



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



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



*Sviluppo di una cella meso-fluidica per
la misura della conducibilità termica
dei fluidi termovettori: Analisi CFD e
ottimizzazione della geometria e dei
materiali*

Alessandra Adrover

Report RdS/PTR(2020)/258



OTTIMIZZAZIONE GEOMETRICA DI UN DISPOSITIVO SPERIMENTALE PER LA MISURA DELLA CONDUCIBILITA' TERMICA

Alessandra Adrover
Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico-ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – 2^a annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Progetto 1.9 Solare Termodinamico

Linea di attività: WP1 - LA1.9 Sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP, Ottimizzazione geometrica di un dispositivo sperimentale per la misura della conducibilità termica

Responsabile del Progetto: Alberto Giaconia, ENEA

Responsabile del Work package: Alberto Giaconia, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP: analisi metallografiche dei materiali esposti a nuove miscele di sali fusi in condizioni statiche e dinamiche"

Responsabile scientifico ENEA: Elisabetta Veca

Responsabile scientifico La Sapienza: Alessandra Adrover

Indice

SOMMARIO.....	4
1. INTRODUZIONE	5
2. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 ANALISI DEL DISPOSITIVO MICRO-FLUIDICO PROPOSTO IN LETTERATURA.....	6
2.2 MODELLO UNIDIMENSIONALE PROPOSTO	8
2.3 ANALISI CFD DEL DISPOSITIVO MICRO-FLUIDICO E MIGLIORAMENTO DEL MODELLO UNIDIMENSIONALE PROPOSTO.....	8
2.4 SCALE-UP DEL DISPOSITIVO MICRO-FLUIDICO E PROGETTAZIONE DEL DISPOSITIVO MESO-FLUIDICO	15
3. CONCLUSIONI	20
4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	20
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO DEL DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CHIMICA, MATERIALI E AMBIENTE DELL'UNIVERSITÀ "SAPIENZA" DI ROMA.....	21

Sommario

Nella presente relazione si riportano tutti gli studi computazionali e modellistici necessari alla progettazione del dispositivo “meso-fluidico” proposto per la misura sperimentale della conducibilità termica dei sali fusi nel campo di temperatura di interesse degli stessi.

Il dispositivo meso-fluidico proposto prende spunto da un dispositivo micro-fluidico precedentemente proposto in letteratura da D. Kuvshinov et al. (Thermal conductivity measurement of liquids in a microfluidic device , D. Kuvshinov, M. R. Bown, J. M. MacInnes, R. W. K. Allen, R. Ge, L. Aldous, C. Hardacre , N. Doy, M. I. Newton, G. McHale, *Microfluid Nanofluid* (2011) 10:123–132 , DOI 10.1007/s10404-010-0652-x) per la misura della conducibilità termica di fluidi a temperature prossime a quella ambiente.

Obiettivo dello studio è stato quello di riprogettare la cella di misura, incrementandone la misura dalle poche centinaia di micron a dimensioni dell'ordine del centimetro, individuando dimensioni e materiali adatti al suo utilizzo nel campo di temperatura di interesse per i sali fusi, sfruttando comunque alcuni principi già in luce nel micro-dispositivo proposto in letteratura, quali un elevato rapporto di snellezza della cella di misura, senza però dover ricorrere ad un dispositivo dalle dimensioni eccessivamente piccole, con conseguenti problematiche indesiderate nell'assemblaggio, smontaggio e pulizia.

1. Introduzione

Il MiSE ha approvato il Piano triennale della ricerca di sistema elettrico nazionale per il triennio 2019-2021, ha destinato circa 65,7 Milioni di euro per l'Accordo di Programma con ENEA in base al quale è concesso il contributo finanziario, anche per l'esecuzione delle linee di attività relative al tema di ricerca 1.9 Solare termodinamico.

Nel Piano triennale 2019-2021 è previsto lo sviluppo di soluzioni innovative e l'implementazione di metodologie e dimostratori sul tema dell'efficienza energetica e dello sviluppo di tecnologie energetiche.

Il tema sviluppato nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e l'Università di Roma Sapienza fa parte di una più ampia attività di ricerca finalizzata allo studio e alla sperimentazione di impianti solari a concentrazione a media temperatura per la produzione combinata di energia elettrica e termica in applicazioni di piccola e media taglia.

Il presente report è relativo al WP1 e linea di attività 1.9 e per l'argomento trattato, rientra tra gli obiettivi generali del pacchetto di lavoro stesso, relativamente allo studio di materiali e componenti innovativi per il miglioramento delle prestazioni e la riduzione dei costi.

Per le tecnologie solari a concentrazione che impiegano i sali fusi sia come fluido termo vettore che come mezzo di accumulo termico, è importante stimare e misurare le principali proprietà fisiche dei sali, quali densità, viscosità e conducibilità termica sia allo stato solido che liquido, dal momento che i fenomeni di scambio termico, trasferimento e stoccaggio del calore dipendono dalle proprietà fisiche.

Un precedente studio sperimentale e modellistico effettuato in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente dell'Università "Sapienza" di Roma, sulla misura di conducibilità termica di fluidi incomprimibili, ha permesso di individuare i limiti di funzionamento di un piccolo dispositivo di tipo "hot wire method", assemblato negli anni scorsi presso il laboratorio della divisione TERIN-STSN SCIS. Il funzionamento di questo dispositivo non è risultato pienamente affidabile dal momento che i risultati sperimentali ottenuti su fluidi con caratteristiche note, non hanno portato a valori di conducibilità termica in linea con quelli di letteratura.

La difficoltà nel determinare la conducibilità termica di un fluido con questa apparecchiatura è da attribuire al fatto che si instaurano moti convettivi nel fluido stesso legati a gradienti di densità indotti, a loro volta, dai gradienti termici in seno al fluido. L'insorgenza di tali fenomeni rende difficile l'interpretazione, in termini modellistici classici, dell'output sperimentale con conseguente errore sistematico nella stima della conducibilità.

Nell'ambito del presente progetto viene proposto e studiato un nuovo approccio basato su una cella di misura con una particolare configurazione tale da rispondere al requisito di minimizzazione di fenomeni convettivi e con l'ulteriore vantaggio di rendere estremamente brevi i tempi di misura (dell'ordine della decina dei secondi) e estremamente piccole le quantità di fluido necessarie alla misura.

Un dispositivo simile, già proposto in letteratura da D. Kuvshinov et al., è stato originariamente sviluppato per operare su scala micro-fluidica (piccolissime quantità di materiale, cella di misura dell'ordine dei 100 micron) a temperature prossime a quella ambiente, massimo 50 gradi centigradi.

Obiettivo della ricerca è quindi quello di riprogettare la cella, individuando dimensioni e materiali adatti al suo utilizzo nel campo di temperatura di interesse per i sali fusi.

Lo studio effettuato ha quindi previsto:

- 1) uno studio preliminare (tramite tecniche CFD) del dispositivo proposto in letteratura ed un conseguente miglioramento del modello proposto in letteratura per la stima della conducibilità termica a partire dal dato sperimentale, rimuovendo alcune delle ipotesi semplificative alla base del modello proposto
- 2) l'individuazione della geometria e delle dimensioni della cella di misura al fine di garantire l'assenza di fenomeni convettivi, rapidi tempi di misura e contemporaneamente un facile assemblaggio e pulizia della cella;
- 3) l'individuazione dei materiali adatti alla realizzazione, a costi contenuti, dell'apparecchiatura in grado di operare alle temperature di interesse dei sali fusi;

4) l'individuazione dei punti di misura di temperatura (posizionamento delle sonde) più adatto per il conseguente sviluppo e messa a punto di modelli dettagliati (CFD) e semplificati per la corretta interpretazione del dato sperimentale.

2. Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Analisi del dispositivo micro-fluidico proposto in letteratura

Una schematica rappresentazione del dispositivo micro-fluidico proposto in letteratura è riportata nella Figura 1. Il campione di fluido è contenuto in un volume cilindrico dal basso rapporto altezza su diametro (diametro $d = 7.5\text{mm}$ e altezza $\delta = 125\mu\text{m}$) e la misura della conducibilità termica λ viene ricavata misurando sperimentalmente l'incremento di temperatura del fluido dovuta al riscaldamento dello stesso tramite energia fornita dallo strato scaldante posto superiormente al campione.

Il campione in esame si trova tra due strati di vetro (superiore $\delta_T = 175\mu\text{m}$ e inferiore $\delta_B = 700\mu\text{m}$) e, al di sopra dello strato superiore, è presente una sottile elettrodeposizione di tantalio che, percorso da corrente, costituisce lo strato scaldante ($q = 1.64 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$). Il diametro dello strato scaldante è pari $d_s = 9\text{mm}$, poco più ampio del diametro della cella di alloggiamento del fluido in analisi.

Alla sommità della deposizione di metallo vi è uno strato di Politetrafluoroetilene (PTFE, $\delta_1 = 208\mu\text{m}$) avente lo scopo di isolare sia termicamente che elettricamente la cella di misura.

Gli strati citati sono posti tra due blocchi di rame (superiore $\delta_{Cu}^T = 15\text{mm}$ e inferiore $\delta_{Cu}^B = 5\text{mm}$).

Il dispositivo viene inserito in un forno a convezione forzata e temperatura controllata.

La temperatura del fluido in analisi è rilevata tramite una sonda posta al di sotto del campione, nella parte opposta allo strato riscaldante.

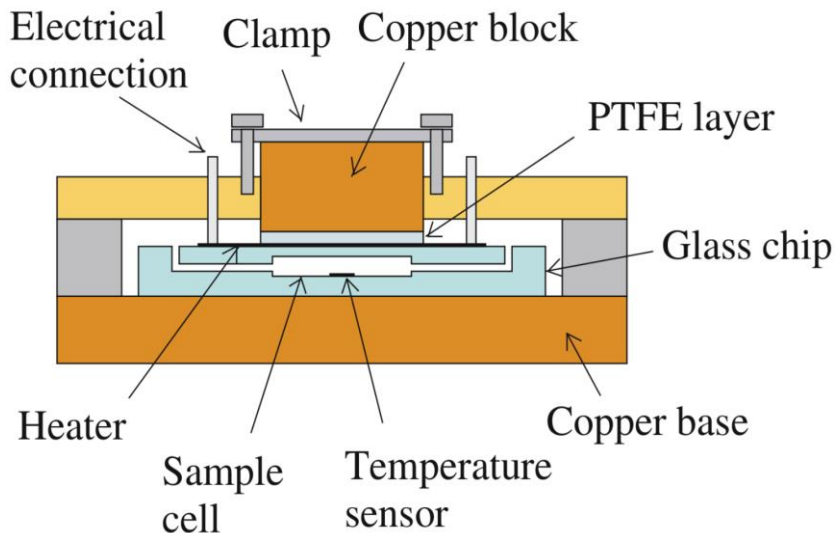


Figura 1: Rappresentazione schematica del dispositivo micro-fluidico.

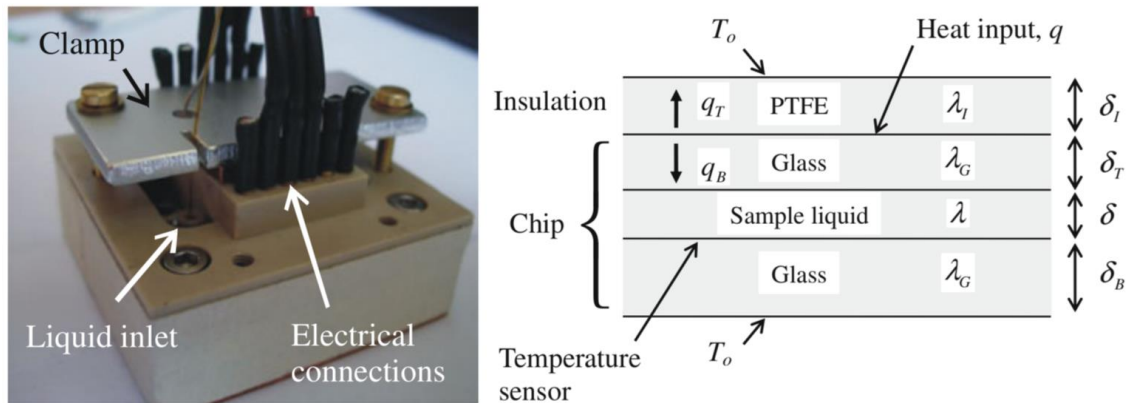


Figura 2: Indicazione della posizione e degli spessori dei diversi strati/materiali che compongono il dispositivo. Non risultano indicati i blocchi superiore ed inferiore di rame.

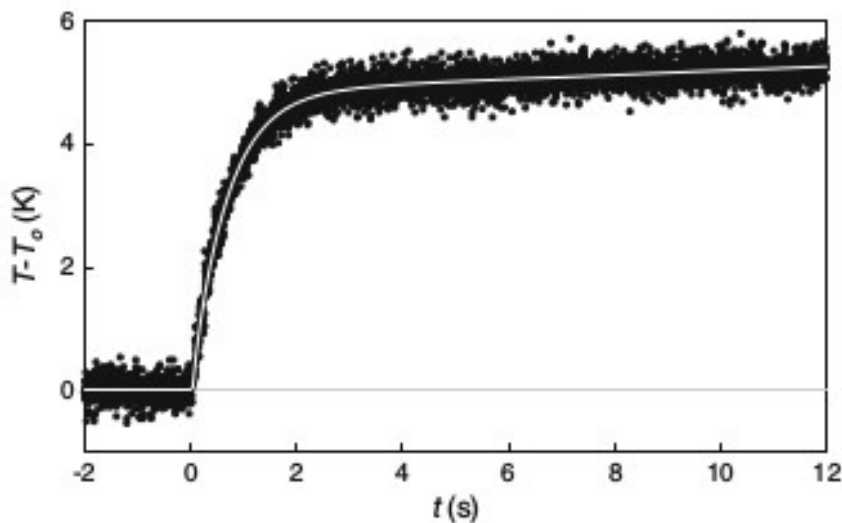


Figura 3: Temperatura rilevata dalla sonda termica (traslata rispetto alla temperatura del forno a convezione forzata) in funzione del tempo espresso in secondi.

La Figura 3 mostra un tipico andamento della temperatura rilevata dalla sonda termica in funzione del tempo per il fluido in analisi (acqua in forno ventilato a $T_0=35^\circ\text{C}$).

L'incremento iniziale e più significativo della temperatura è dovuto al transitorio di riscaldamento del fluido nella cella di misura, mentre il successivo e decisamente più lento incremento (osservabile a partire dai 4 secondi in poi) è dovuto all'asintotico raggiungimento di condizioni stazionarie e influenzato dalle condizioni di convezione forzata che si realizzano nel forno (finite reservoir effect).

Si osserva che il sistema si porta molto rapidamente a funzionare in condizioni stazionarie (10-12 secondi), raggiungendo un valore asintotico $\Delta T = \lim_{t \rightarrow \infty} T(t) - T_0$ estrapolabile dal dato sperimentale sulla base della correlazione suggerita dagli autori

$$T(t) = T_0 + \Delta T(1 - e^{-((t-t_0)/\tau)}) + \gamma(t - t_0) \quad (1)$$

Dal best-fit del dato sperimentale sulla base dell'Eq. (1) si ricava il valore di ΔT_e da esso si estrapola il valore della conducibilità termica del fluido sulla base del modello unidimensionale descritto nel successivo paragrafo. La profonda differenza del metodo di misura proposto rispetto ad altri metodi classici, quali l'hot-wire method, risiede proprio nel fare uso di un salto di temperatura asintotico (raggiungimento delle condizioni stazionarie) invece che sull'analisi del transiente termico.

2.2 Modello unidimensionale proposto

La geometria del dispositivo è stata progettata al fine di garantire, in prossimità dell'asse verticale della apparecchiatura, un profilo di temperatura sostanzialmente dipendente dalla sola coordinata verticale, con conseguente possibilità di modellare l'esperimento con un semplice modello unidimensionale. Inoltre, la struttura della cella di misura, fortemente allungata nella direzione radiale, fa sì che gli effetti di convezione naturale indotti dai gradienti di temperatura e dalla variazione della densità del fluido con la temperatura stessa siano effettivamente trascurabili.

Il modello stazionario unidimensionale di trasporto di energia sviluppato dagli autori ed utilizzato per stimare la conducibilità termica a partire dal dato sperimentale ΔT si basa sulle seguenti ipotesi

- 1) Il trasporto di energia avviene sostanzialmente nella direzione verticale ed il flusso termico q (noto), generato dallo strato di tantalio percorso da corrente, si ripartisce in una porzione q_T che attraversa lo strato superiore di PTFE ed una porzione q_B che attraversa gli strati inferiori, i.e. $q = q_T + q_B$ (vedi Figura 2).
- 2) I blocchi di rame non offrono nessuna resistenza al trasporto di energia.
- 3) La convezione forzata nel forno determina un coefficiente di trasferimento di energia h [$W/(m^2K)$] sostanzialmente infinito.

Sulla base delle ipotesi semplificative 2-3, la temperatura sulla superficie superiore dello strato superiore di vetro e sulla superficie inferiore dello strato inferiore di vetro è pari alla temperatura del forno T_0 . (vedi Figura 2).

Da un semplice bilancio di flussi in condizioni stazionarie, si ottiene

$$\frac{\delta_I}{\lambda_I} q_T = \left(\frac{\delta_T + \delta_B}{\lambda_G} + \frac{\delta}{\lambda} \right) q_B \quad (2) \quad q_B = \frac{\lambda_G \Delta T}{\delta_B} \quad (3)$$

Tenendo presente che

e sfruttando la relazione $q = q_T + q_B$ si ottiene la seguente espressione per la conducibilità termica del fluido in analisi λ in funzione di ΔT

$$\lambda = \left(\frac{\alpha}{\Delta T} - \beta \right)^{-1} \quad (4)$$

essendo α e β grandezze costanti e note dipendenti dagli spessori e dalle conducibilità termiche dei materiali che compongono i vari strati.

$$\alpha = \frac{\delta_B}{\lambda_G} \cdot \frac{\delta_I}{\lambda_I} \cdot \frac{q}{\delta}, \beta = \frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{\delta_I}{\lambda_I} + \frac{\delta_T + \delta_B}{\lambda_G} \right) \quad (5)$$

2.3 Analisi CFD del dispositivo micro-fluidico e miglioramento del modello unidimensionale proposto

Al fine di verificare, anche solo computazionalmente la validità del dispositivo micro-fluidico, ne è stato implementato un modello agli elementi finiti tramite il software Comsol Multiphysics 3.5.

Per semplicità di trattazione è stato implementato un modello in scala reale 1:1 cilindrico assial-simmetrico (i blocchi di rame sono cilindri invece che parallelepipedi) mantenendo spessori e lunghezze caratteristiche dei vari strati inalterate.

La Figura 4 mostra la struttura assial-simmetrica con i diversi blocchi implementati. Le Figure 5 e 6 mostrano la mesh triangolare implementata (e le dimensioni caratteristiche delle celle) altamente non-uniforme, al fine di garantire una corretta ed accurata risoluzione dei gradienti termici nei vari strati caratterizzati da spessori e materiali diversi.

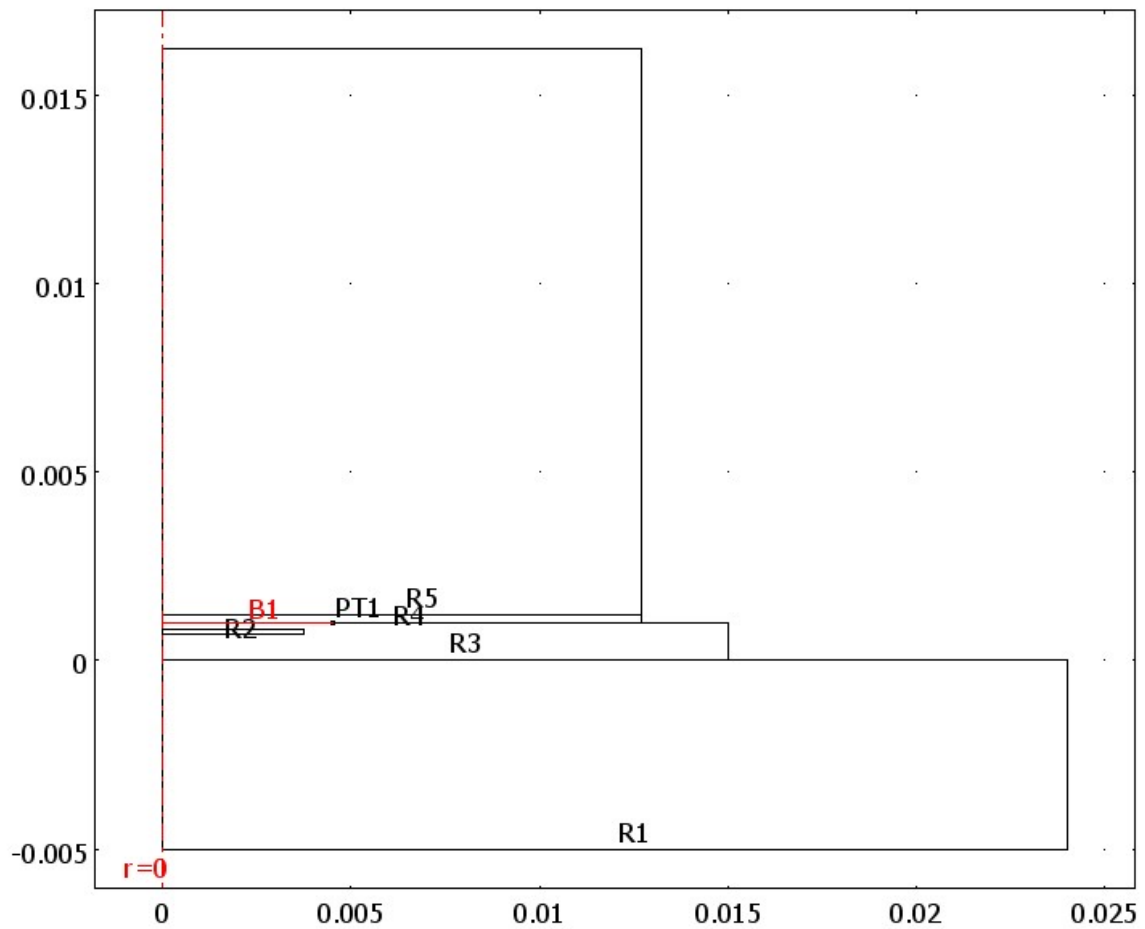


Figura 4: Modello implementato in Comsol 3.5. Le dimensioni assiale e radiale sono espresse in metri.
R1, R5: blocchi di rame; R3: blocchi di vetro sovrapposti; R4: blocco PTFE; R2: cella di alloggiamento del fluido in analisi;
B1: superficie scaldante (si estende da $r=0$ al punto PT1 lungo la linea B1)

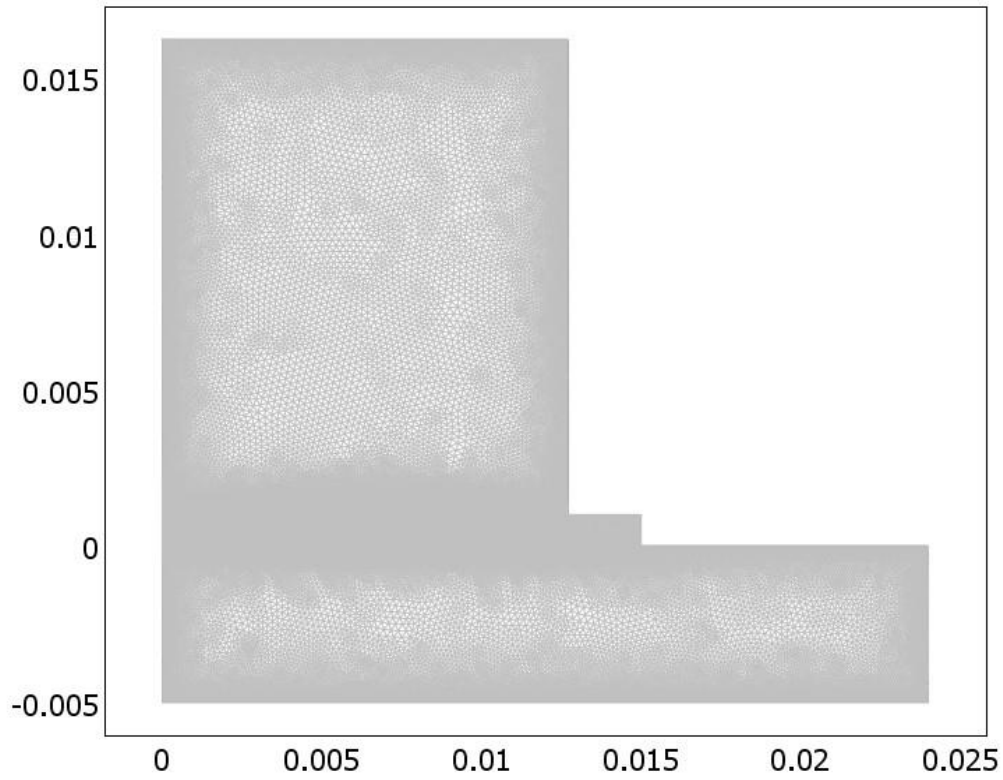


Figura 5: Mesh adottata. Si compone di circa 700000 elementi triangolari.

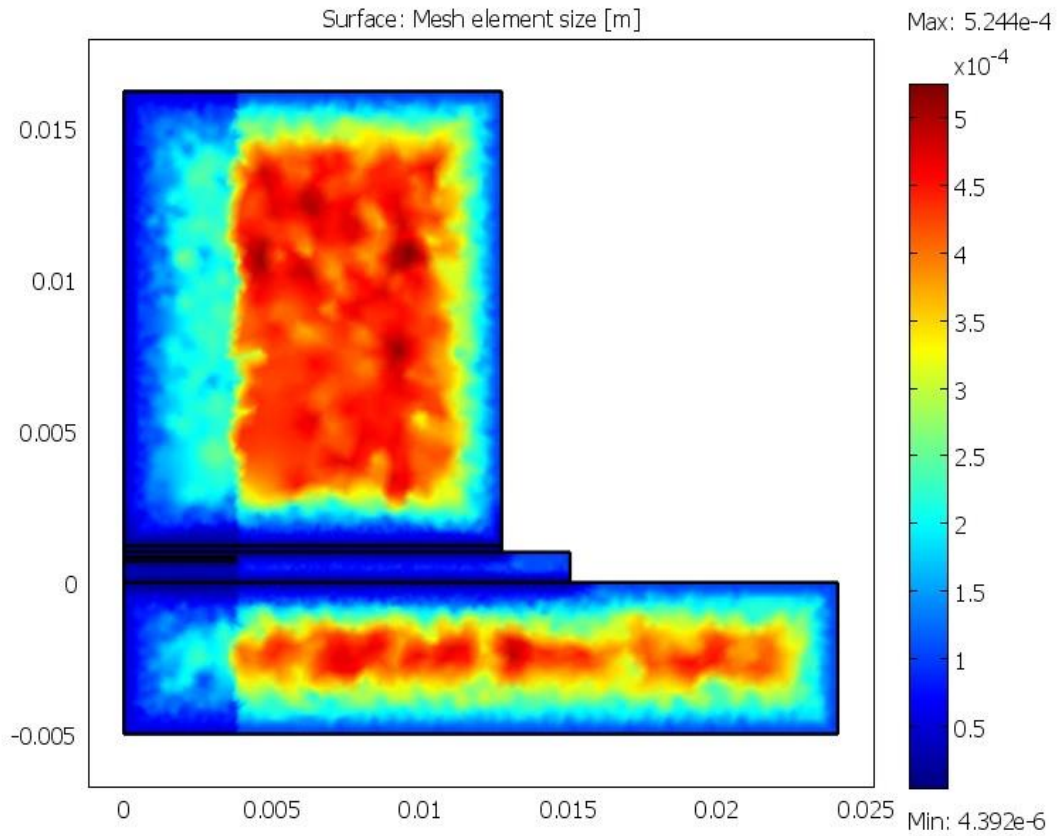


Figura 6: Distribuzione spaziale delle dimensioni degli elementi di volume adottati.

Le equazioni di trasporto implementate sono quelle classiche di trasporto di calore puramente conduttivo con condizioni al contorno di (i) continuità delle temperature e dei flussi termici alle interfacce fra i vari strati, (ii) generazione di energia all'interfaccia superiore vetro-PTFE con flusso termico assegnato $q = 1.64 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ (iii) scambio termico tra le superfici esterne e aria in convezione forzata con coefficiente di trasferimento $h[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$.

Come fluido termico di prova si è adottata acqua nell'intervallo di temperatura $T=25^\circ\text{C}-50^\circ\text{C}$.

La Figura 7 mostra i profili di temperatura $T(r, z) - T_0$ nell'intero dispositivo dopo 20 s di funzionamento per la temperatura iniziale $T_0=35^\circ\text{C}$ e per un valore del coefficiente di trasferimento $h = 500[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$.

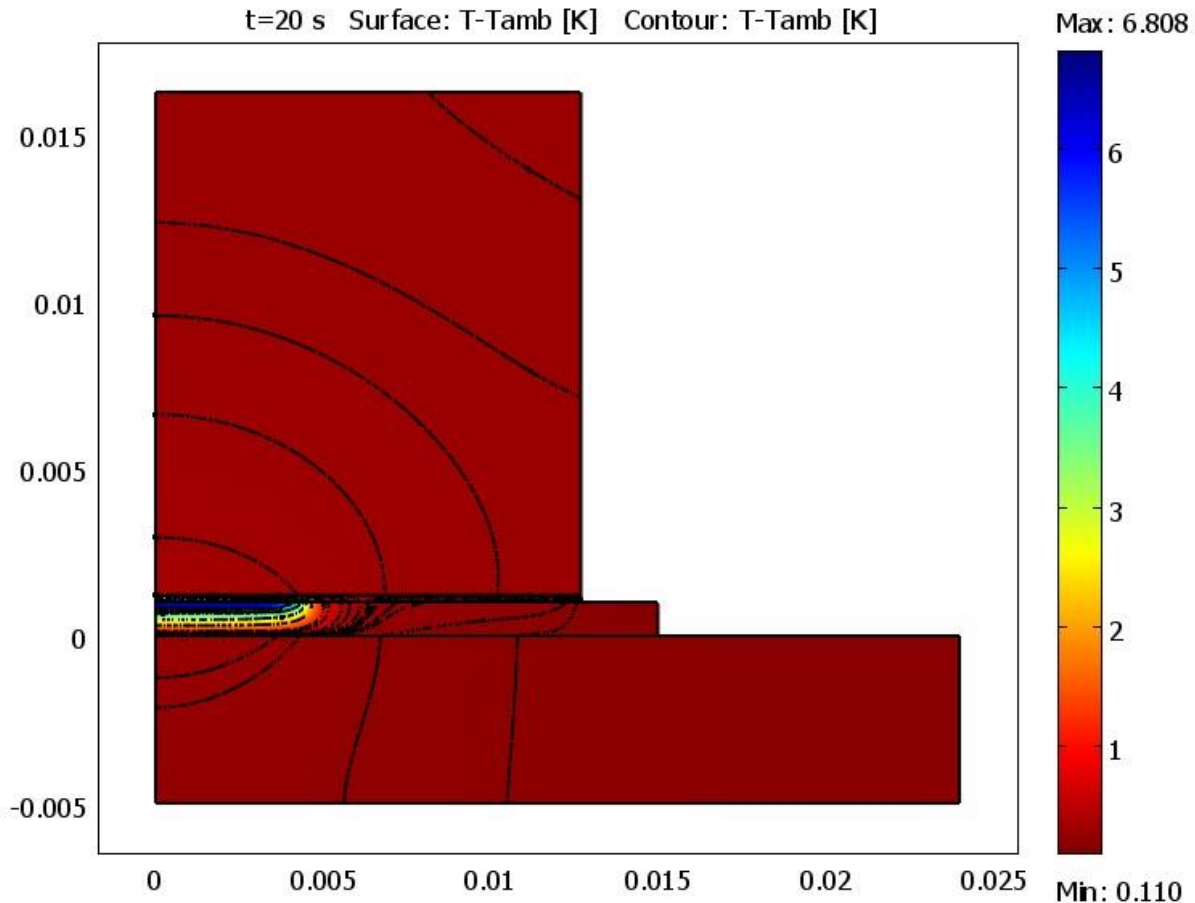


Figura 7: Profili di temperatura $T(r, z) - T_0$ nell'intero dispositivo dopo 20 s di funzionamento per la temperatura iniziale/ambiente $T_0=35^\circ\text{C}$ e per un valore del coefficiente di trasferimento $h = 500[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$.

Si osserva immediatamente come le linee di livello del campo di temperatura nell'interno della cella di misura siano sostanzialmente orizzontali a conferma della possibilità di adottare un modello unidimensionale (nella direzione verticale z) per l'interpretazione del dato sperimentale (temperatura rilevata dalla sonda posta sotto la cella di misura in prossimità dell'asse di simmetria verticale).

Si osserva però anche come i blocchi di rame, per quanto altamente conduttori, rappresentino una resistenza al trasporto non trascurabile e come il salto di temperatura che si realizza in essi (meglio rappresentato in Figura 8) debba necessariamente essere tenuto in conto nel modello unidimensionale ai fini di una stima più accurata della conducibilità termica.

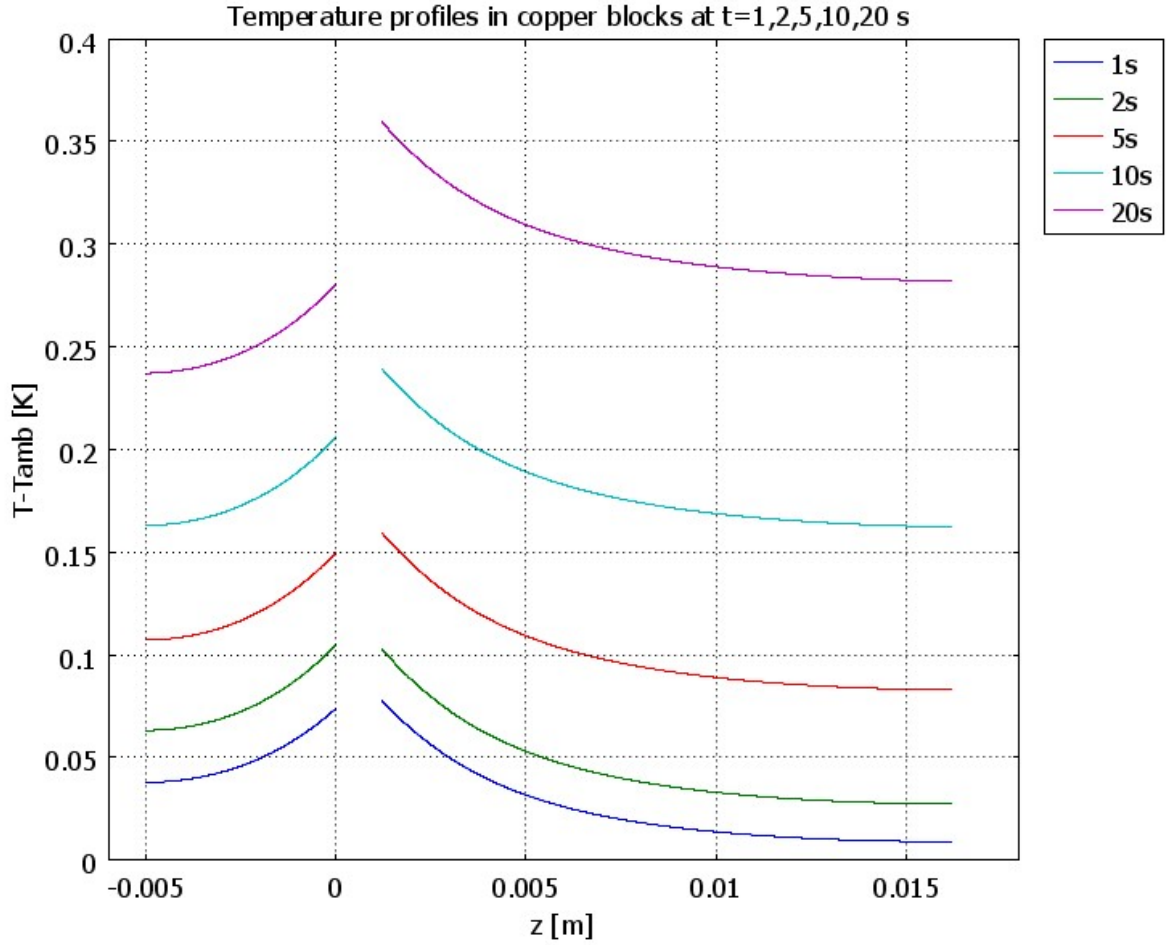


Figura 8: Profili di temperatura $T(0, z) - T_0$ nei blocchi di rame in corrispondenza dell'asse di simmetria per una temperatura iniziale (ambiente) $T_0=35\text{ }^\circ\text{C}$ e per un valore del coefficiente di trasferimento $h = 500[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$.

Si propone pertanto una semplice modifica del modello unidimensionale Eqs. (4) e (5) che però tenga conto sia della resistenza al trasporto di energia rappresentato dai blocchi di rame, sia di un coefficiente di trasferimento di energia h finito

$$\lambda_m = \left(\frac{\alpha_m}{\Delta T} - \beta_m \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\alpha_m = \left(\frac{\delta_B}{\lambda_G} + \frac{\delta_{Cu}^B}{\lambda_{Cu}} + \frac{1}{h_{1D}} \right) \cdot \left(\frac{\delta_I}{\lambda_I} + \frac{\delta_{Cu}^T}{\lambda_{Cu}} + \frac{1}{h_{1D}} \right) \cdot \frac{q}{\delta}; \beta_m = \frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{\delta_I}{\lambda_I} + \frac{\delta_T + \delta_B}{\lambda_G} + \frac{\delta_{Cu}^T + \delta_{Cu}^B}{\lambda_{Cu}} + \frac{2}{h_{1D}} \right) \quad (7)$$

Nella Equazione (7) il coefficiente di trasferimento utilizzato h_{1D} rappresenta il coefficiente di trasferimento nel modello unidimensionale che non coincide con quello effettivo tridimensionale (adottato nelle simulazioni 3D), in quanto h_{1D} deve tener conto che nel problema tridimensionale (2D assial-simmetrico) la superficie effettiva di scambio S_{3D} è molto superiore a quella esposta nell'equivalente modello unidimensionale S_{1D} , assimilabile alla somma delle aree delle superfici superiori ed inferiori di un cilindro di diametro pari al diametro della cella di misura $S_{1D} = 2 \cdot (\pi d^2/4)$. In prima approssimazione si può assumere $h_{1D} = \frac{S_{3D}}{S_{1D}} h \approx 64h$ (8)

In Figura 9 si riporta l'andamento della conducibilità λ in funzione del ΔT a partire dal modello semplificato unidimensionale Eqs. (4-5) e l'andamento della conducibilità λ_m a partire dal modello che include blocchi di rame e coefficiente di trasferimento, Eqs. (6-7) per $h_{1D} \rightarrow \infty$ e per $h_{1D} = 64h$, $h = 500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

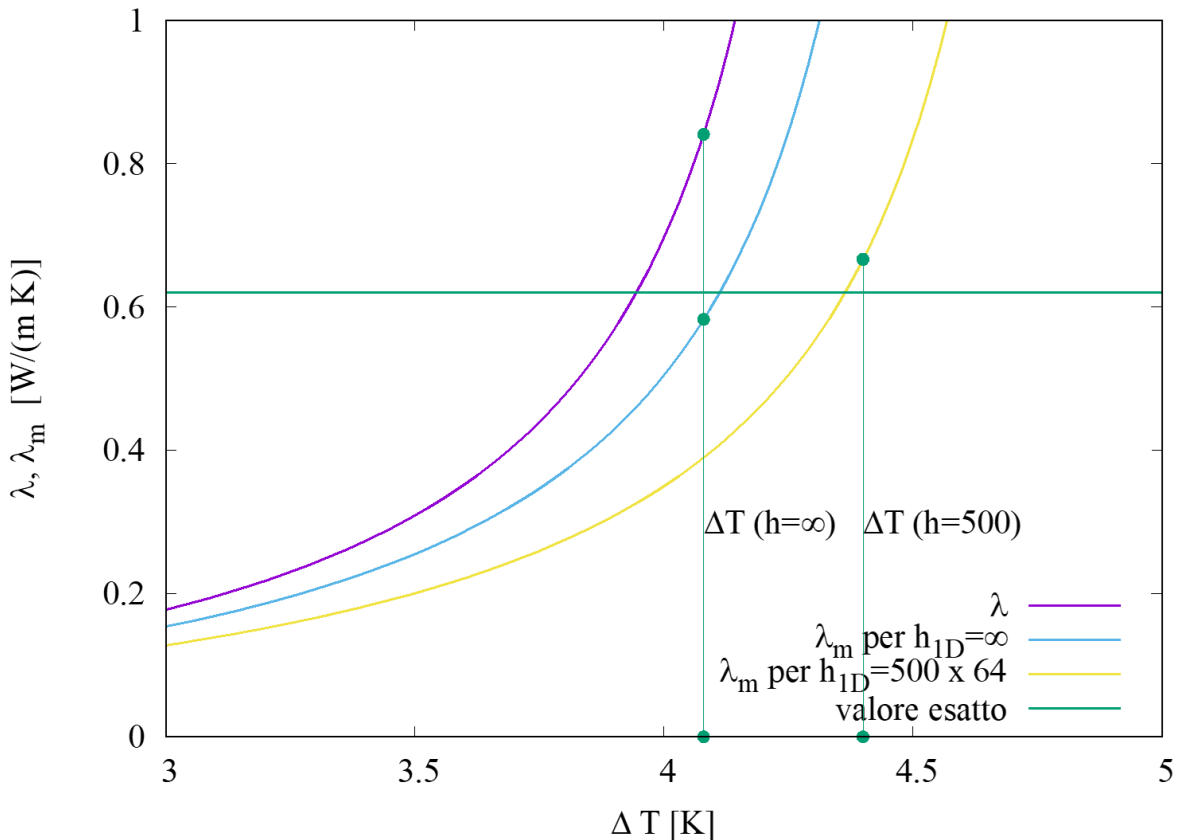


Figura 9:

Conducibilità λ in funzione del ΔT a partire dal modello semplificato unidimensionale Eqs. (4-5) e andamento della conducibilità λ_m a partire dal modello che include blocchi di rame e coefficiente di trasferimento, Eqs. (6-7) per $h_{1D} \rightarrow \infty$, $h_{1D} = 64h$, $h = 500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Il problema si sposta quindi nella corretta individuazione del ΔT . La Figura 10 mostra l'influenza del coefficiente di trasferimento termico h sulla temperatura della sonda a più corte (Figura 10 A) e più lunghe scale di tempo (Figura 10 B).

La temperatura asintotica della sonda ovviamente risente del valore di h (vedi Figura 10 B), decrescendo al crescere di h stesso, ma la rampa iniziale in temperatura risulta sostanzialmente non influenzata dal valore di h (vedi Figura 10 A) e prossima alla temperatura asintotica ottenibile per un valore al limite infinito di h , corrispondente all'imposizione della condizione al contorno $T = T_0$ su tutta la frontiera del dominio esposto alla convezione forzata del forno.

Quindi, la stima del ΔT , da inserire nel modello unidimensionale Eq. (6), basata sul best fit del dato di temperatura di sonda a corte scale di tempi sulla base della Eq. (1) corrisponde al valore di ΔT per $h_{1D} \rightarrow \infty$.

Al fine di chiarire meglio questo concetto, a partire dai dati riportati in Figura 10A abbiamo stimato il valore di ΔT per $h_{1D} \rightarrow \infty$ pari a $\Delta T(h_{1D} \rightarrow \infty) = 4.08\text{K}$ (tramite best fit, Eq. (1)) e a partire dai dati riportati in Figura 10B abbiamo stimato il valore asintotico (a 100 s) di $\Delta T(h = 500) = 4.4\text{K}$.

Il valore esatto della conducibilità a $T = T_0 + \Delta T/2 \approx 37.5^\circ\text{C}$ è pari a $0.62 \pm 0.1 \text{ W}/(\text{mK})$.

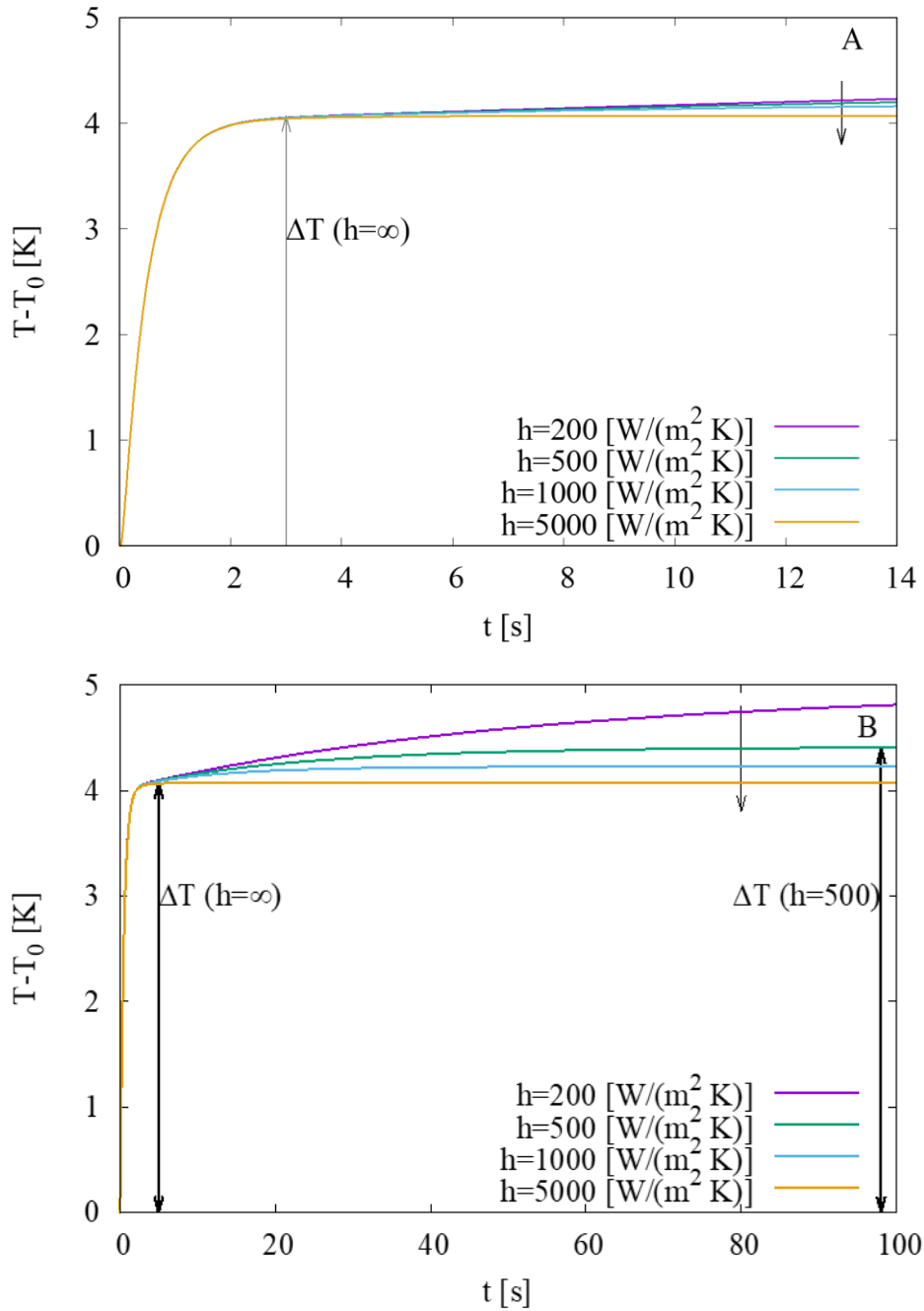


Figura 10: Influenza del coefficiente di trasferimento termico h sulla temperatura della sonda a corte (A) e più lunghe scale di tempo (B).

Facendo uso delle Equazioni (4-5) con $\Delta T(h_{1D} \rightarrow \infty) = 4.08\text{K}$ abbiamo stimato il valore della conducibilità a partire dal modello originariamente proposto pari a $\lambda = 0.84 \text{ W/(mK)}$ con un errore per eccesso del 35% (vedi Figura 9).

Facendo uso delle Equazioni (6-7) con $h_{1D} \rightarrow \infty$ e $\Delta T(h_{1D} \rightarrow \infty) = 4.08\text{K}$ abbiamo stimato il valore della conducibilità a partire dal modello che include il solo effetto dei blocchi di rame, ottenendo un valore pari a $\lambda = 0.58 \text{ W/(mK)}$ (vedi Figura 9) con un errore per difetto del 6% e quindi con un significativo incremento nell'accuratezza della stima della conducibilità rispetto al modello privo del contributo dei blocchi di rame.

Facendo uso delle Equazioni (6-7) con $\Delta T(h = 500) = 4.4\text{K}$ abbiamo stimato il valore della conducibilità a partire dal modello che include sia l'effetto dei blocchi di rame pari che il coefficiente di trasferimento $h_{1D} =$

64h, ottenendo un valore pari $\lambda = 0.666 \text{ W}/(\text{mK})$ (vedi Figura 8) con un errore per eccesso del 7.4%, del tutto confrontabile con l'errore commesso assumendo $h_{1D} \rightarrow \infty$.

Dal momento che, una stima precisa del coefficiente di trasferimento risulta problematica possiamo concludere che il dispositivo micro-fluidico è in grado di fornire risultati estremamente affidabili (i) facendo uso del modello unidimensionale che tiene conto dei soli blocchi di rame, (ii) trascurando la resistenza al trasporto di energia all'interfaccia solido-aria, i.e. assumendo $h_{1D} \rightarrow \infty$ e conseguentemente (iii) stimando il ΔT tramite l'equazione di best-fit Eq. (1) sulla base del comportamento a corte scale di tempi della temperatura rilevata dalla sonda termica.

2.4 Scale-up del dispositivo micro-fluidico e progettazione del dispositivo meso-fluidico

L'adattamento del dispositivo analizzato nei paragrafi precedenti per un suo possibile utilizzo mirato alla determinazione della conducibilità termica dei sali fusi prevede tre passi fondamentali

1. un incremento significativo dello spessore della cella di misura (mantenendo molto basso il suo rapporto di snellezza spessore su diametro) al fine di
 - introdurre un quantitativo maggiore di fluido e quindi un campione significativo del sale fuso in analisi
 - avere uno strumento di misura più facilmente assemblabile, apribile e pulibile.

Tale incremento di dimensioni deve comunque permettere di

- disporre di un dispositivo nella sua interezza sufficientemente piccolo da essere inserito in un forno a convezione forzata di dimensioni medio-piccole (40cmx50cmx60cm);
 - garantire l'assenza di fenomeni convettivi.
2. un cambiamento dei materiali costituenti i vari strati tali da permettere al dispositivo di lavorare nel range di temperatura di interesse per i sali fusi, quindi ad una temperatura molto più elevata della temperatura prossima a quella ambiente per la quale il dispositivo originale è stato progettato. Materiali come il vetro e soprattutto il PTFE sono quindi inutilizzabili
 3. un cambiamento radicale della struttura dello strato scaldante al fine di generare flussi termici più elevati (richiesti dall'incremento di dimensione dell'apparecchiatura) e di realizzare uno strato scaldante a costi contenuti.

Il tutto nell'ottica di progettare un dispositivo funzionante, a basso costo, di semplice realizzazione, assemblaggio, funzionamento e pulizia.

Il primo passo ha portato ad incrementare lo spessore della cella di misura dal centinaio di micron fino ad 1 millimetro, incrementando in proporzione anche il diametro da 7.5 mm a 6 cm.

Il secondo passo ha portato a sostituire il vetro con quarzo fuso, che viene generalmente utilizzato per vetreria e strumentazione ottica e che può lavorare anche ad alte temperature (fino a 1000 gradi centigradi). Il quarzo fuso è inoltre un ottimo isolante elettrico (resistività elettrica dell'ordine di $10^{13} \Omega\text{m}$) e quindi può ottimamente sostituire il PTFE per isolare elettricamente lo strato scaldante.

Il terzo passo ha portato a sostituire lo strato scaldante ottenuto per elettrodeposizione con un semplice filo a doppia spirale, percorso da corrente, incastonato all'interno di due strati di quarzo fuso. L'introduzione di questa sorgente termica, con le relative difficoltà di stima esatta dei flussi termici verticali (data la vicinanza delle spire e le relative interazioni termiche tra spire adiacenti oltre agli eventuali effetti di irraggiamento) hanno portato ad una ulteriore modifica essenziale della struttura del dispositivo, con conseguente introduzione di

- due celle di alloggiamento di fluido, perfettamente identiche in dimensione e perfettamente simmetriche rispetto alla sorgente termica
- due punti di misura della temperatura, una sul fondo ed una sulla superficie superiore della cella di alloggiamento del fluido.

La presenza di due celle di misura identiche permette di avere una perfetta ed eguale ripartizione della potenza erogata dal filo scaldante tra la porzione superiore e la porzione inferiore del dispositivo. Permette inoltre un più facile alloggiamento delle due sonde termiche di cui abbiamo bisogno.

La presenza di due sonde termiche permette di valutare la temperatura media del fluido in analisi e di poter avere una stima migliore del calore fornito tramite misura della differenza di temperatura fra le due sonde.

La struttura del nuovo dispositivo è riportata in Figura 11. La struttura complessiva è un dispositivo cilindrico (solido di rotazione intorno all'asse $r=0$) di diametro $d = 20\text{cm}$ e altezza complessiva $H = 12.7\text{cm}$.

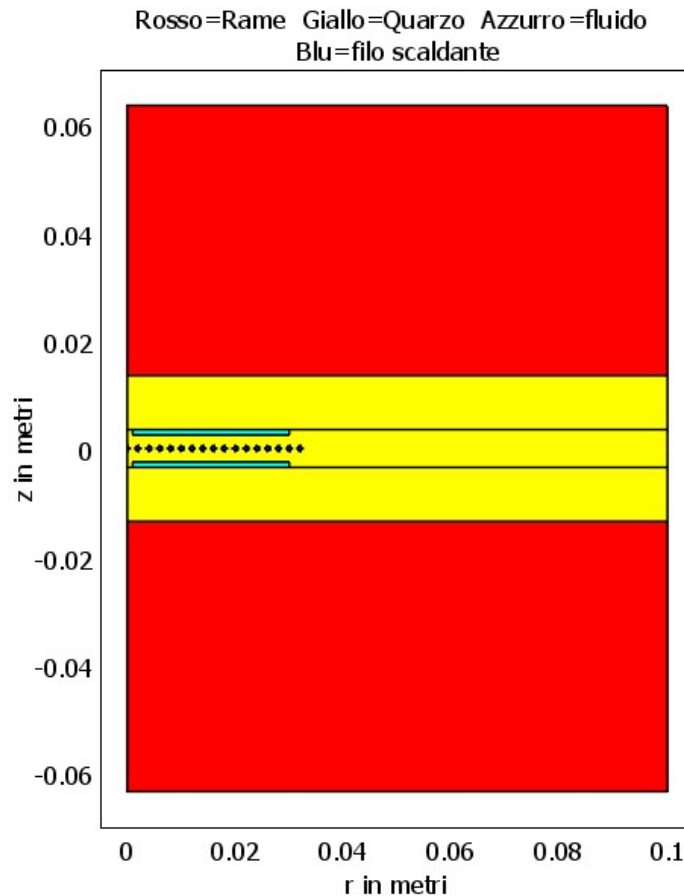


Figura 11: Rappresentazione in scala del nuovo dispositivo meso-fluidico.

Si individuano i due blocchi di rame (superiore ed inferiore) di spessore di spessore $\delta_{Cu} = 5\text{cm}$, i due blocchi di quarzo fuso (superiore ed inferiore) di spessore $\delta_Q = 1\text{cm}$, le due celle di alloggiamento del fluido nello spazio individuato da due cilindri concentrici di diametro interno $d_i = 2\text{mm}$, diametro esterno $d_e = 6\text{cm}$ e spessore $\delta = 1\text{mm}$, ciascuna in grado quindi di alloggiare un volume di fluido $V=2.824\text{ cm}^3$.

Si osserva anche, in sezione, la struttura dell'elemento scaldante, incastonato in un blocco di quarzo fuso e realizzato tramite avvolgimento a doppia spirale archimedeica di un filo di NiChrome V (Nickel Chromium Resistance Wire 80% nickel, 20% chromium ASTM B267 and ASTM B344) di diametro $d_f = 1\text{mm}$ e resistività elettrica $1.08 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ (20°C).

La struttura dell'elemento scaldante è riportata in Figura 12, in cui si evidenzia come

- la struttura della doppia spirale nasca dall'unione, nel punto centrale di origine, di due spirali archimedee di passo 4 mm e aventi equazioni

$$\begin{aligned}
 R(\theta)[\text{mm}] &= \frac{2}{\pi} \theta; \quad 0 \leq \theta \leq 8 \times (2\pi) \\
 R(\theta)[\text{mm}] &= -\frac{2}{\pi} \theta; \quad 0 \leq \theta \leq 8 \times (2\pi)
 \end{aligned}
 \quad (9)$$

- per una lunghezza totale del filo avvolto a doppia spirale pari a $L_s = 1611$ mm;
- la distanza fra diverse spire sia costante e pari ad 1 mm;
- spire adiacenti siano percorse da corrente in verso opposto;
- la configurazione scelta permetta un facile alloggiamento dell'ingresso e dell'uscita del filo dal blocco di quarzo per il suo collegamento al circuito elettrico predisposto e riportato nella Figura 13.

Aggiungendo alla lunghezza del filo avvolto a spirale le lunghezze di ingresso e di uscita dal blocco di quarzo pari a 200 mm si ottiene un filo resistivo di lunghezza totale $L_{\text{tot}} = 1811$ mm, per una resistenza totale pari a $R_f = 2.6 \Omega$, valutata a 400°C considerando l'incremento della resistività con la temperatura secondo la relazione $\rho = 1.08 \times 10^{-6} + 1.5079 \times 10^{-10} (T[\text{K}] - 293.15) \Omega\text{m}$.

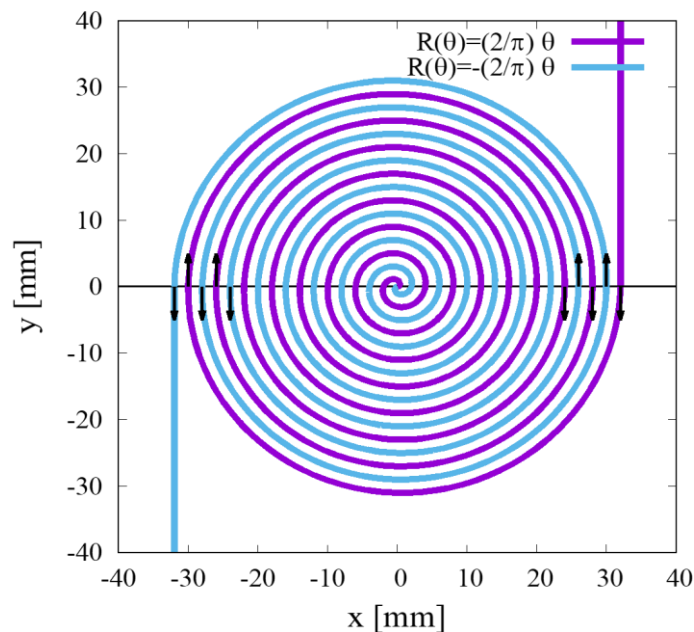


Figura 12: Struttura della doppia spirale di avvolgimento del filo resistivo.

Il circuito di alimentazione del filo scaldante prevede una batteria a corrente continua max 12 V, una resistenza di prova $R=1 \Omega$ e almeno un voltmetro (con punti di misura a monte e a valle della resistenza di prova) per avere una misura indipendente della intensità di corrente che attraversa il filo scaldante.

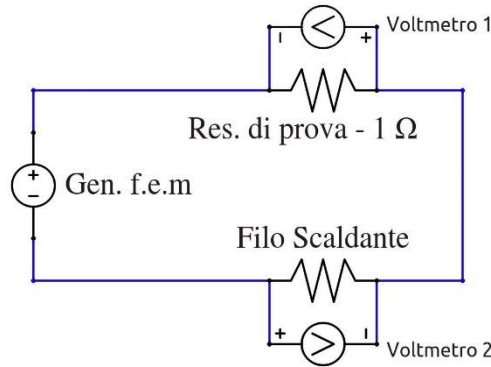


Figura 13: Circuito di alimentazione del filo scaldante.

L'intensità di corrente nel filo scaldante I [A] e la potenza totale dissipata nel filo P [W] (valutata a 400°C) sono pari a

$$I[A] = \frac{\Delta V}{R+R_f} = \frac{\Delta V}{3.6}; \quad P[W] = \frac{\Delta V^2 R_f}{(R+R_f)^2} = 0.2\Delta V^2 \quad (10)$$

essendo ΔV la differenza di potenziale generata dalla batteria e pari a $\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2$.

Quindi, per una differenza di potenziale applicata pari a $\Delta V = 10$ V abbiamo $I = 2.7$ A e $P = 20$ W.

L'incastonatura del filo scaldante nel blocco di quarzo può essere realizzata, dividendo il blocco di quarzo in due parti, una superiore ed una inferiore e ricavando in ciascuna di essa l'alloggiamento per la porzione superiore (semi cilindro superiore) e per la porzione inferiore (semi cilindro inferiore) del filo.

Le strutture dei blocchi con cui realizzare e assemblare il dispositivo sono riportati in Figura 14.

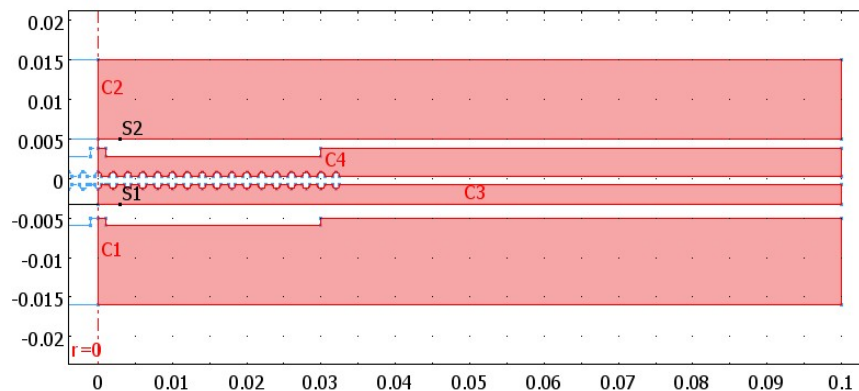


Figura 14: Struttura dei blocchi di quarzo necessari all'assemblaggio del dispositivo (esclusi i blocchi superiore ed inferiore di rame, di pari diametro) e al posizionamento del filo scaldante.

Nel blocco C1, di spessore minimo pari a 10 mm e di spessore massimo 11 mm viene ricavata la cella inferiore di alloggiamento del fluido di spessore 1mm e diametro minimo e massimo pari rispettivamente a 2 mm e 6 cm. Il blocco C2 superiore ha spessore costante e pari a 10 mm. Nel blocco C3 di spessore 2.5 mm viene ricavato

l'alloggiamento del semi-cilindro inferiore del filo. Nel blocco C4 (di spessore minimo pari a 2.5 mm e spessore massimo 3.5 mm) nella parte inferiore viene ricavato l'alloggiamento del semi-cilindro superiore del filo e nella parte superiore viene ricavata la cella inferiore di alloggiamento del fluido di spessore 1 mm e diametro minimo e massimo pari rispettivamente a 2 mm e 6 cm.

La struttura dei blocchi presentata permette anche un facile alloggiamento delle due sonde termiche, indicate con S1 (sonda più vicina alla sorgente di calore, coordinate $r=3$ mm, $z=-2.5$ mm) e S2 (sonda più lontana dalla sorgente di calore, coordinate $r=3$ mm, $z=3.5$ mm nella struttura assemblata), tramite le quali sarà possibile monitorare le temperature di interesse sulla base delle quali andremo a stimare la conducibilità termica del fluido posto nelle celle di misura.

Il sistema dei quattro blocchi di quarzo e dei due blocchi di rame va assemblato e tenuto insieme (serrato) da quattro viti passanti da posizionare come in Figura 15, al fine di garantire la tenuta e l'intimo contatto fra i diversi blocchi.

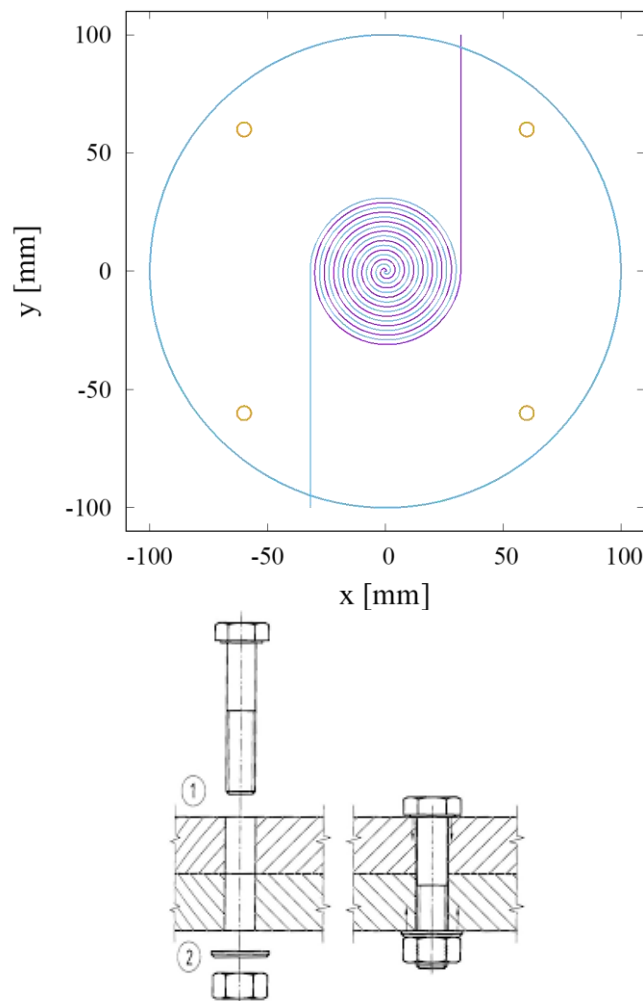


Figura 15: Posizionamento delle viti passanti per il serraggio dei blocchi.

3. Conclusioni

Il dispositivo, proposto in letteratura da D. Kuvshinov et al., sviluppato per operare su scala micro-fluidica e a temperature prossime a quella ambiente, è stato analizzato nel dettaglio, evidenziando aspetti positivi ma anche limiti sia nella progettazione che nel modello unidimensionale adottato, di cui è stato proposto un significativo miglioramento.

Prendendo spunto dagli aspetti positivi del dispositivo micro-fluidico è stato progettato e dimensionato un nuovo dispositivo meso-fluidico, in grado di operare alle temperature di interesse per i sali fusi. La geometria della cella (basso rapporto spessore su diametro) e il fatto che sia chiusa (e quindi si abbiano condizioni di no slip su tutte le superficie della cella) fa sì che (1) il campo convettivo indotto da gradienti di temperatura sia effettivamente trascurabile e che (2) il trasporto di energia avvenga esclusivamente per il contributo conduttivo lungo la direzione verticale si da poter adottare un semplice modello di trasporto unidimensionale.

Fra gli aspetti più innovativi del dispositivo proposto è la predisposizione di due celle di alloggiamento del fluido, simmetriche rispetto alla sorgente termica, e il posizionamento di due sonde termiche.

Il lavoro futuro prevede l'individuazione e l'ottimizzazione dei punti di misura di temperatura (posizionamento delle sonde) tramite modelli dettagliati (CFD) sia in regime stazionario che in regime time-dependent. L'ottimizzazione della posizione delle sonde, così come la scelta del voltaggio applicato al circuito, risulta di fondamentale importanza per lo sviluppo del modello semplificato necessario per la corretta interpretazione del dato sperimentale (temperatura delle sonde) e per la conseguente stima della conducibilità termica del fluido in esame.

4. Riferimenti bibliografici

[1] D. Kuvshinov et al., Thermal conductivity measurement of liquids in a microfluidic device, D. Kuvshinov, M. R. Bown, J. M. MacInnes, R. W. K. Allen, R. Ge, L. Aldous, C. Hardacre, N. Doy, M. I. Newton, G. McHale, *Microfluid Nanofluid* (2011) 10:123–132, DOI 10.1007/s10404-010-0652-x.

[2] Bauer, T. and Breidenbach, N., Overview of Molten Salt Storage Systems and Material Development for Solar Thermal Power Plant, Innostock 2012, The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, Spain, 2012.

[3] Bauer, T., Laing, D. and Tamme, R., Characterization of Sodium Nitrate as Phase Change Material, *International Journal of Thermophysics* 33, pp. 91-104, 2012.

[4] Manohar S. Sohal, Matthias A. Ebner, Piyush Sabharwall, Phil Sharpe, Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties, Idaho National Laboratory, Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, Under DOE Idaho Operations Office INL/EXT-10-18297 March 2010.

Curriculum scientifico

Prof. Alessandra Adrover

Alessandra Adrover is a Full Professor of Chemical Engineering at the Department of Chemical Engineering of Sapienza University of Rome, since 2018. She graduated in Chemical Engineering at Sapienza in 1994. She took the PhD in Chemical Process Engineering from Sapienza in 1997.

She is a member of the committee for the PhD program in Chemical Process Engineering of Sapienza University of Rome. Five PhD theses completed as advisor, and one in progress.

She teaches undergraduate and graduate courses in Chemical Engineering at the Faculty of Civil and Industrial Engineering, Sapienza University of Rome.

She organized several national and international conferences CFIC 96, Roma, September 1996; Fractals in Engineering V, June 2005, Tours, Francia; Workshop on Model Reduction in Reacting Flow, September 2007, Roma. She chaired or co-chaired a number of international workshops or mini symposia.

She gave seminars and invited lectures at Rutgers University, University of North Dakota, Purdue University, New Jersey Institute of Technology, INRIA Rocquencourt.

She is referee for several international journals such as Industrial & Engineering Chemistry, Langmuir, Chemical Engineering Journal, Physica D, Journal of Membrane Science, International Journal of Hydrogen Energy, Chemical Engineering Science.

In the last 25 years she has published 140 research papers in international journals of chemical engineering, fluid mechanics, heat transfer, applied mathematics, computational physics.

Citation record: 1305 citations, h-factor 21.

Research interests: Stochastic approach to transport in liquid-solid systems. Lattice methods for transport phenomena in heterogeneous systems. Modelling and optimization of bioseparation processes.

Renormalization methods for rigorous analysis of transport phenomena in graph systems and fractal structures.

Reduction methods for PDEs. Reacting flows. Simplification and reduction of complex kinetics. Fluid-solid non-catalytic reactions. Modeling of hydrogen transport in palladium membranes. Laminar Mixing theory. Transport processes in microflows. Laminar boundary layer theory. Transport in Polymers. Drug Release. Food process engineering.