



Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi dei requisiti di tubi di calore stampati tramite tecniche di additive manufacturing

Anselmo Cecere, Raffaele Savino



DIPARTIMENTO DI  
INGEGNERIA  
INDUSTRIALE

## ANALISI DEI REQUISITI DI TUBI DI CALORE STAMPATI TRAMITE TECNICHE DI ADDITIVE MANUFACTURING

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

Aprile 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II 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 4.15 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

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	6
2.1 TUBI DI CALORE: LO STATO DELL'ARTE.....	6
2.2 APPLICAZIONI IN DATA CENTERS .....	8
2.3 LA STAMPA 3D DEI METALLI.....	9
2.3.1 <i>Electron Beam Melting (EBM)</i> .....	9
2.3.2 <i>Direct Laser Deposition (DLD)</i> .....	10
2.3.3 <i>Selective Laser Melting</i> .....	11
2.4 TUBI DI CALORE STAMPATI TRAMITE TECNICHE DI ADDITIVE MANUFACTURING .....	11
2.4.1 <i>Strutture porose</i> .....	13
2.4.2 <i>Tubi di calore</i> .....	14
2.5 PRESTAZIONI DI STRUTTURE POROSE REALIZZATE IN ADDITIVE MANUFACTURING .....	15
2.5.1 <i>Disegno e realizzazione della struttura porosa</i> .....	15
2.5.2 <i>Analisi microscopica della struttura capillare</i> .....	17
2.5.3 <i>Analisi delle prestazioni capillari</i> .....	19
3 CONCLUSIONI.....	24
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	24
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	25
6 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	25

## Sommario

Il documento descrive le attività condotte 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. I tubi di calore sono dispositivi in grado di trasferire un'enorme quantità di calore tra un'interfaccia calda ed una più fredda ed in virtù della loro semplicità, economicità ed elevata conducibilità termica, hanno un ruolo chiave in molti dei problemi di ingegneria legati allo scambio termico. D'altro canto, 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, è quello di sfruttare i vantaggi delle tecnologie additive per la realizzazione di componenti meccanici complessi. Nel corso delle 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 a letto di polvere, le più promettenti per la produzione di dispositivi metallici come i tubi di calore. Sono state analizzate inoltre, in letteratura, le varie strutture capillari ed i vari prototipi di scambiatori di calore realizzati mediante tecniche di Additive Manufacturing. Successivamente viene proposta e analizzata una struttura capillare stampata mediante tecniche di Additive Manufacturing. 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 non stampate tramite tecniche 3D.

## 1 Introduzione

I tubi di calore, o Heat Pipes (HP), sono dispositivi capaci di trasportare ingenti quantità di calore grazie al processo di evaporazione e condensazione di un fluido di lavoro, e per questo trovano applicazioni in diversi ambiti dell'ingegneria quali l'automotive, gli impianti nucleari, la telefonia cellulare, il recupero energetico e la tecnologia satellitare. In virtù della loro semplicità, economicità e della elevata conduttività termica, essi ricoprono un ruolo fondamentale in una vasta gamma di problemi di gestione termica, come il raffreddamento di componenti microelettronici di computer e telefoni cellulari, ma anche il controllo termico di veicoli spaziali, il recupero energetico e gli impianti nucleari [1].

D'altro canto, la stampa 3d rappresenta un aspetto chiave di quella che attualmente viene denominata Industria 4.0, che si propone di cambiare radicalmente, tra le altre cose, i metodi di produzione attualmente utilizzati nei paesi industrializzati, ed in particolare di sfruttare i vantaggi delle tecnologie additive per la realizzazione di componenti meccanici. Uno degli aspetti chiave per rendere reali tali aspettative è quello di sfruttare i vantaggi delle tecnologie additive per la fabbricazione di prodotti personalizzati, complessi e leggeri, ma realizzati con un minor numero di stampi e meno post-elaborazione. Nate verso la fine degli anni '80, questa nuova classe di tecnologie, chiamate additive o di Additive Manufacturing (AM), si basano sul principio per cui un componente, dalla geometria più o meno complessa, possa essere fabbricato per deposizione successiva di strati di materiale (Figura 1).



Figura 1. La tecnologia Additive Manufacturing.

Tali tecnologie sono rimaste poco utilizzate per un paio di decenni quando le uniche vere applicazioni erano quelle legate alla realizzazione di prototipi dimostrativi di supporto alla progettazione. Lo sviluppo della tecnologia, la nascita di nuove materie prime e lo spirito visionario di alcune aziende ed enti di ricerca hanno reso possibile negli ultimi anni una forte e veloce espansione di questi processi. In particolare, la sinterizzazione dei metalli, ovvero quel processo per il quale le polveri metalliche vengono fuse tramite un laser, può essere considerata, ad oggi, la tecnologia più innovativa. Il risultato del processo è un modello in metallo pronto (o quasi) per essere utilizzato come elemento definitivo [2]. La stampa 3d dei metalli può avvalersi di numero molto vasto di materiali con caratteristiche meccaniche e di preziosità differenti in base alla destinazione d'uso.

Nell'ambito della tecnologia HP, la stampa 3d rappresenta un valido strumento per la realizzazione di scambiatori di calore avanzati. 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.

Nei paragrafi a seguire saranno analizzate le principali soluzioni attualmente utilizzate per lo scambio termico con tecnologia HP. Si analizzerà lo stato dell'arte, e le possibilità offerte dalla tecnologia AM per la realizzazione di HP per lo scambio termico.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Tubi di calore: lo stato dell'arte

I tubi di calore sono dei sistemi passivi bifase che vengono generalmente utilizzati per trasferire il calore da una zona calda verso una zona fredda. Il trasporto di calore avviene attraverso il processo di evaporazione e condensazione di un fluido di lavoro. La letteratura riguardante gli scambiatori di calore bifase offre una vasta gamma di fluidi e dispositivi che possono funzionare in diverse condizioni operative (condizioni di microgravità a bordo di satelliti e piattaforme orbitanti, condizioni di forti accelerazioni come i razzi sonda, temperature estreme quali quelle degli impianti nucleari, etc.). L'ampia diffusione di tali dispositivi è dovuta al fatto che spesso i sistemi monofase, come la convezione naturale o forzata, non sono in grado di soddisfare i requisiti delle applicazioni che richiedono un'elevata densità di potenza e quindi i sistemi bifase rappresentano l'unica soluzione in grado di garantire una temperatura operativa accettabile. Le quantità di calore scambiate possono essere sensibilmente elevate a causa del calore latente di vaporizzazione del fluido di lavoro. Tipicamente i tubi di calore utilizzati ad esempio per la gestione termica dell'elettronica dei computer, hanno un involucro in rame e utilizzano acqua come fluido di lavoro. La conduttività termica può raggiungere valori di 10.000 W/m/K, in contrasto con il rame che ha una conduttività termica di circa 400 W/m/K.

Come mostrato in figura 1.a) un tipico tubo di calore ha una geometria circolare ed è composto da un evaporatore un condensatore ed una zona adiabatica. Il ritorno del liquido verso l'evaporatore viene realizzato attraverso una struttura capillare che può essere realizzata tramite delle semplici scanalature (grooved) o attraverso delle strutture porose (screen, sintered). La pressione capillare del fluido di lavoro realizzata da tali strutture garantisce il corretto funzionamento del dispositivo. Nel caso di strutture porose, la pressione capillare è alta ma la permeabilità è generalmente bassa a causa della resistenza d'attrito incontrata dal liquido nell'attraversamento dei pori che formano la struttura stessa. Viceversa, l'utilizzo di micro-canali garantisce un'elevata permeabilità ma una bassa pressione capillare ed il loro utilizzo è spesso limitato perché non possono lavorare in condizioni di antigravità. Attualmente la ricerca è orientata verso lo sviluppo di strutture capillari composite con una elevata permeabilità ed una elevata pressione capillare.

Oltre ai tradizionali tubi di calore di forma cilindrica, nel tempo sono stati realizzati sistemi bifase con geometrie sempre più complesse che meglio si adattano alle diverse esigenze del mercato. Inoltre, in alcuni casi, l'utilizzo di sistemi avanzati basati su principi di funzionamento complessi, ha permesso di massimizzare lo scambio termico e di ottimizzarne l'efficienza. I microcanali, figura 2b), generalmente composti da una serie di micro-canali paralleli e separati tra di loro, sono stati sviluppati e testati a terra per il raffreddamento dei dispositivi elettronici quali le CPU. Per tali dispositivi la curvatura media dell'interfaccia liquido-vapore è paragonabile al reciproco del raggio idraulico del canale stesso. Le tecnologie basate su microcanali soddisfano i requisiti delle dimensioni ridotte e sono più efficienti rispetto ai tradizionali HP, tuttavia mostrano un buon funzionamento solo in configurazione orizzontale. Le vapor chamber, figura 2c) consentono invece di trasportare il calore in due direzioni contemporaneamente (heat spreader) anziché in un unico verso e sono in grado di dissipare tre volte il calore di un HP, a patto che siano assemblate in modo preciso. Inoltre, ogni produttore decide le loro dimensioni (in genere sono quadrate o rettangolari) a seconda dell'uso e del costo. In teoria, le vapor chamber possono essere di qualsivoglia forma in maniera tale da essere direttamente a contatto con la sorgente di calore o meno.

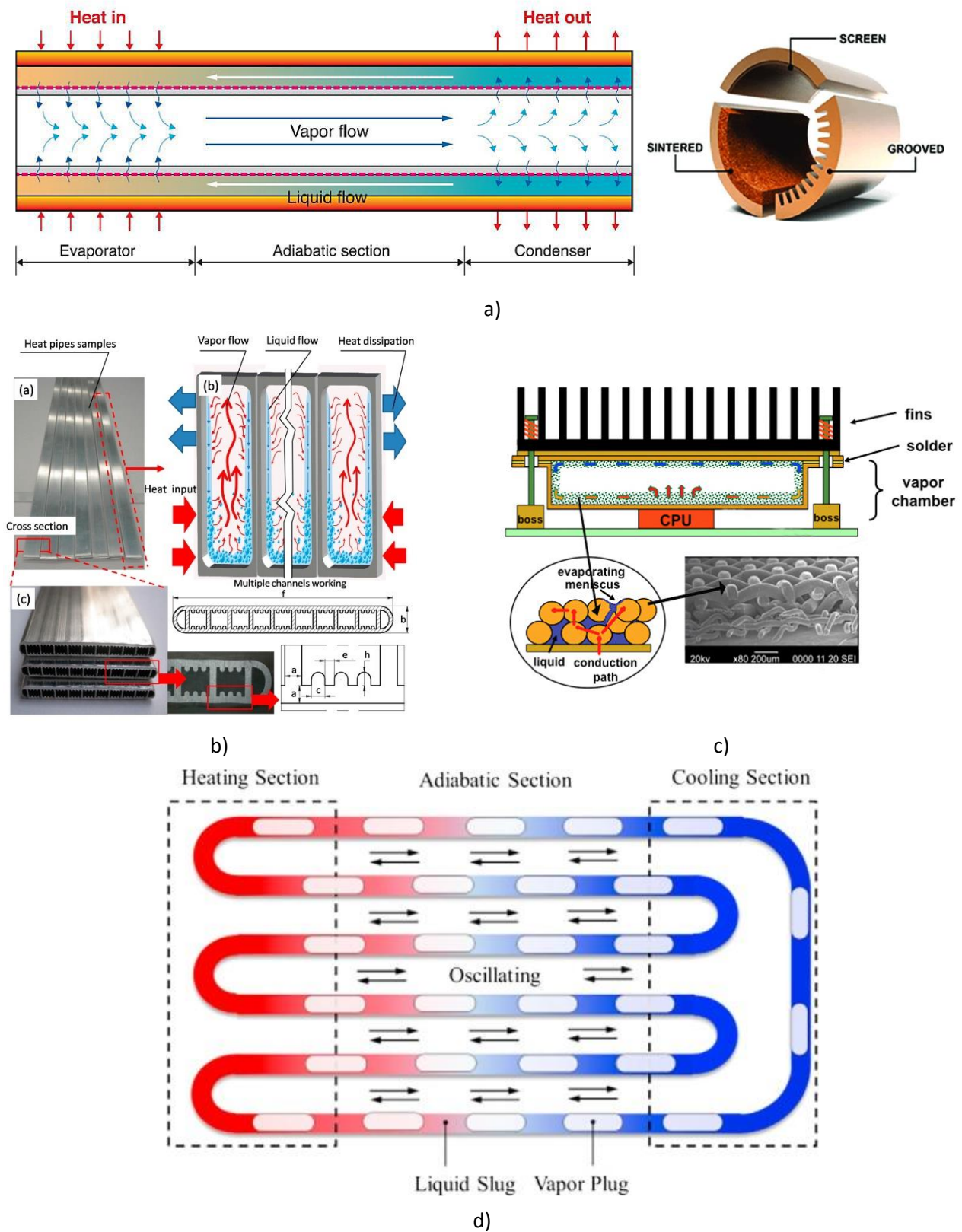


Figura 2. a) principio di funzionamento di un tubo di calore e principali strutture capillari (screen, sintered, grooved), b) heat spreader basato sulla tecnologia flat heat pipe, c) esempio di flat heat pipe basati su micro canali, d) Pulsating Heat Pipe.

Le Pulsating Heat Pipes (PHP), Figura2d), rappresentano infine l'ultima frontiera dei dispositivi bifase per il trasferimento del calore e in futuro potrebbero essere una valida alternativa ai sistemi di raffreddamento tradizionali. Il trasporto di calore avviene grazie alle oscillazioni di un fluido di lavoro distribuito lungo una serpentina chiusa. Le caratteristiche uniche di questa tecnologia, come la semplicità costruttiva, il funzionamento passivo, i bassi costi e l'elevata capacità di trasporto termico rendono questi dispositivi dei candidati ideali per i futuri sistemi di controllo termico. Tuttavia, i meccanismi fisici alla base del loro funzionamento sono molto complessi perché il movimento del fluido è influenzato da un gran numero di parametri ed il trasporto di calore dipende fortemente dalla geometria dei canali, dagli effetti capillari legati alla tensione superficiale e alla bagnabilità del fluido di lavoro, dalla viscosità e da altre proprietà termo-fisiche quali la densità e il calore latente di vaporizzazione.

## 2.2 Applicazioni in Data Centers

L'efficienza energetica dei sistemi utilizzati per il raffreddamento dei processori utilizzati nelle infrastrutture per il calcolo ad alte prestazioni è una delle principali cause del loro elevato consumo energetico. Nel caso di sistemi raffreddati ad aria, la potenza necessaria per mantenere i server entro i loro limiti operativi ha tradizionalmente rappresentato oltre il 30% del loro consumo energetico complessivo. L'aumento vertiginoso della densità dei rack richiede quindi un consumo energetico che sia sostenibile ed efficiente. I miglioramenti dell'efficienza dei sottosistemi di raffreddamento ad aria, insieme a tecniche hardware e software sviluppati per la gestione del raffreddamento, hanno consentito riduzioni dell'efficienza media, misurata attraverso l'indice PUE (Power Usage Effectiveness), ovvero il rapporto tra la potenza totale assorbita dal data center e quella usata dai soli apparati IT, migliorata da 2,5 nel 2007 a 1,65 nel 2013 [3]. Negli ultimi anni tale tendenza ha raggiunto il suo limite. Questo perché, con l'aumento della densità di rack ed a causa della sua limitata capacità di trasferimento del calore, il raffreddamento ad aria diventa inefficiente.

Di conseguenza, c'è stata una proliferazione di tecniche di raffreddamento a liquido, sia monofase che bifase [4]. I sistemi di raffreddamento a liquido mostrano delle buone caratteristiche di trasferimento del calore ed hanno il vantaggio di essere facili da realizzare. Tuttavia, i sistemi bifase, basati su tecnologia HP, offrono molti vantaggi rispetto alle soluzioni monofase. In primo luogo, essi hanno dei coefficienti di trasferimento del calore molto più elevati e un consumo energetico inferiore, il che li rende la soluzione ideale per i processori utilizzanti nell'High-Performance Computing (HPC). In secondo luogo, per il raffreddamento delle CPU a causa delle dimensioni ridotte, sono necessari degli elevati flussi termici che possono essere ottenuti solo con i sistemi bifase.

Un esempio è dato dal progetto di ricerca europeo "MANGO: exploring Manycore Architectures for Next-GeneratiOn HPC systems" [5] dove per il raffreddamento dei processori di ultima generazione sono stati proposti dei sistemi bifase [6]. In Tabella 1 vengono riassunti i requisiti necessari per il raffreddamento di uno degli ultimi processori utilizzati nei data center (Virtex 7 FPGA) che ha un'area di 45 x 45 mm<sup>2</sup> ed una potenza massima di 60 Watt.

**Tabella 1 Requisiti per uno scambiatore di calore per Data Center**

Requisito	Valore
Temperatura operativa	< 65°C
Potenza in input	60 Watt
Area della sorgente di calore	40x40mm <sup>2</sup>

Per questo tipo di applicazioni oltre ad una elevata densità di potenza da smaltire esistono anche dei limiti legati all'ingombro [7]. Spesso l'architettura dei rack richiede l'utilizzo di sistemi di forma complessa ed un funzionamento anche in condizioni di gravità sfavorevole. La soluzione migliore, quindi, è data



dall'implementazione di sistemi di raffreddamento passivi bifase ed efficienti come i tubi di calore. Tali sistemi possono sia migliorare le prestazioni dei processori attuali e futuri sia ridurre il consumo energetico. In primo luogo, il loro principio di funzionamento riduce drasticamente il consumo di energia eliminando la potenza di pompaggio necessaria per i sistemi monofase. In secondo luogo, per la sua natura passiva, un tubo di calore è più affidabile rispetto alle tecniche tradizionali in quanto non utilizza ventilatori, pompe e altri componenti meccanici. Infine, il calore smaltito può anche essere recuperato.

### 2.3 La stampa 3d dei metalli

La tecnologia AM nasce dall'esigenza sempre più comune di realizzare parti in metallo con forme complesse ed essendo tecnologie near net shape, consente la realizzazione di componenti con geometria molto vicina a quella finale. Per la classificazione delle varie tecnologie sono state prese in considerazione solamente quelle che non utilizzano materiali plastici in quanto i tubi di calore vengono generalmente realizzati utilizzando metalli con un'elevata conducibilità termica ed una buona resistenza meccanica. Lo scopo è quello di selezionare la tecnologia che meglio si presta alla realizzazione di scambiatori di calore bifase. Le tecnologie a fusione su letto di polvere sono le più promettenti in tema di Additive Manufacturing; esse producono un componente solido usando una sorgente di energia che induce la fusione di polveri metalliche depositate strato dopo strato su di una piattaforma. Nel tempo sono stati sviluppati diversi processi, i più importanti sono la Electron Beam Melting (EBM), il Direct Laser Deposition (DLD) ed il Selective Laser Melting (SLM).

#### 2.3.1 Electron Beam Melting (EBM)

La tecnica Electron Beam Melting (EBM) utilizza un raggio di elettroni ad alta energia per la fusione delle particelle di polvere. Il fascio di elettroni concentra una potenza di fusione decisamente superiore a quella di un fascio laser, grazie alla notevole differenza di massa atomica fra l'elettrone ed il fotone, raggiungendo facilmente temperature di fusione fra 700 e i 1400 °C (o anche oltre), che consentono di sviluppare componenti per materiali di difficilissima gestione per una fusione tradizionale. EBM utilizza meno energia rispetto alle tecnologie laser e può riprodurre il modello in tempi minori, ma le dimensioni delle particelle di polvere, lo spessore dei vari strati e la finitura superficiale sono tipicamente inferiori. La tecnica richiede inoltre che le parti vengano prodotte sottovuoto e il processo può essere condotto solo su materiali conduttivi. Il fascio di elettroni può essere indirizzato verso una specifica sezione di polvere metallica producendo minori distorsioni. Questo fa sì che ci siano una minor richiesta di strutture di supporto, e minori tensioni, e quindi di evitare trattamenti di distensione termica successivi alla fusione.

Il processo EBM è un processo definito "a caldo" perché le polveri sono mantenute a temperatura elevata e costante per tutta la durata della fusione, a differenza dei processi laser chiamati invece "a freddo" dove le polveri di metallo sono fuse a temperatura prossima a quella ambientale o comunque mai superiore ai 200°C. Prima di essere fuse, infatti, le polveri vengono scaldate per creare una sorta di pre-sinterizzazione in modo da evitare che vengano disperse una volta impattate dal fascio di elettroni. In questo modo le particelle pre-sinterizzate presentano una conducibilità elettrica e termica più grande rispetto alle particelle disperse e ciò permette l'utilizzo di una energia incidente maggiore. Uno svantaggio del pre-sintering è la minor complessità di eventuali canali interni in quanto eventuali polveri non fuse non fuoriescono per gravità ma devono essere rimosse. La maggior peculiarità di questa tecnologia è la necessità di operare in condizioni di vuoto, in modo tale da evitare che gli elettroni del fascio non collidano con le particelle dell'atmosfera di lavoro; se ciò accadesse, ci sarebbe una perdita di energia da parte del fascio elettronico prima di interagire con la polvere. La presenza del vuoto è vantaggiosa in quanto il materiale prodotto in questo modo sarà sicuramente esente da elementi contaminati, come ad esempio l'ossigeno. Al contrario, la necessità del vuoto provoca una riduzione della capacità produttiva, in quanto si deve considerare nel tempo globale di produzione sia la fase di generazione del vuoto sia una fase di re-immissione di aria nella

camera, prima dell'estrazione del componente finito. Per questi motivi, i campi di applicazione di maggior interesse della tecnologia EBM sono il biomedicale e l'aerospaziale.

### 2.3.2 Direct Laser Deposition (DLD)

Il Direct Laser Deposition (DLD) utilizza come materia prima filo o polvere metallica che vengono depositati nella camera di lavoro e contemporaneamente irraggiati dal laser che ne provoca la liquefazione. Attualmente la maggior parte dei sistemi commerciali utilizza metalli in polvere che fuoriesce da uno o più ugelli coassiali al fascio laser, come mostrato in Figura 3. I sistemi DLD alimentati a filo permettono un utilizzo più efficiente della materia prima, ma sono più complessi da controllare a causa dei maggiori ritardi nella risposta del sistema. In entrambi i casi il processo deve essere ottimizzato tenendo conto di tutti i parametri in gioco e delle interazioni termiche e fluidodinamiche.

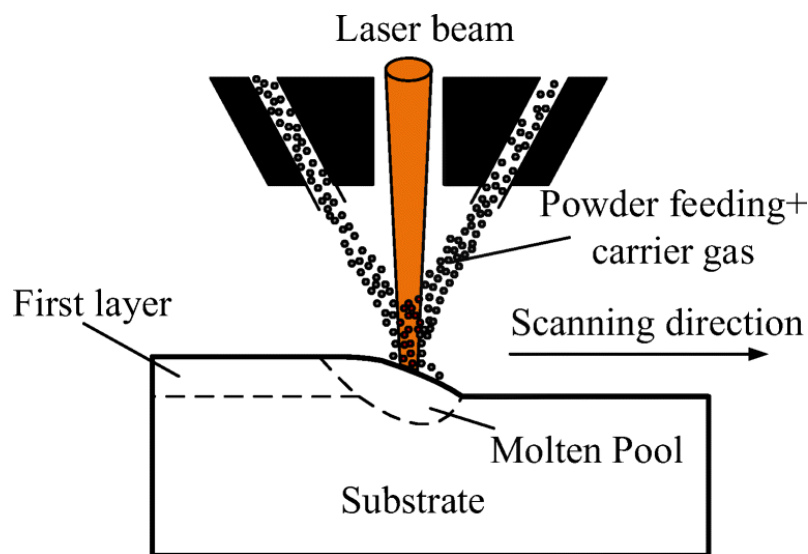
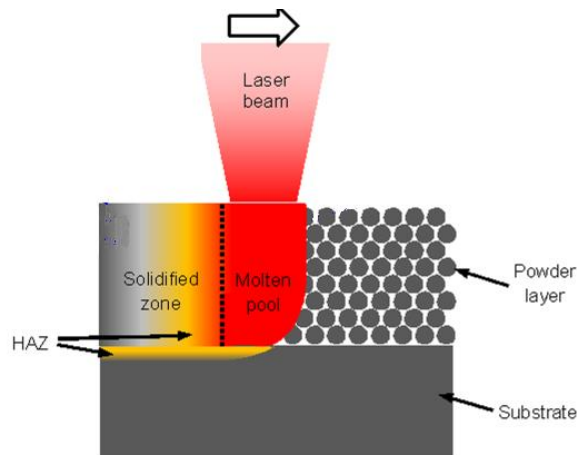


Figura 3. Processo di stampa 3d basato sul Direct Laser Deposition (DLD).

La maggior parte delle macchine per DLD utilizza quasi esclusivamente laser con lunghezza d'onda nel campo dell'infrarosso e potenze che, ad oggi, possono raggiungere i 20 kW. Una percentuale dell'energia del laser viene assorbita dalla nube di polvere che aleggia nell'aria e questo provoca una diminuzione dell'intensità del fascio e variazioni nella distribuzione; questa attenuazione può diventare anche molto significativa se i parametri di processo non vengono scelti correttamente (fino al 75%). La presenza di questa nube di polvere indica anche che, per garantire la quantità di materia prima corretta, sia necessario lavorare con una percentuale di polvere in eccesso, il che assicura anche una certa flessibilità e una maggiore tolleranza sugli errori. L'intensità del fascio deve mantenersi al di sopra di una certa soglia in modo che si formi la pozza fusa sopra il substrato; quest'ultimo quindi si dovrà trovare alla giusta distanza dal piano di focalizzazione. All'interno del range definito dall'intensità di soglia, il volume che ne corrisponde è determinato dagli altri parametri di processo, quali potenza, velocità del laser e di alimentazione della polvere e morfologia della superficie. Il primo strato che si forma sul substrato deve essere più alto rispetto al piano focale fino a circa 1 mm. In sintesi, i primi strati possono essere più spessi o più sottili rispetto allo spessore impostato dall'operatore a seconda della posizione del piano focale rispetto al piano di lavoro e dei parametri di processo. Come risultato lo spessore del layer può convergere al valore corretto solo dopo un certo numero di depositi, oppure allontanarsi da questo stato compromettendo il processo.

### 2.3.3 Selective Laser Melting

La fusione laser selettiva (in inglese: Selective Laser Melting o SLM), anche conosciuta con gli acronimi DMLS (Direct Metal Laser Sintering), realizza invece parti in metallo a partire da un letto di polveri fuse per mezzo di un laser ad alta potenza (dai 100 ai 1500 W) e con un fascio concentrato (di diametro di circa 100  $\mu\text{m}$ ). Il processo inizia da un distributore che dispone un sottile strato di polvere su di una piattaforma, la sezione viene quindi scannerizzata e le polveri solidificano dopo essere state sinterizzate dal laser (figura 4). Successivamente la piattaforma viene abbassata e viene applicato un nuovo strato di polvere. Il processo si ripete fino a quando il componente risulta ultimato.

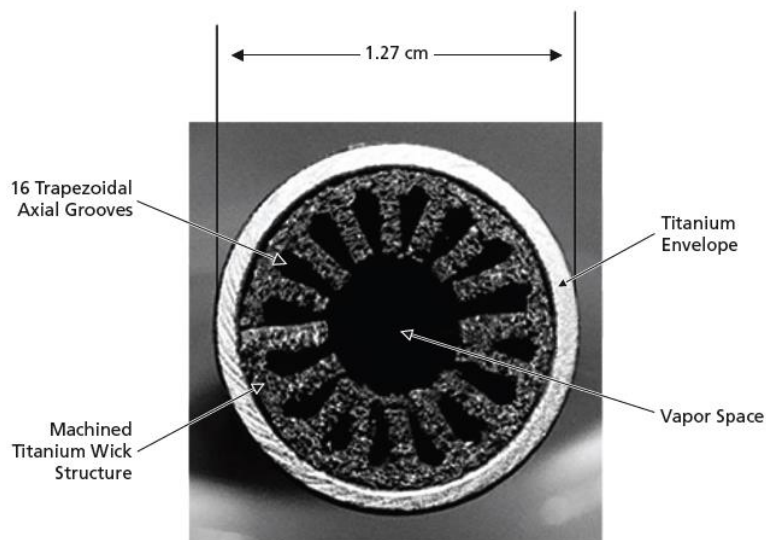


**Figura 4. La tecnologia Fusione laser selettiva (SLM).**

Nella tecnologia SLM il fascio laser viene utilizzato come sorgente di calore ad alta densità di potenza per portare a fusione le polveri metalliche in modo selettivo: la fusione della polvere viene localizzata solamente in alcune zone strategiche, in cui si deve ottenere del materiale compatto per la costruzione del componente. Il vantaggio del fascio laser è che può essere focalizzato su piccole dimensioni, garantendo elevate densità di potenza, che portano ad una rapida fusione della polvere ed a un buon livello di precisione del particolare da realizzare. In particolare, rispetto alle tecnologie tradizionali di produzione, è possibile raggiungere livelli di personalizzazione del componente molto elevati. I principali vantaggi della tecnologia DMLS/SLM sono poter produrre oggetti privi di stress residui e difetti interni e la possibilità di utilizzare un ampio numero di leghe metalliche; i materiali disponibili sono infatti diversi ed in grado di rispondere alle richieste specifiche di molti progetti, si tratta di leghe di acciaio, alluminio, titanio, rame, cromo-cobalto e molti altri. Le principali limitazioni di questa tecnologia sono invece la limitata produttività, in quanto è un processo caratterizzato da velocità di costruzione abbastanza basse e dimensioni massime del componente realizzabili ancora limitate e la necessità di finitura superficiale.

## 2.4 Tubi di calore stampati tramite tecniche di Additive Manufacturing

Lo sviluppo della tecnologia legata ai tubi di calore ha a che fare con diversi aspetti che vanno dalla ricerca di fluidi di lavoro avanzati, fino alle tecnologie di produzioni delle diverse parti che compongono il dispositivo. Un esempio viene mostrato in figura 5 dove un tubo di calore è stato sviluppato in titanio per poter essere utilizzato fino a temperature di 250°C [8]. La struttura capillare è una struttura composita realizzata con tecniche di produzione avanzate perché il titanio non può essere estruso.



**Figura 5. Heat pipe in titanio per applicazioni satellitari.**

Nell’ambito della tecnologia HP le tecniche AM sono state utilizzate per due scopi fondamentali [9]:

1. Realizzazione di strutture capillari sia omogenee che composite: l’utilizzo della stampa 3d ha permesso di realizzare delle strutture porose avanzate con alcuni vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali come la possibilità di controllare parametri quali la porosità, la permeabilità e la dimensione dei pori;
2. Sviluppo di prototipi di scambiatori di calore: l’utilizzo di AM permette la stampa tridimensionale del tubo di calore e questo permette di adattare la geometria alla particolare applicazione.

Nella tabella vengono riassunti alcuni dei risultati presenti in letteratura:

**Tabella 2 Risultati principali presenti in letteratura sulla stampa di dispositivi di scambio termico bifase.**

Applicazione	Tipo di stampa, Materiale	Riferimenti	Risultati ottenuti
Strutture porose	SLM, Alluminio, Titanio, Rame	[10,11,12]	L’utilizzo di tecniche AM ha permesso di sviluppare delle strutture capillari con diverse permeabilità e grado di porosità.
Microcanali	SLM, Alluminio	[13]	L’utilizzo di tecniche AM ha permesso di sviluppare un tubo di calore in alluminio di tipo flat, con pareti interne microstrutturate per il raffreddamento dei circuiti LED. La superficie interna ruvida sinterizzata aumenta la bagnabilità. Il dispositivo ha funzionato sia in configurazione orizzontale che in verticale.

Vapor Chamber	DLD, Acciaio 316L	[14]	Sviluppo di una vapor chamber in acciaio. Il dispositivo è stato sviluppato e testato con successo come heat sprader.
Loop Heat Pipe	SLM, DLD, Acciaio 316L,	[15, 16]	Sviluppo di strutture capillari per loop heat pipe. In realtà la tecnologia AM è stata utilizzata solo per sviluppare alcune parti dell'evaporatore di tali dispositivi.
Pulsating Heat Pipe	SLM, Titanio Ti-6Al-4v, Alluminio	[17, 18, 19]	In queste applicazioni la tecnologia AM è stata utilizzata con successo per realizzare interi dispositivi di scambiatori di calore che sono stati successivamente testati con successo.

La tecnica SLM è quella maggiormente utilizzata in questo genere di applicazioni, inoltre, come materiali quelli più utilizzati sono l'alluminio ed il titanio. L'alluminio soddisfa anche il requisito di una elevata conducibilità termica. Di seguito vengono analizzate queste due diverse applicazioni.

#### 2.4.1 Strutture porose

Spesso, nei metodi di produzione tradizionali, le strutture capillari di tipo porose (vedi figura 2) vengono realizzate separatamente rispetto al tubo stesso e solo successivamente vengono incollate alla parete interna del tubo ma questo processo di fabbricazione può degradare le prestazioni termiche del dispositivo a causa della resistenza termica aggiuntiva dovuta alla giunzione. Inoltre, in tali strutture è difficile controllare parametri quali la porosità e la permeabilità. Per tali motivi, l'utilizzo di tecniche AM, in virtù della loro grande flessibilità nella realizzazione, rappresenta una alternativa valida per la produzione di sistemi bifase con strutture capillari complesse. La struttura capillare può infatti essere ottimizzata, la resistenza termica ridotta e gli HP possono rispettare i vincoli di dimensione e forma imposti dal sistema in cui devono essere inclusi.

Il principio di fabbricazione della struttura porosa utilizzando SLM, rispetto a quanto sopra descritto, include la progettazione di un modello CAD per impostare forma, dimensione e distribuzione dei pori, controllando i parametri del laser nel processo. Per realizzare la struttura porosa, la geometria deve essere riempita con piccole celle unitarie, comunemente realizzate con una geometria ottaedrica. Alcuni esempi di strutture porose sono mostrati in Figura 6. Attraverso l'utilizzo della tecnica SLM è stato possibile realizzare strutture capillari complesse con diversi gradi di spessore, permeabilità e porosità. È importante notare inoltre che la stampa 3d permette di realizzare strutture con diversi gradi di permeabilità e porosità in diverse zone del dispositivo.

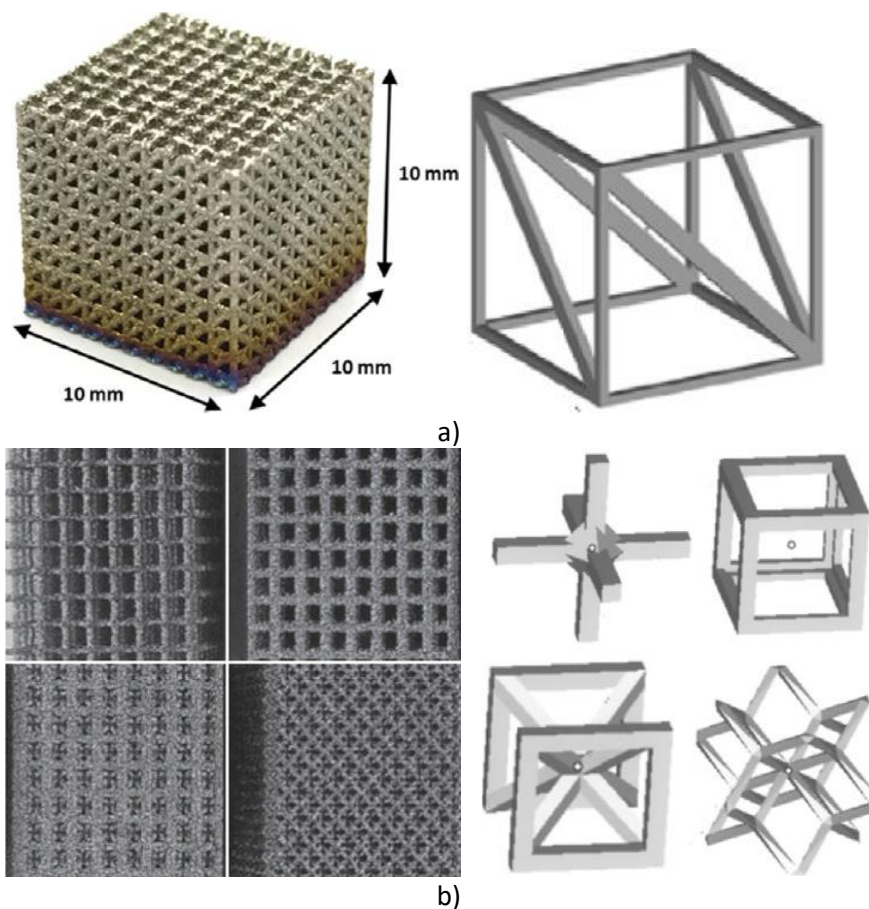
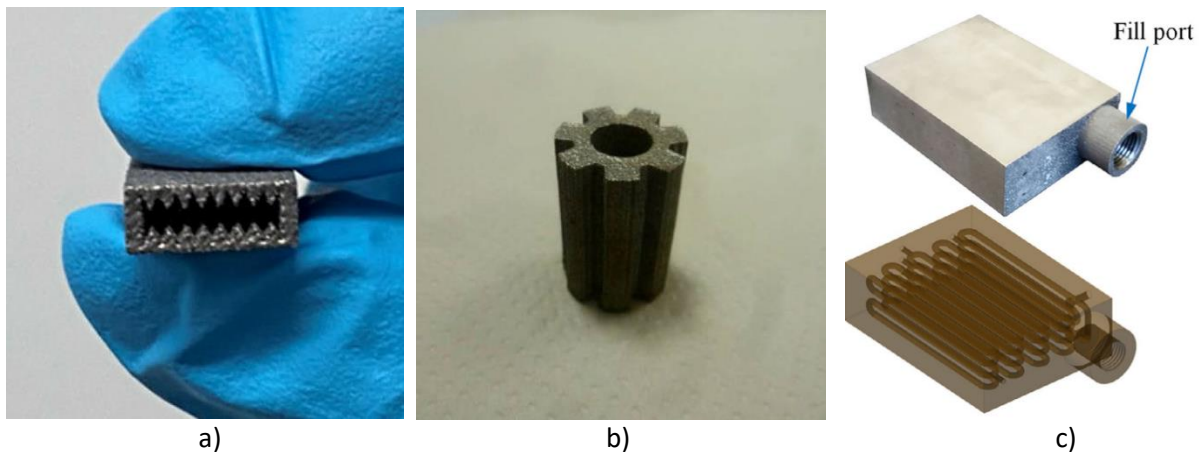


Figura 6. Esempi di strutture capillari regolari realizzate a partire da celle elementari: a) , b) Cross 1 .

#### 2.4.2 Tubi di calore

Oltre alla possibilità di integrare direttamente la struttura porosa all'interno del tubo di calore, l'utilizzo di tecniche AM offre anche una maggiore flessibilità nella realizzazione del dispositivo stesso. A partire dalla struttura interna ed a seconda dell'applicazione la stampa 3d permette di realizzare dispositivi con forme complesse che meglio si adattano alle particolari esigenze del problema considerato. Il dispositivo può essere realizzato attraverso un unico processo ed equipaggiato con linee di ingresso ed uscita necessari per il riempimento.

Esempi di tubi di calore realizzati prevalentemente con tecniche SLM sono mostrati in Figura 7. La figura 7a) mostra un tubo di calore realizzato in alluminio. Le dimensioni ridotte hanno dimostrato come si possano realizzare anche dispositivi miniaturizzati. La figura 7b) mostra la struttura capillare per un loop heat pipe mentre la figura La figura 7c) mostra un pulsating heat pipe realizzato in titanio e testato in configurazione orizzonta utilizzando acqua come fluido di lavoro.



**Figura 7. Esempi di tubi di calore realizzati tramite tecniche AM. a) mini flat heat pipe in alluminio; b) struttura capillare per l'evaporatore; c) pulsating heat pipe.**

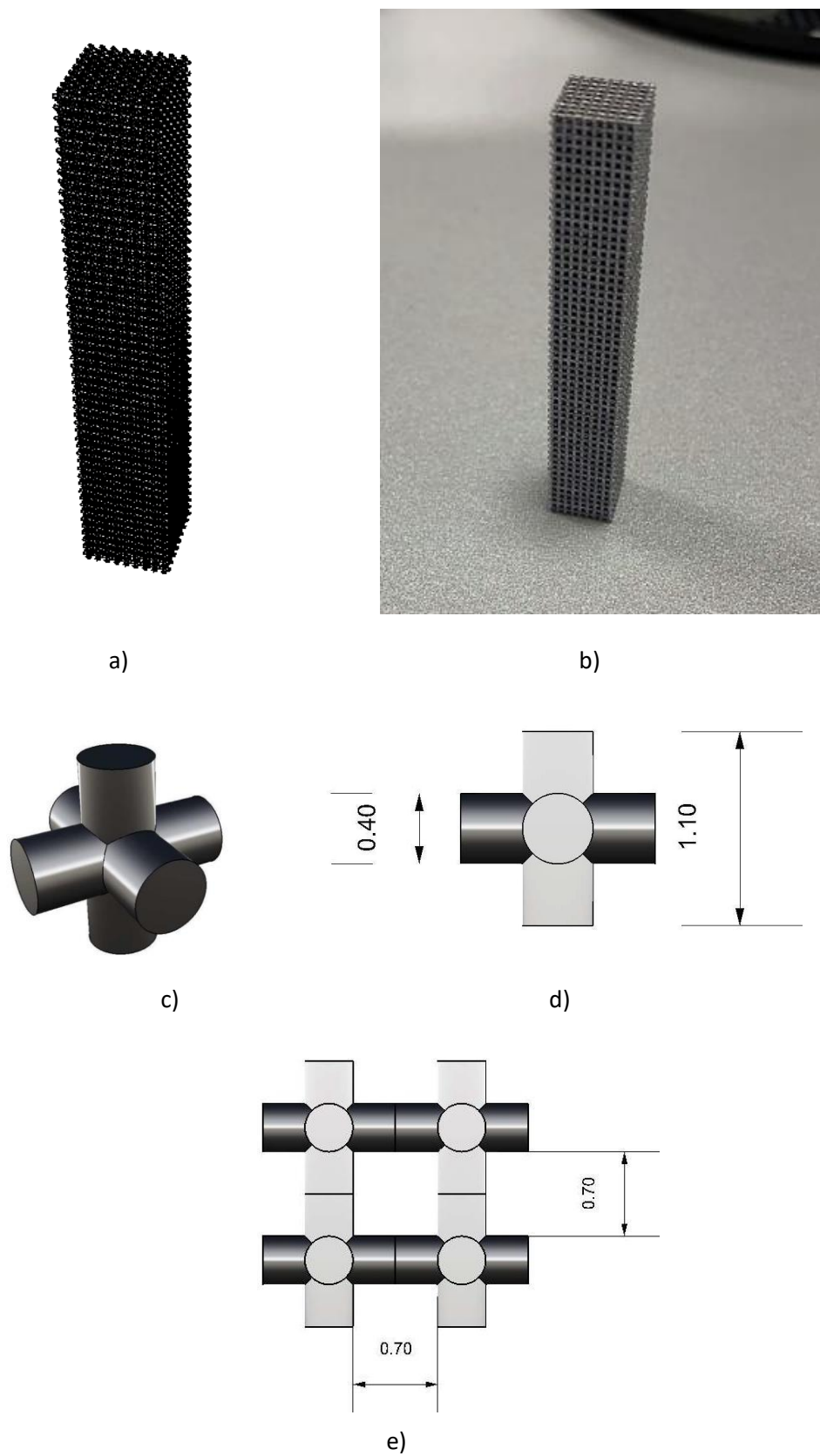
Il PHP è un dispositivo bifase funzionante senza una struttura capillare (wickless) che permette di migliorare il trasferimento di calore grazie all'oscillazione di un fluido di lavoro. I PHP sono realizzati convenzionalmente da un lungo tubo piegato in tante spire, con le sezioni di evaporatore e condensatore posizionate alle due estremità. In queste applicazioni la stampa 3d permette di realizzare materiali avanzati multifunzionali (Thermal Structures).

## 2.5 Prestazioni di strutture porose realizzate in Additive Manufacturing

Nel presente report sono state analizzate le prestazioni, in termini di permeabilità, porosità e salita capillare di una struttura porosa (6x1x1 cm) in alluminio, stampata in 3D, con la tecnica Selective Laser Melting, e bagnata con diversi liquidi di lavoro. La salita capillare è stata valutata mediante un opportuno modello matematico, sia nell'ipotesi di trascurabilità degli effetti gravitazionali, sia tenendo in considerazione gli stessi. L'obiettivo è quello di sviluppare un modello teorico per la salita capillare in strutture porose da validare tramite opportune prove sperimentali. La procedura consiste nella determinazione teorica delle prestazioni in termini di permeabilità e salita capillare al variare del tipo di fluido di lavoro; in particolare verrà utilizzata la legge di Darcy per la determinazione della caduta di pressione del fluido all'interno della struttura, mentre la permeabilità è stata ricavata tramite l'equazione semi-empirica di Kozeny-Carman che verrà analizzata e discussa. Le prestazioni capillari della struttura sono state invece ricavate tramite la relazione h-t (altezza-tempo). Infine, le prestazioni capillari calcolate sono state confrontate con quelle delle strutture porose utilizzate nei tubi di calore e disponibili in letteratura.

### 2.5.1 Disegno e realizzazione della struttura porosa

Una struttura porosa a forma di parallelepipedo (60x10x10 cm) è stata realizzata tramite tecniche AM partendo da una cella elementare di tipo cross e considerando i limiti attuali legati alla stampa 3d dei metalli. In Figura 8c) è riportato il prototipo di struttura capillare porosa disegnato e stampato in 3D e disponibile presso i laboratori della Federico II. Il prototipo è stato realizzato in alluminio utilizzando la tecnica Selective Laser Melting (SLM) che, fondendo la polvere metallica strato dopo strato, ha permesso la realizzazione della struttura porosa. La Figura 8a) mostra la forma che si è scelto di utilizzare per la cella unitaria disegnata tramite CAD, mentre la Figura 8c) sottolinea le dimensioni totali di ingombro della cella pari a 1100  $\mu\text{m}$  e il diametro della struttura cilindrica di 400  $\mu\text{m}$ . La Figura 8d) mostra, invece, la dimensione (D) della struttura porosa pari a 700  $\mu\text{m}$  e di conseguenza il raggio effettivo ( $R_{\text{eff}}$ ), supponendo l'angolo di contatto pari a  $0^\circ$ , è pari a 350  $\mu\text{m}$ .



**Figura 8. Struttura porosa disegnata e realizzata tramite tecniche AM. a) CAD del prototipo, b) prototipo realizzato tramite SLM, c) cella elementare d) dimensioni della cella elementare, e) dimensione D della struttura porosa pari a 700  $\mu\text{m}$ .**



La macchina utilizzata per realizzazione del prototipo è la SLM renishaw AM400 che permette di utilizzare parametri che consentono una maggiore produttività grazie a scansioni più veloci, mantenendo comunque la definizione e la precisione degli elementi. I parametri del laser sono stati impostati a 400 W per la potenza e 25  $\mu\text{m}$  per lo spessore dello strato. La polvere metallica utilizzata per la fabbricazione della struttura è la lega AlSi10Mg-0403 che comprende alluminio legato con silicio, in frazione di massa fino al 10%, piccole quantità di magnesio e ferro, insieme ad altri elementi minori. La presenza del silicio rende la lega più resistente alla corrosione e più dura dell'alluminio puro. La fabbricazione si ottiene per strati; ogni strato viene aggiunto depositando prima la carica di polvere sulla struttura già stampata. Dopo aver stampato uno strato, viene aggiunto altra polvere per la prossima stampa.

### 2.5.2 Analisi microscopica della struttura capillare

Le caratteristiche della struttura capillare sono state sottoposte ad analisi microscopica col fine di analizzare la precisione con cui la macchina *SLM renishaw AM400* è riuscita a soddisfare le richieste dimensionali del disegno CAD. In figura 9 sono riportate alcune delle immagini acquisite col microscopio.

Uno dei vantaggi principali della stampa 3D è che permette di produrre strutture porose con un controllo della geometria; nel caso in studio, come si evince dalla figura 9, la dimensione L dei pori effettivamente ottenuta è risultata in media inferiore alla dimensione disegnata tramite CAD. Utilizzando i dati disponibili dall'analisi microscopica si è eseguita un'analisi statistica finalizzata alla ricerca della media e della varianza campionaria sia della dimensione del foro che della dimensione della struttura portante (Tabella 3).

**Tabella 3 Risultati dell'analisi microscopica.**

	L (micron)	R (micron)
Misure	649.89	481.39
	661.91	475.97
	607.75	490.27
	643.85	460.35
	658.25	455.96
	638.56	420.39
Media campionaria T	643.67	463.83
Varianza campionaria $S^2$	318.33	508.11
Deviazione standard	17.86	22.53

La dimensione L del foro è risultata mediamente pari a 643.67 $\mu\text{m}$  con un errore percentuale rispetto alla dimensione originale pari al 8.04%. La media campionaria per il raggio R è risultata di 463.83  $\mu\text{m}$  con un errore percentuale rispetto alla dimensione originale pari al 15.9%. I risultati mostrano che la stampa 3d ha prodotto una dimensione R della struttura di supporto in media più grande rispetto dimensione impostata con il CAD

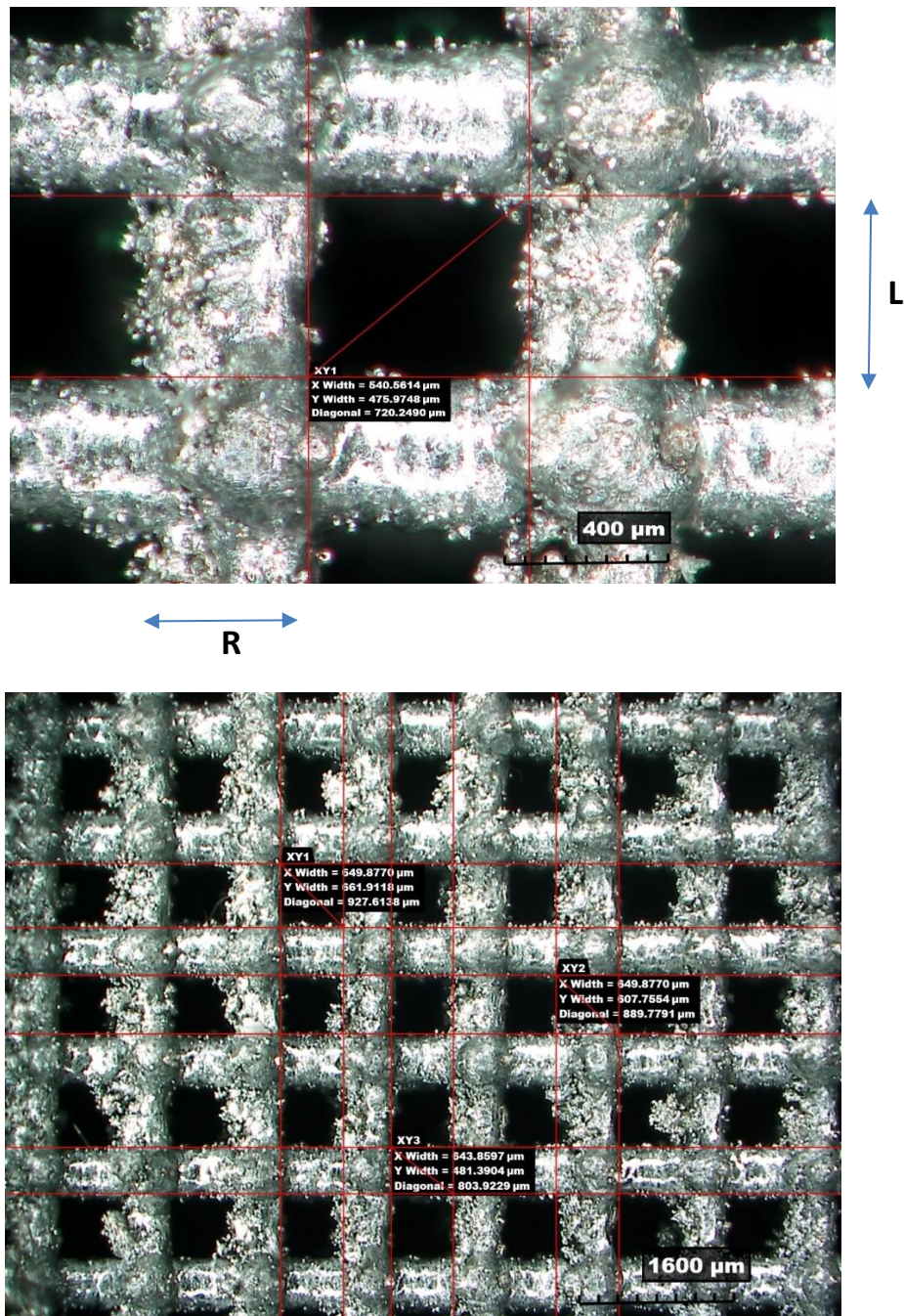


Figura 9 Analisi microscopica del prototipo realizzato tramite tecniche AM.

Sono state inoltre ricavate attraverso delle considerazioni geometriche sulla cella elementare la porosità  $\varepsilon$  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 pari a 0.58.

### 2.5.3 Analisi delle prestazioni capillari

È ben noto che la pressione capillare in un tubo di raggio  $R$  è esprimibile mediante la relazione di Gauss-Young-Laplace:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \cos \theta$$

dove  $\sigma$  è la tensione di vapore dell'interfaccia liquido-vapore, mentre  $\theta$  è l'angolo di contatto tra liquido e solido e misura la bagnabilità che il 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:

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

dove al secondo membro figurano le perdite di pressione connesse alle perdite di carico necessarie per riportare il liquido dal condensatore all'evaporatore ( $\Delta P_l$ ), le perdite di carico necessarie per far fluire il vapore dall'evaporatore al condensatore ( $\Delta P_v$ ), e le perdite di pressione dovute alle forze gravitazionali ( $\Delta P_g$ ), che possono dare contributo, positivo o negativo, a seconda dell'inclinazione del condotto termico. Se questa condizione non viene soddisfatta, la struttura capillare si asciugherà nella regione dell'evaporatore e il condotto termico non funzionerà.

Si comprende quindi l'importanza di massimizzare tale pressione capillare. Inoltre, dall'uguaglianza tra pressione capillare e pressione idrostatica deriva la quota  $h$  (capillary rise) alla quale si porta il liquido all'interno di un capillare, quando una estremità viene immersa in un liquido. In formule:

$$\Delta P_{capillary} = \frac{2\sigma}{R} \cos \theta = \rho_L g_0 h = P_{hydrostatic}$$

da cui la seguente formula applicabile con riferimento ad un capillare semplice di raggio  $R$ :

$$h = \frac{2\sigma}{R\rho_L g_0} \cos \theta$$

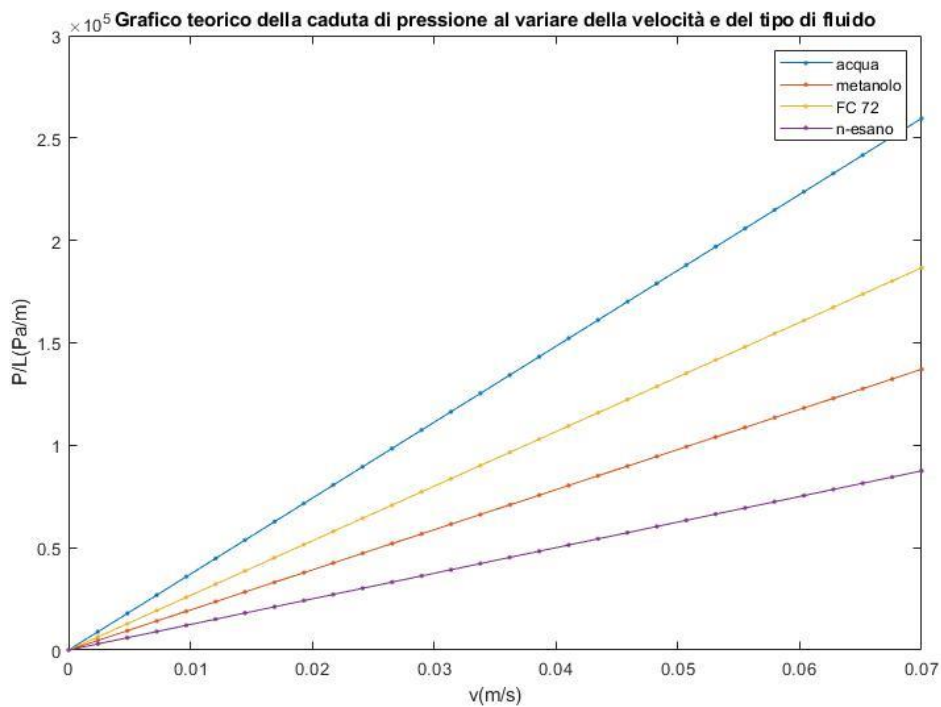
Se consideriamo strutture capillari più complesse, come lined grooves wicks, screen mesh, e sintered le loro prestazioni capillari vengono valutate in termini di pressione capillare, ma anche di porosità e di permeabilità al fluido di lavoro utilizzato. Nel caso di tubi di calore dotati di una peculiare struttura capillare interna, i parametri chiave che descrivono le prestazioni della struttura capillare sono la capillarità, la permeabilità e la porosità. La capillarità è una misura della potenza di pompaggio della struttura capillare, la permeabilità  $K$  misura lo sforzo necessario per trasportare 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. La permeabilità, nel caso di velocità sufficientemente basse, utilizzo di acqua come liquido di lavoro e trascurabilità degli effetti inerziali, è determinata dalla legge di Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k} V$$

e quindi:

$$K = \frac{\mu L}{\Delta P} V$$

che afferma che la caduta di pressione ( $\Delta P$ ) per unità di lunghezza ( $L$ ) nel mezzo poroso, è proporzionale alla velocità del fluido ( $V$ ), alla viscosità dinamica ( $\mu$ ) e inversamente proporzionale alla permeabilità ( $K$ ). La figura 10 mostra un confronto delle perdite di pressione che aumenta al variare della velocità del liquido, al variare del fluido utilizzato.



**Figura 10. Confronto perdite di pressione calcolato in base ai valori di permeabilità e porosità del prototipo realizzato al variare del liquido di lavoro.**

Il grafico mostra un aumento della caduta di pressione con l'aumentare della velocità del liquido utilizzato, in particolare tali perdite sono molto considerevoli quando il fluido utilizzato è l'acqua, mentre sono più contenute nei casi del metanolo o del n-esano.

Idealmente si richiede che la struttura generi un'elevata pressione capillare, combinata con un'alta permeabilità, tuttavia, le soluzioni attuali non soddisfano completamente tali esigenze: uno screen wick genera una pressione capillare moderata e una bassa permeabilità, ma comunque maggiore rispetto ad una struttura porosa sinterizzata, mentre le prestazioni dei grooves wicks sono buone in termini di permeabilità, ma scarse in termini di pressione capillare. 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 sono infatti due esigenze contrastanti poiché la prima è solitamente mantenuta da una struttura porosa con fori piccoli, mentre la seconda richiede una

scanalatura. Questi due requisiti contrastanti possono essere parzialmente soddisfatti attraverso delle strutture composite che combinano una struttura groove con una struttura porosa. 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 dei pori e  $\theta$  è l'angolo di contatto del fluido di lavoro con il materiale della struttura.

Nel corso delle attività sono state analizzate numericamente le salite capillari considerando i valori di permeabilità e porosità della struttura porosa descritta nei paragrafi precedenti. La salita capillare dipende oltre che dal fluido di lavoro utilizzato anche dalla geometria dello stesso. Per il calcolo della permeabilità della struttura porosa è stata utilizzata la relazione di Kozeny-Carman scritta per textile assembly, 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 [17], 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  $K = 2.776 * 10^{-10} m^2$ . Ricordando che per mantenere il fluido in circolazione la pressione capillare  $\Delta P_{cmax}$  deve essere maggiore, o al più uguale, alla somma delle perdite di carico dovute al deflusso del liquido, del vapore e, se presenti, a quelle gravitazionali dovute all'inclinazione del tubo di calore, si può scrivere:

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

avendo assunto la legge di *Gauss-Young-Laplace* per il termine inerente alla pressione capillare, la legge di *Darcy* (5) per la caduta di pressione viscosa, e la classica legge di *Stevino* per la perdita di pressione idrostatica connessa all'eventuale non trascurabilità degli effetti gravitazionali (cosa che accade nel caso in cui non sia accettabile l'ipotesi di numero di *Bond* molto minore dell'unità).

Nella precedente formula, oltre ai parametri già precedentemente citati, figurano  $\left( \frac{dh}{dt} \right)$  che rappresenta la velocità di risalita capillare,  $\mu$  che rappresenta la viscosità dinamica e  $\rho_L$  che individua la densità del liquido. Potendo porre, in virtù della ipotizzata perfetta bagnabilità dell'etanolo,  $R_{eff} = R_p$  (cioè,  $\theta = 0^\circ$ ), la precedente equazione può essere riscritta nel seguente modo:

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

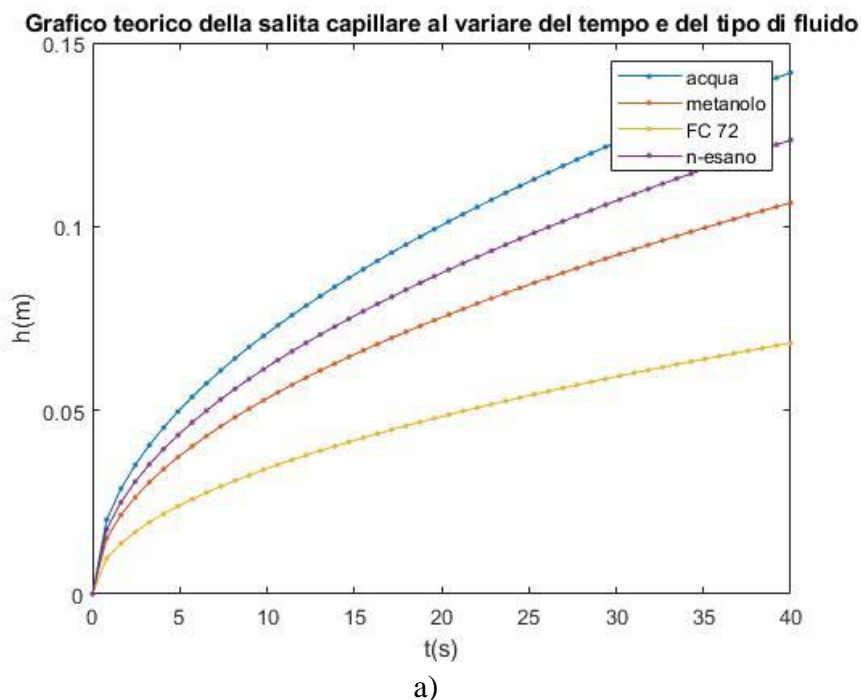
Se la gravità risulta trascurabile (ovvero quando il numero di *Bond* sia minore dell'unità), l'equazione si riduce alla seguente relazione di *Washburn*:

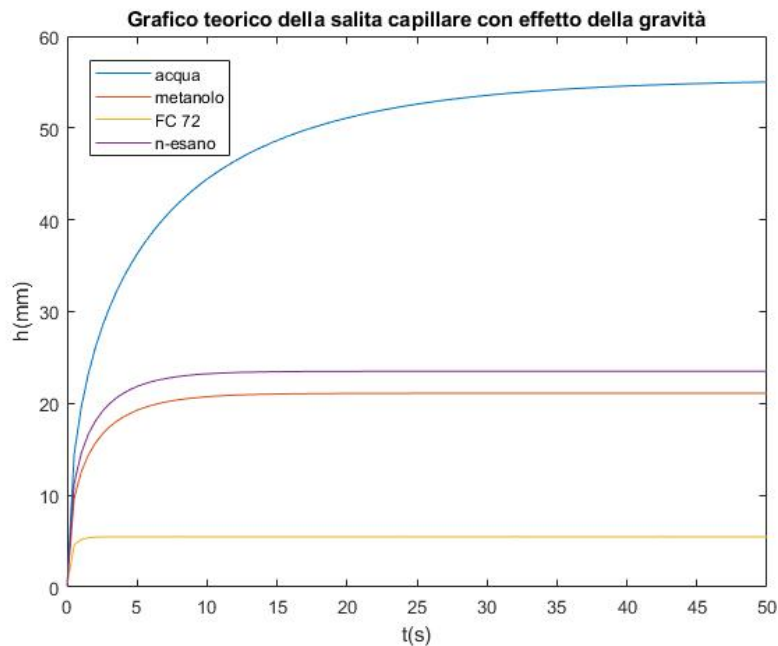
$$\frac{dh}{dt} = \frac{2\sigma K}{R_p \mu \varepsilon} \left(\frac{1}{h}\right)$$

Secondo questo approccio, è solo lo spostamento a cambiare nel tempo. Risolvendo l'equazione differenziale si ottiene l'andamento di  $h$  al variare del tempo:

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

Tuttavia, in alcuni casi l'accuratezza di questa formulazione non è sufficiente per descrivere il fenomeno. Sebbene studi considerevoli abbiano indicato che la salita capillare possa essere generalmente valutata tramite la classica espressione di *Washburn* in cui  $h(t) \sim \sqrt{t}$ , in molte delle applicazioni l'effetto gravitazionale non può essere trascurato. È, quindi, più opportuno risolvere numericamente l'equazione differenziale completa non trascurando l'effetto gravitazionale e considerando una condizione iniziale  $h(t = 0) = h_0 = 0$ . Seguendo questa relazione sono state ricavate le curve della salita capillare al variare del tempo e del tipo di fluido con e in assenza degli effetti gravitazionali. I risultati numerici sono mostrati in figura 11.





b)

**Figura 11. Confronto fra le diverse salite capillari per i diversi fluidi di lavoro utilizzati con ed in assenza di effetti gravitazionali.**

La figura mostra che, indipendentemente dal tipo di fluido, si ha nella fase iniziale una rapida salita dovuta alle forze capillari che prevalgono sulle forze gravitazionali. All'aumentare del tempo gli effetti gravitazionali diventano sempre meno trascurabili tanto da far verificare, a differenza della condizione di assenza di gravità una condizione stazionaria; aumentando il tempo,  $h$  non aumenta più. L'altezza massima raggiunta dal liquido, come mostra l'immagine, varia al variare dei parametri  $\sigma$ ,  $\rho$  e  $\mu$  del fluido. In conclusione, si può affermare che a causa dei pori relativamente grandi della struttura porosa realizzata gli effetti gravitazionali non sono trascurabili. L'effetto gravitazionale gioca un ruolo significativo nella struttura stampata in 3D, causando una risalita più lenta ed una pressione capillare più bassa.

Le proprietà della struttura capillare stampata in 3D sono state confrontate con altre strutture capillari utilizzate per i tubi di calore e riportate in letteratura. Nella tabella 4 sono riassunte le principali caratteristiche:

**Tabella 4 Confronto fra le prestazioni**

Tipo di struttura	$\varepsilon$	$K (m^2 \times 10^{-11})$	$K/R_{eff} (m \times 10^{-6})$
Prototipo stampato tramite SLM	0.58	27,1	0.77
Sintered Spherical powder	0.28	0.24	0.19
Sintered Spherical powder	0.43	1.79	0.39
Sintered Spherical powder	0.56	0.36	0.22
Sintered Irregular powder	0.36	1.27	0.25
Grooved	0.50	49	12.90

Come mostrato nella tabella, le prestazioni capillari della struttura stampata in 3D è più grande rispetto alle strutture di tipo sintered. Ciò è dovuto alla maggiore permeabilità e ad una conseguente minore resistenza all'attrito. Rispetto ai Grooved, la struttura porosa in 3D mostra una prestazione inferiore, a causa della

grande permeabilità dei canali. Ad oggi quindi la stampa 3d permette di realizzare scambiatori di calore con permeabilità intermedie fra questi due tipi di strutture.

### 3 Conclusioni

Durante la prima fase di attività sono state analizzate le diverse tipologie di tubi di calore attualmente presenti sul mercato, con particolare attenzione ai dispositivi normalmente utilizzati per il raffreddamento delle componenti elettroniche ed in particolare delle CPU. In particolare, sono stati analizzati i requisiti necessari per l'applicazione dei sistemi bifase nel raffreddamento delle CPU dei data Centers. Sono stati analizzati, inoltre, i diversi dispositivi per lo scambio termico bifase sviluppati tramite tecniche di Additive Manufacturing. 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. Successivamente è stata disegnata e stampata in 3d il prototipo di una struttura porosa in alluminio considerando i limiti, in termini di risoluzione, delle stampanti attualmente presenti sul mercato. Analisi di tipo teorico hanno permesso di analizzare la salita capillare teorica all'interno della struttura porosa e di confrontare tale struttura con quelle normalmente utilizzate negli scambiatori di calore. Le attività future prevedono la validazione di tale modello attraverso analisi di tipo sperimentale e lo sviluppo di scambiatori di calore basati su una struttura composita.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. Faghri, A. (October 10, 2012). "Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology." ASME. J. Heat Transfer. December 2012; 134(12): 123001.
2. Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. J. of Mater Eng and Perform 23, 2014, 1917–1928.
3. J. K. Matt Stansberry, "Uptime institute 2013 data center industry survey," Uptime Institute, Tech. Rep., 2013.
4. M. Ouchi et al., Thermal management systems for data centers with liquid cooling technique of CPU, 13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2012, pp. 790-798.
5. <https://cordis.europa.eu/project/id/671668/it>
6. <http://www.mango-project.eu/>
7. A. Seuret, A. Iranfar, M. Zapater, J. Thome and D. Atienza, Design of a Two-Phase Gravity-Driven Micro-Scale Thermosyphon Cooling System for High-Performance Computing Data Centers, 2018 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), San Diego, CA, USA, 2018, pp. 587-595.
8. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/techbriefs/manufacturing-prototyping/3494> .
9. D. Jafari and 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 91, 2018, 420-442.
10. M. Ameli et al., A novel method for manufacturing sintered aluminium heat pipes (SAHP), Appl. Therm. Eng., vol. 52, no. 2, 2013, pp. 498–504.
11. Guddati, S., Kiran, A.S.K., Leavy, M. et al. Recent advancements in additive manufacturing technologies for porous material applications. Int J Adv Manuf Technol 105, 2019, 193–215.
12. D. Jafari, W. W. Wits, B. J. Geurts, Metal 3D-printed wick structures for heat pipe application: Capillary performance analysis, Applied Thermal Engineering, Volume 143, 2018, Pages 403-414.
13. Chang, C., Han, Z., He, X. et al., 3D printed aluminum flat heat pipes with micro grooves for efficient thermal management of high power LEDs, Sci Rep 11, 8255 (2021).



14. S. Ozguc, S. Pai, L. Pan, P. J. Geoghegan and J. A. Weibel, "Experimental Demonstration of an Additively Manufactured Vapor Chamber Heat Spreader," 2019 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2019, pp. 416-422.
15. J. Esarte, J.M. Blanco, A. Bernardini, J.T. San-José, Optimizing the design of a two-phase cooling system loop heat pipe: Wick manufacturing with the 3D selective laser melting printing technique and prototype testing, Applied Thermal Engineering Volume 111, 25 January 2017, Pages 407-419.
16. B. Richard, D. Pellicone, and B. Anderson, Loop Heat Pipe Wick Fabrication via Additive Manufacturing, 47th International Conference on Environmental Systems, 16-20 July 2017, Charleston, South Carolina.
17. Belfi, F., Iorizzo, F., Galbiati, C., and Lepore, F. Space Structures With Embedded Flat Plate Pulsating Heat Pipe Built by Additive Manufacturing Technology: Development, Test and Performance Analysis, ASME. J. Heat Transfer, September 2019; 141(9): 095001.
18. O. T. Ibrahim, J. G. Monroe, S. M. Thompson, N. Shamsaei, H. Bilheux, A. Elwany, L. Bian, An investigation of a multi-layered oscillating heat pipe additively manufactured from Ti-6Al-4V powder, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 108, Part A, 2017, Pages 1036-1047.
19. S. M. Thompson, Z. S. Aspin, N. Shamsaei, A. Elwany, L. Bian, Additive manufacturing of heat exchangers: A case study on a multi-layered Ti-6Al-4V oscillating heat pipe, Additive Manufacturing, Volume 8, 2015, Pages 163-174.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

AM	Additive Manufacturing
DLD	Direct Laser Deposition
EBM	Electron Beam Melting
HP	Heat Pipe
PHP	Pulsating Heat Pipe
SLM	Select Laser Melting

## 6 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Anselmo Cecere. Laureato in Ingegneria Aerospaziale presso l'Università Federico II di Napoli, dove ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Aerospaziale. Beneficiario di una borsa di studio post-dottorato presso l'Advanced Institute of Science Technology in Giappone; Research Fellow presso il Microgravity Research Center dell'Université Libre de Brussels. Titolare di assegni di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale; collaboratore dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte nell'ambito della missione DREAMS/ExoMars. È Ricercatore a Tempo Determinato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale, con attività di ricerca focalizzate prevalentemente su problemi di carattere fluidodinamico per ambienti spaziali (rientro atmosferico, ambienti micro-gravitazionali) e su tecniche di misura nel campo della sperimentazione spaziale. È autore di più di 50 pubblicazioni scientifiche (N° di documenti indicizzati: 36 h-index: 14, N° di citazioni 1231, fonte Scopus in data 16 Novembre 2020). Cura lezioni ed esercitazioni di Fluidodinamica Spaziale per il corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale ed è stato affidatario dell'insegnamento di Aerodinamica per il corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale. È stato inoltre correlatore di diverse tesi di Laurea riguardanti argomenti afferenti al settore scientifico disciplinare ING-IND/06.

Raffaele Savino. Professore Ordinario di Fluidodinamica presso l'Università di Napoli «Federico II». Dottore di ricerca in Ingegneria Aerospaziale (1993), è stato ricercatore dal 1995 al 1999, docente di Fluidodinamica dal 2000 al 2002, di Aerodinamica Ipersonica dal 2003 al 2004. Ha insegnato presso l'Accademia Aeronautica di Pozzuoli dal 1998 ad oggi. Attualmente è titolare degli insegnamenti di Aerodinamica e di Sperimentazione Spaziale e ricercatore associato presso l'Istituto di Scienza e Tecnologia dei materiali Ceramici (ISTEC) del CNR. Dal 2014 tiene per supplenza anche il corso di Propulsione Aerospaziale presso l'Università di Napoli Federico II. Ha tenuto corsi e partecipato a collegi di scuole di dottorato presso università all'estero, quali l'Université Libre di Bruxelles, la International Space University di Strasburgo, l'ETH di Zurigo. E' stato visiting professor presso lo Shibaura Institute of Technology (Tokyo), la Utsunomiya University, la Kyushu University e il National Institute of Advanced Industrial and Science Technology (AIST) in Giappone (2009, 2010, 2014). Ha coordinato e tuttora è responsabile di numerosi programmi di ricerca, nazionali ed internazionali, in collaborazione con centri di ricerca, agenzie spaziali (ESA, NASA, JAXA) e numerose industrie europee del settore aerospaziale. E' stato, tra l'altro, componente del Comitato Scientifico del Microgravity Advanced Research and Support Center ed ha partecipato a numerosi comitati in ambito nazionale ed internazionale. E' stato investigatore principale di numerosi esperimenti in microgravità su aerei in volo parabolico, razzi sonda, piattaforme orbitanti. E' membro della International Academy of Astronautics, della International Astronautical Federation, dell'American Institute of Aeronautics and Astronautics. E' stato organizzatore di numerosi convegni internazionali. E' responsabile dell'attività didattica e di ricerca dei seguenti laboratori dell'Università di Napoli Federico II: 1) Laboratorio di Aerodinamica delle alte velocità; 2) Laboratorio di Microgravità; 3) Laboratorio di Propulsione Aerospaziale, sito presso il 9° Stormo dell'Aeronautica Militare Italiana presso Grazzanise (CE). E' titolare di brevetti internazionali ed autore di 3 libri e circa 250 articoli pubblicati su riviste scientifiche internazionali, in libri a diffusione internazionale e in atti di congressi internazionali, nei campi della Aerodinamica, Aerotermochimica, Fisica dei Fluidi, Ipersonica, Fluidodinamica Microgravitazionale, Sperimentazione Spaziale, Propulsione Aerospaziale. Detiene brevetti internazionali relativi alla tematica Heat Transfer Fluids. E' presente su Scopus con circa 180 pubblicazioni per un totale di quasi 3000 citazioni (H-index 26).

A questa linea della ricerca hanno contribuito il lavoro di due studenti con due tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale:

1) Luigi Gentile, Tubi di calore stampati con Additive Manufacturing. Laurea in Ingegneria Aerospaziale. Relatore: Prof. Raffaele Savino

2) Fabio Cacace, Capillary effects in a 3d-printed wick structure for Heat Pipe applications. Laurea in Ingegneria Aerospaziale. Relatore: Prof. Raffaele Savino