostra le temperature superficiali del dispositivo per una potenza di 20 Watt, con ed in assenza di un liquido di lavoro.

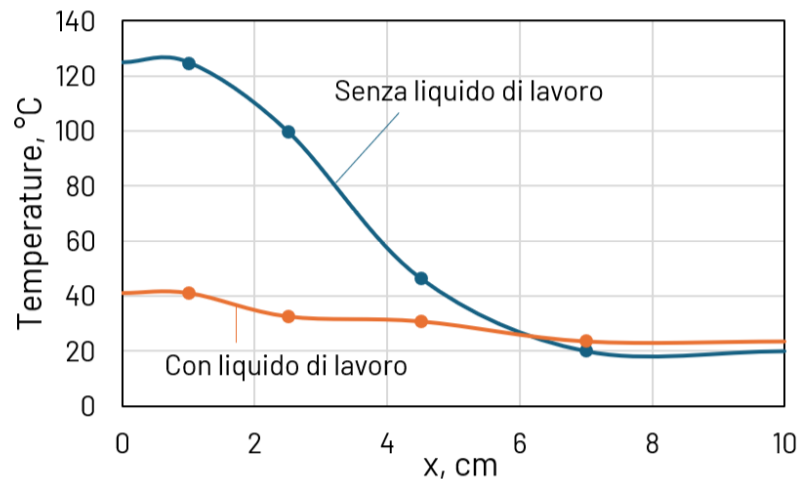


Figura 5 - Temperature misurate lungo la parete del tubo di calore con ed in assenza di un liquido di lavoro per una potenza all'evaporatore di 20 Watt.

Dalla figura si evince il corretto funzionamento del tubo di calore. A parità di potenza, in assenza di liquido c'è una grossa differenza di temperatura tra la zona calda e la zona fredda dovuta prevalentemente alla conduzione all'interno del materiale. Tale differenza di temperatura si abbatte in presenza di un liquido di lavoro, dove il calore viene trasportato grazie ai processi di evaporazione e condensazione del fluido di lavoro. Il tubo di calore ha mostrato un buon funzionamento fino a potenze di 80 Watt con resistenze termiche dell'ordine di 0,5 K/W.

6.3 Stampa di strutture capillari in rame

Uno dei maggiori vantaggi della stampa 3d è legato alla possibilità di poter scegliere le dimensioni ed il tipo di struttura lattice che si vuole ottenere. La struttura capillare può anche assumere geometrie complesse e può essere legata alla particolare applicazione.

Un esempio di geometria complessa è la struttura a forma di giroide. Questi tipi di strutture hanno ricevuto un grosso interesse perché sono completamente definite matematicamente dalla relazione:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\cos\left(\frac{2\pi}{c}z\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{c}z\right)\cos\left(\frac{2\pi}{a}a\right) = t$$

Dove a, b, c sono le dimensioni della cella unitaria e t un parametro che controlla la porosità della cella elementare ϵ . La figura 6 mostra diversi giroidi al variare disegnate variando il parametro t e di conseguenza la porosità.

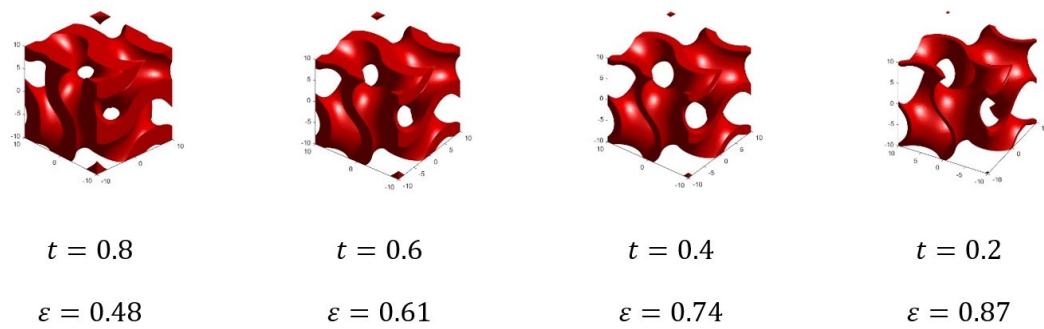


Figura 6 - Esempi di giroidi con diverse porosità.

Sono state realizzate diverse microstrutture capillari di tipo lattice, considerando sia geometrie relativamente semplice quali ad esempio la struttura cross, sia giroidi ottenute sfruttando le proprietà dei giroidi, Figura 7.

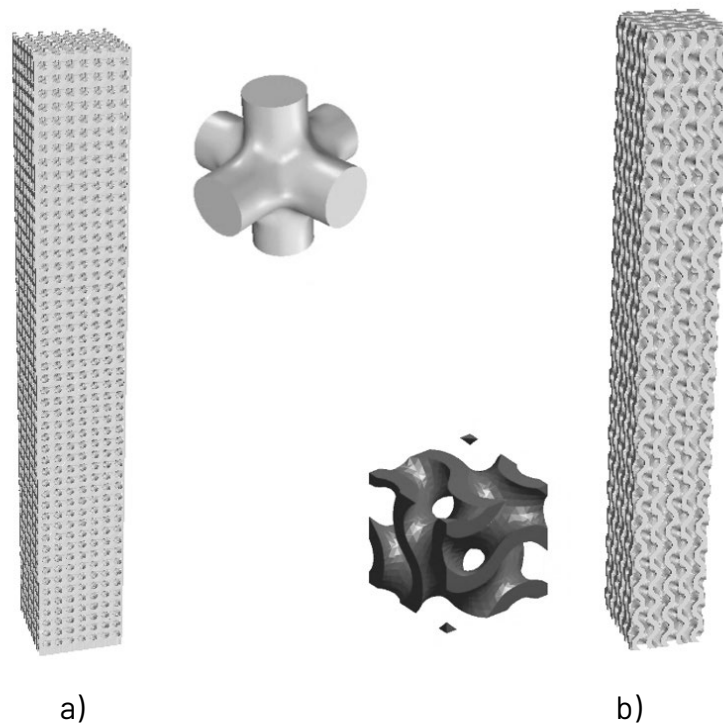
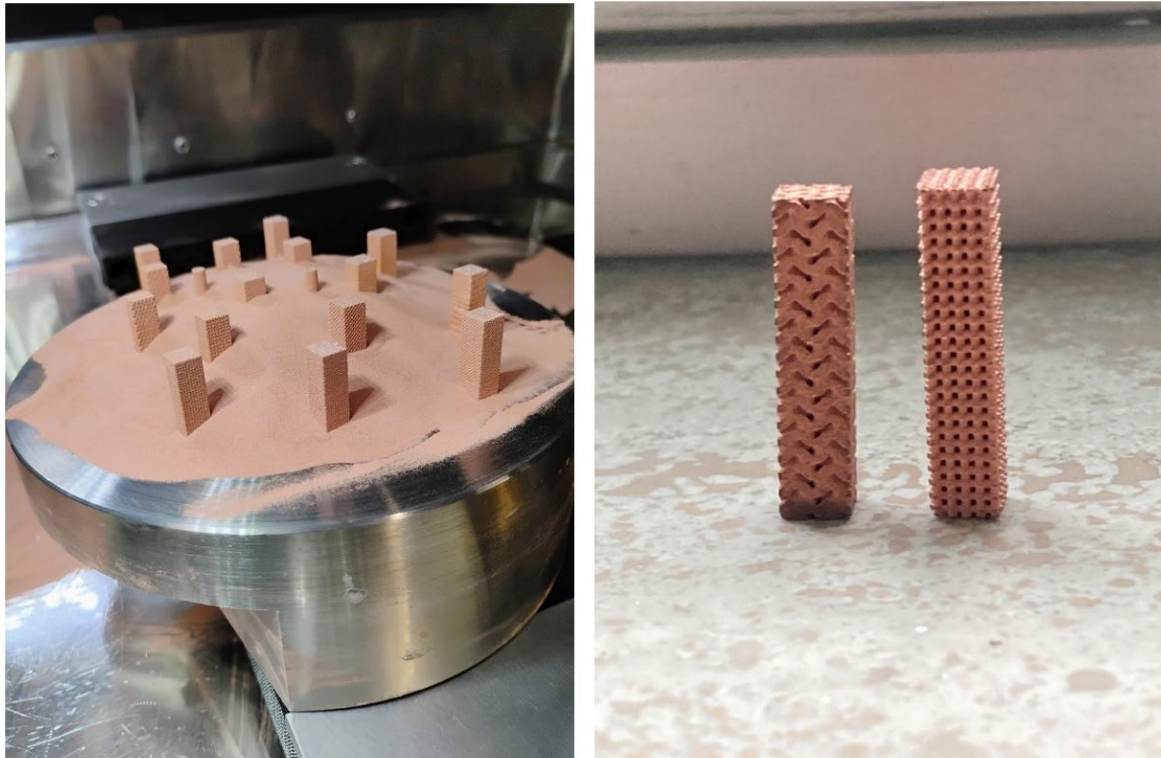


Figura 7 - Disegno di strutture capillari con geometrie di tipo lattice (in figura vengono mostrate anche le celle elementari). a) struttura tipo simple cubic, b) struttura di tipo giroide.



a)

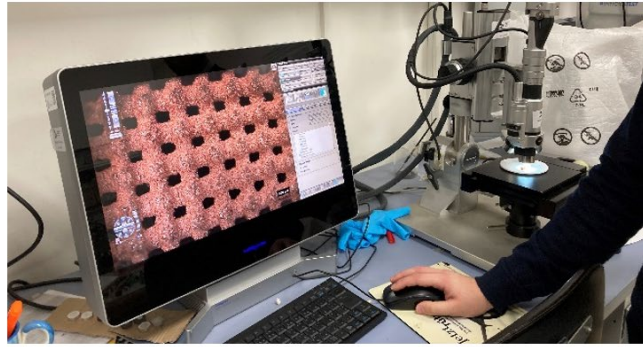
b)

Figura 8 – Stampa di strutture capillari realizzate in rame, a) prototipi di strutture capillari realizzate in rame con stampa 3d (foto di MORPHICA srl), b) esempi di strutture capillari (giroidi, e struttura simple cubic).

Le strutture capillari sono state successivamente stampate in rame, scelto prevalentemente per le sue eccellenti proprietà termiche, Figura 8. Purtroppo, però, la stampa 3D del rame ha presentato diverse difficoltà, principalmente dovute alle sue proprietà fisiche e chimiche uniche. L'alta riflettività, la conduttività termica e la tendenza alla formazione di ossidi rappresentano ostacoli significativi per i processi di fusione laser e altre tecniche di stampa 3D. Questi problemi sono stati in parte risolti utilizzando una stampante dotata di un laser verde, che consente di lavorare il rame puro, leghe di rame e materiali altamente riflettenti.

6.4 Analisi microscopica e tomografica delle strutture capillari

Un'analisi preliminare sulle possibilità di stampa è stata eseguita stampando strutture di tipo lattice basate su diverse geometrie e con diversi gradi di porosità interna. Le figura 9b), 9c) e 9d) mostrano diverse strutture lattice di tipo gioidale con diversi valori di porosità ottenute variando il parametro t . Le immagini sono state ottenute con un microscopio digitale Hirox (mod. KH-8700), mostrato in figura 9a).



a)



b)

c)

d)

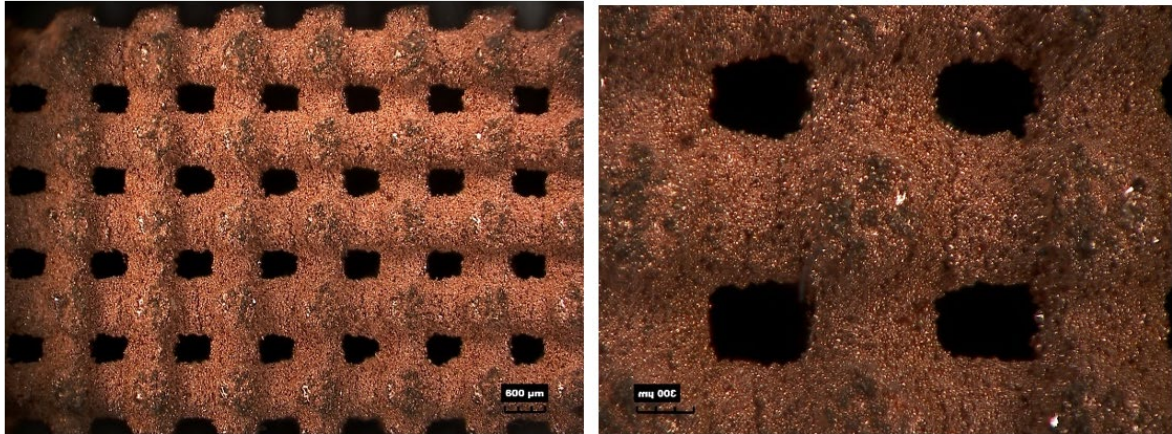
Figura 9 – Strutture capillari realizzati in rame al variare del parametro t e quindi della porosità osservate al microscopio ottico. a) microscopio elettronica, b) $t=0.6$ (porosità 0,61), c) $t=0.7$ (porosità 0,54), d) $t=0.8$ (porosità 0,48),

E' evidente come al diminuire della porosità si ha una perdita nella risoluzione di stampa fino alla quasi impossibilità di realizzare la stampa stessa. La figura 10 mostra le strutture lattice che hanno mostrato una buona fedeltà di stampa. In particolare, utilizzando il rame, sono state ottenute due tipi di strutture lattice:

1) una struttura capillare di tipo cross con raggi capillari dell'ordine dei 250 microns e spessore delle pareti di 650 microns

2) un giroide anch'esso con raggi capillari dell'ordine di 350 microns e spessore delle pareti di 700 microns

Entrambe le strutture sono state sottoposte ad analisi microscopica e tomografica. I risultati vengono mostrati nella tabella 3 ed in figura 11. In particolare, l'analisi tomografica ha mostrato, ancora una volta, l'assenza di polvere dovuta ai residui di stampa e questo dimostra come sia possibile ottenere strutture capillari di geometrie complesse in rame utilizzando la stampa 3d.



a)



b)

Figura 10 – Analisi microscopica delle strutture capillari di tipo lattice. a) struttura di tipo cross, b) struttura di tipo giroide.

Tipo di struttura	Raggio capillare, microns	Spessore pareti, microns
Cross	250	650
Giroide	250	700

Tabella 3 – Analisi microscopica delle due strutture capillari.

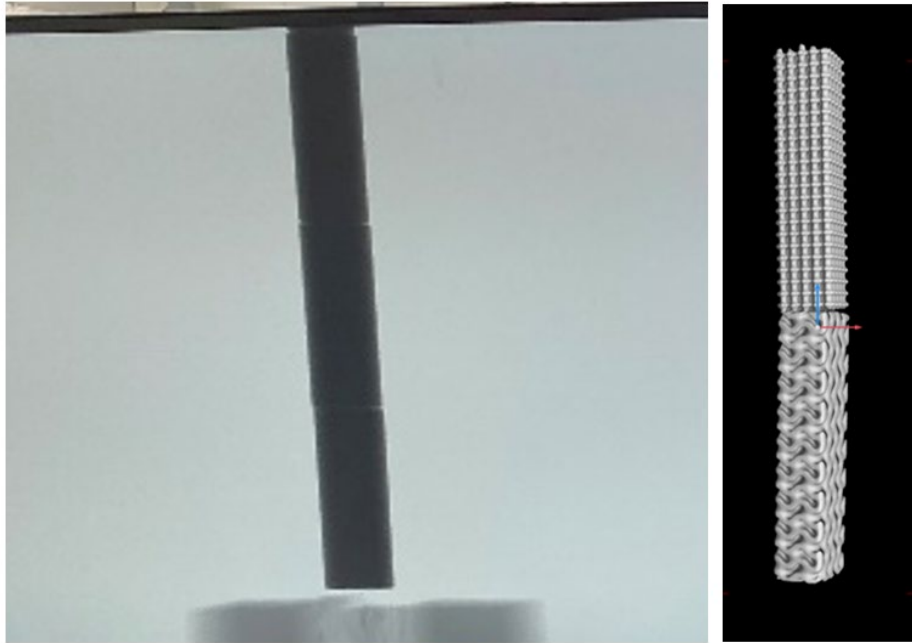


Figura 11 - Analisi tomografica delle strutture capillari di tipo lattice.

7 Eventi di disseminazione

Cecere Anselmo, Fluidi Self-ReWetting: risultati sperimentali e applicazioni spaziali, Physical Sciences, Agenzia Spaziale Italiana, 30-31 gennaio 2023.