



Ricerca di Sistema elettrico

Determinazione sperimentale della conducibilità termica dei fluidi termici per impieghi in impianti CSP

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA AD ALTA TEMPERATURA

Aprile 2022

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – 3ª annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Progetto 1.9 Solare Termodinamico

Linea di attività: WP1 - LA1.11 Determinazione sperimentale della conducibilità termica ad alta temperatura

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 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
1.1 COSTRUZIONE MECCANICA DEL MESO DISPOSITIVO PER LA DETERMINAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA	5
1.2 MODIFICHE STRUTTURALI DELLA CELLA DI MISURA.....	11
1.3 PROVE SPERIMENTALI PER LA DETERMINAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA DI OLIO DIATERMICO	13
1.4 ANALISI DELLE PROVE SPERIMENTALI PER LA DETERMINAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA DELL'OLIO DIATERMICO.....	14
2 CONCLUSIONI.....	27
3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27

Sommario

Come previsto nel Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 del presente progetto, sono stati ultimati lavori relativi alla LA 1.11. È stato costruito il dispositivo meso fluidico per la misura della conducibilità termica di fluidi termovettori operanti ad alta temperatura. Il funzionamento del dispositivo in condizioni operative è stato testato, sei prove sperimentali sono state eseguite a differenti temperature nell'intervallo 100-250°C, utilizzando come campione olio diatermico di cui sono note le proprietà fisiche.

Introduzione

Nel presente report viene descritto il lavoro eseguito per la costruzione meccanica ed assemblaggio del dispositivo finalizzato alla misura della conducibilità termica di fluidi ad alta temperatura. La progettazione ed il design sono stati presentati nelle linee di attività LA 1.9 e LA 1.10, [1].

Alcune difficoltà incontrate durante la costruzione hanno portato ad una ulteriore modifica della struttura del dispositivo. La lavorazione meccanica del quarzo di spessore di 2.5 mm, è stato un passaggio importante a causa della sua fragilità.

Sono state effettuate 6 prove sperimentali a diversi dati di temperatura del forno T_0 utilizzando come campione olio diatermico Therminol 66 le cui proprietà fisiche sono note, con l'obiettivo di valutare in modo preliminare il funzionamento del dispositivo stesso.

1 Descrizione delle attività svolte e risultati

1.1 Costruzione meccanica del meso dispositivo per la determinazione della conducibilità termica

I dischi di quarzo sono stati lavorati utilizzando un pantografo a 2 assi e $\frac{1}{2}$ della Mecanumeric modello Charly4U. I dischi sono stati lavorati utilizzando 2 tipologie di frese diamantate. La prima è del tipo a candela con diametro di 3,5mm utilizzata per realizzare i fori di fissaggio e le tasche per il contenimento dei campioni. La seconda è una fresa a sfera di 1mm di diametro per la realizzazione della cava del cavo scaldante. Tali frese lavorano ad un alto numero di giri e per evitare surriscaldamenti devono essere raffreddate ad acqua.

In una lastra di policarbonato è stata ricavata una tasca per contenere i dischi di quarzo. Questa assolveva la doppia funzione di bloccare il disco durante la lavorazione e contenere l'acqua necessaria al raffreddamento della fresa. In questo modo tutte le lavorazioni sono state effettuate con l'utensile che lavorava in immersione di acqua. Ciò ha permesso di limitare il consumo di utensili.

La lavorazione è stata un'operazione che ha richiesto molto tempo, dal momento che le frese asportavano una quantità minima di materiale ad ogni passata.

I parametri di lavorazione meccanica sono stati fissati ad i seguenti valori, n° di giri 24.000 giri/s, velocità di avanzamento utensile 0,05 mm/s e profondità singola passata 0,07mm.

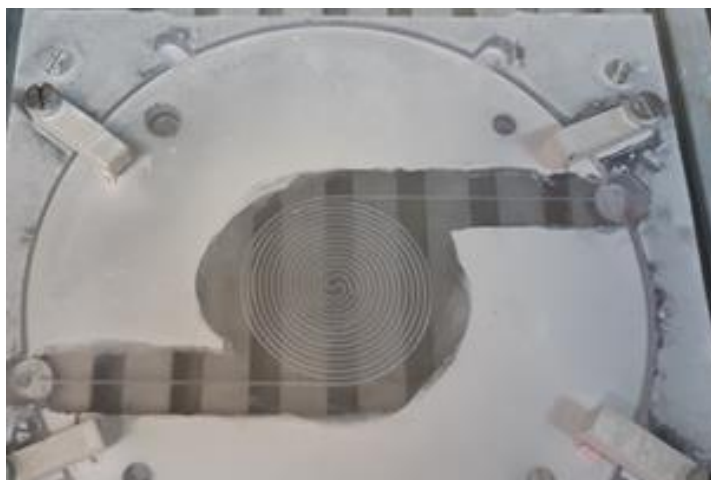


Figure 1 Foto del disco C3 fissato nella lastra di policarbonato con fori di fissaggio e cava realizzati (il bianco che si vede è la polvere di quarzo che rimane depositata una volta tolta l'acqua).

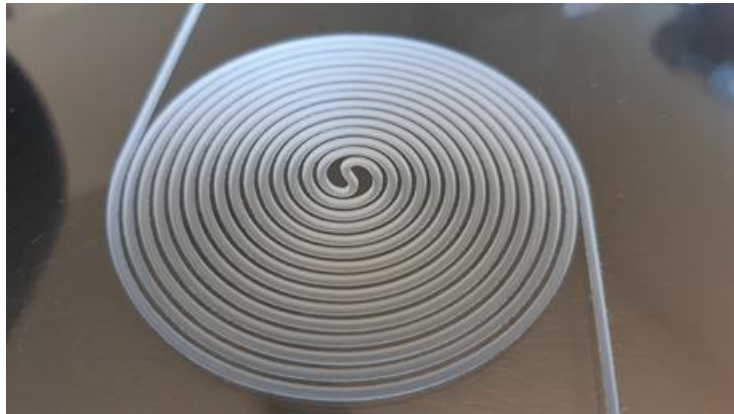


Figura 2 La cava a doppia spirale archimedeica incisa su dischi di quarzo per il cavo scaldante.

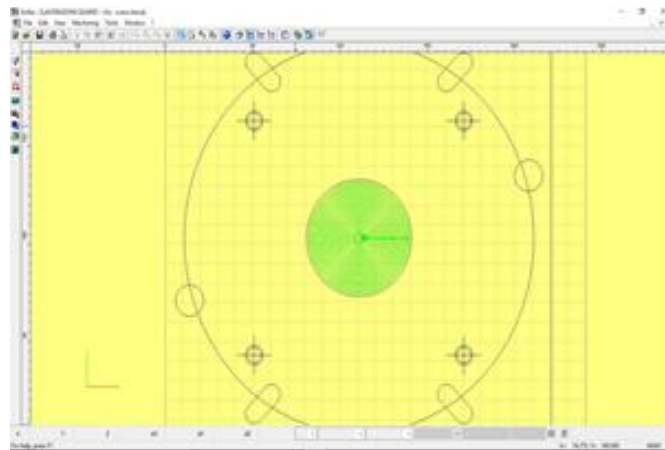


Figura 3 Schermata del software CAM relativo alla lavorazione della tasca porta campione, in verde è indicato il percorso utensile.

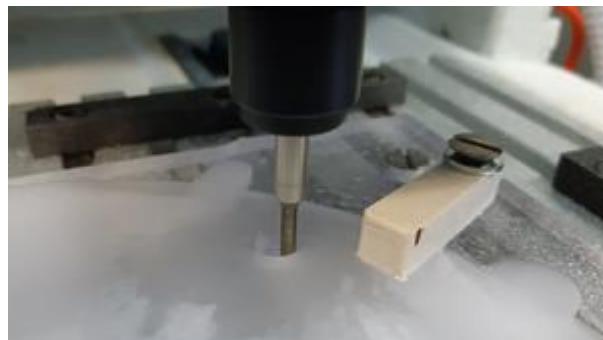


Figure 4 Lavorazione nella quale viene effettuato uno dei fori per il fissaggio tramite la fresa a candela.



Figure 5 Test per la misura della resistenza elettrica del cavo a treccia Ni/Cr.

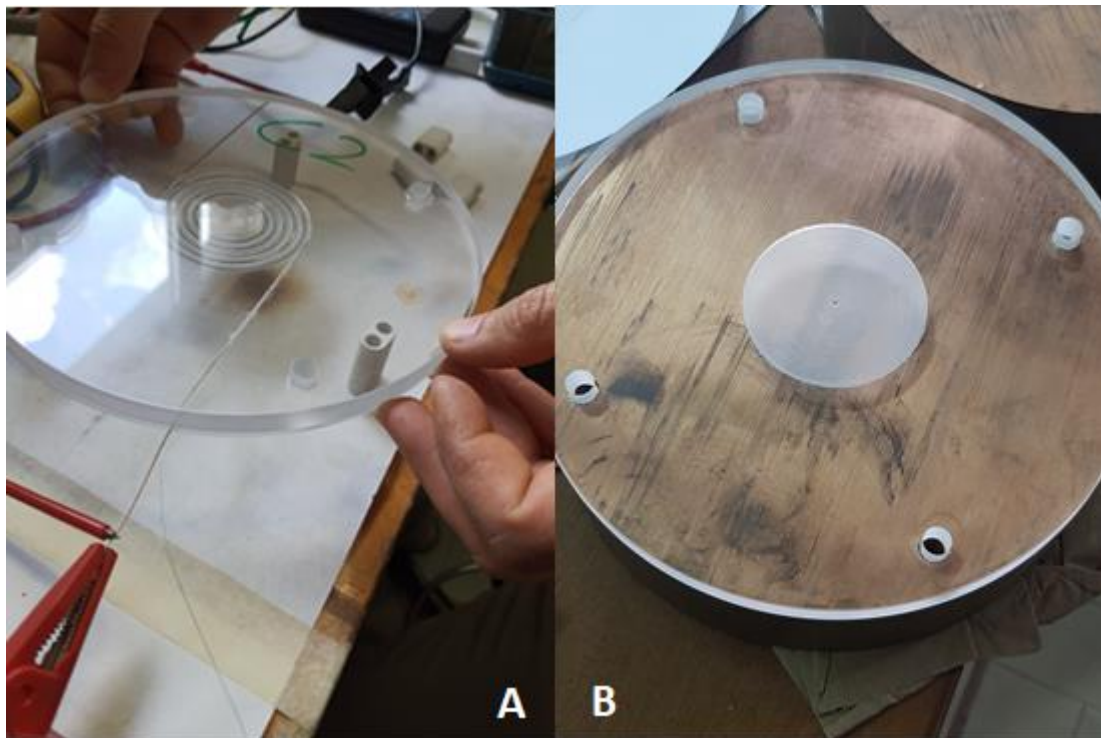


Figure 6 (A) Misura della resistenza del cavo scaldante, (B) Cava per l'alloggiamento del fluido.

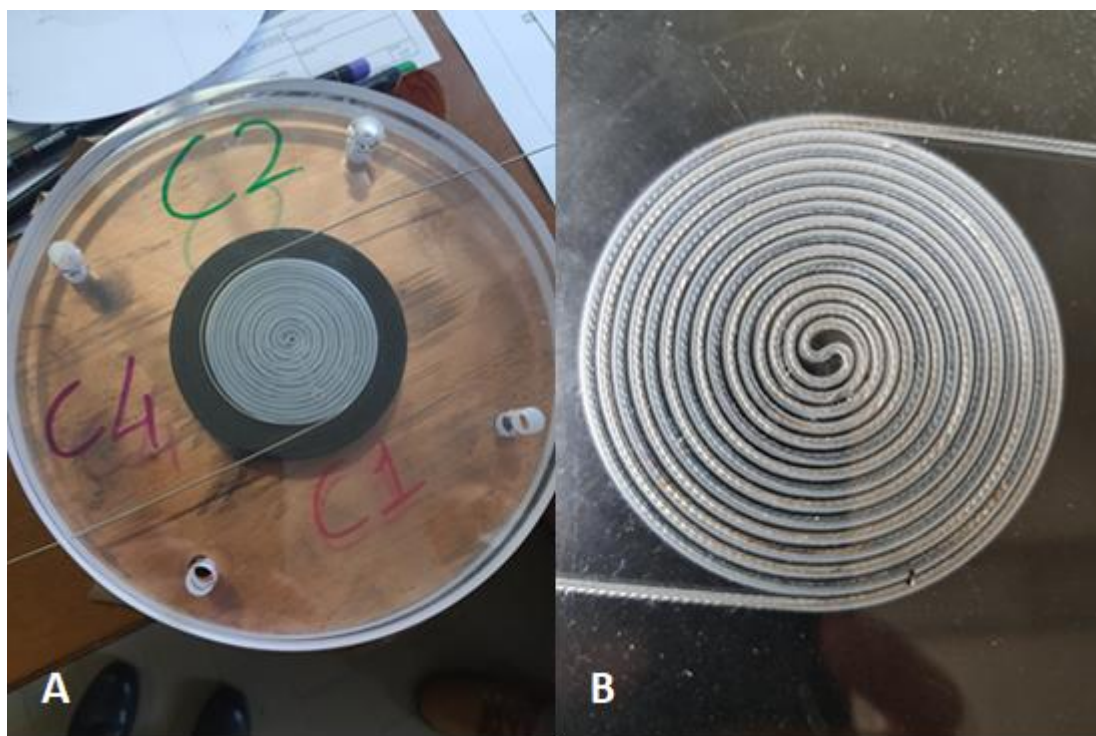


Figure 7 Filo scaldante a treccia incastonato all'interno dell'alloggiamento ricavato sul disco di quarzo C3.

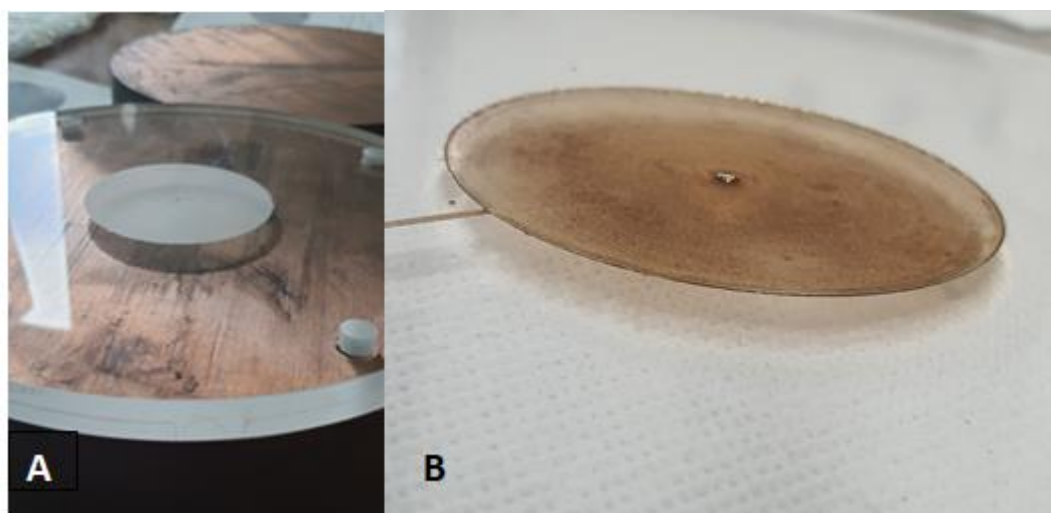


Figure 8 Cella di alloggiamento del fluido prima e dopo delle prove sperimentali.

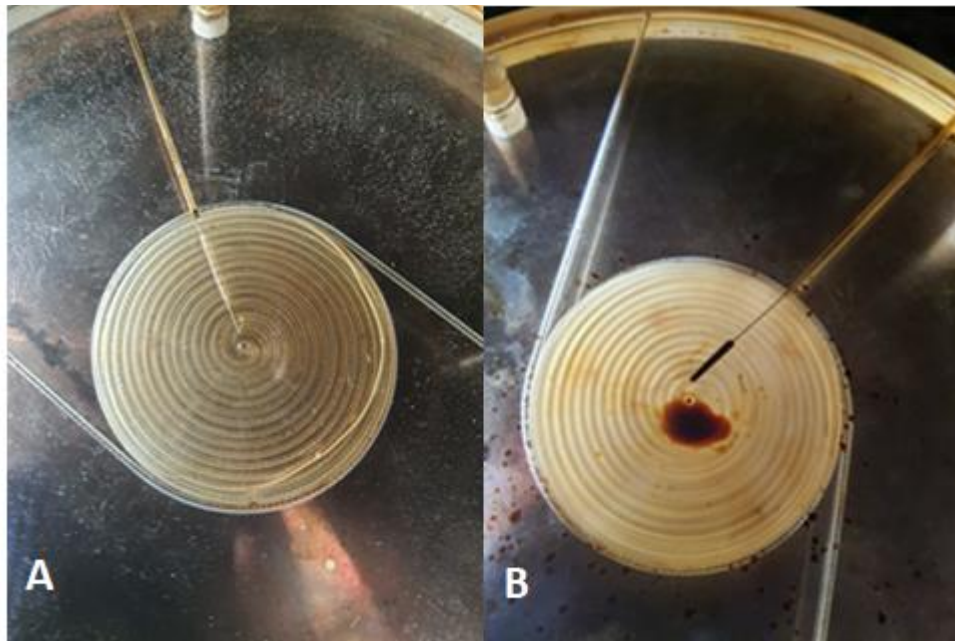


Figure 9 Alloggiamento superiore del fluido, (A) olio caricato ad inizio della prova, (B) olio alla fine di un set di prove sperimentali.

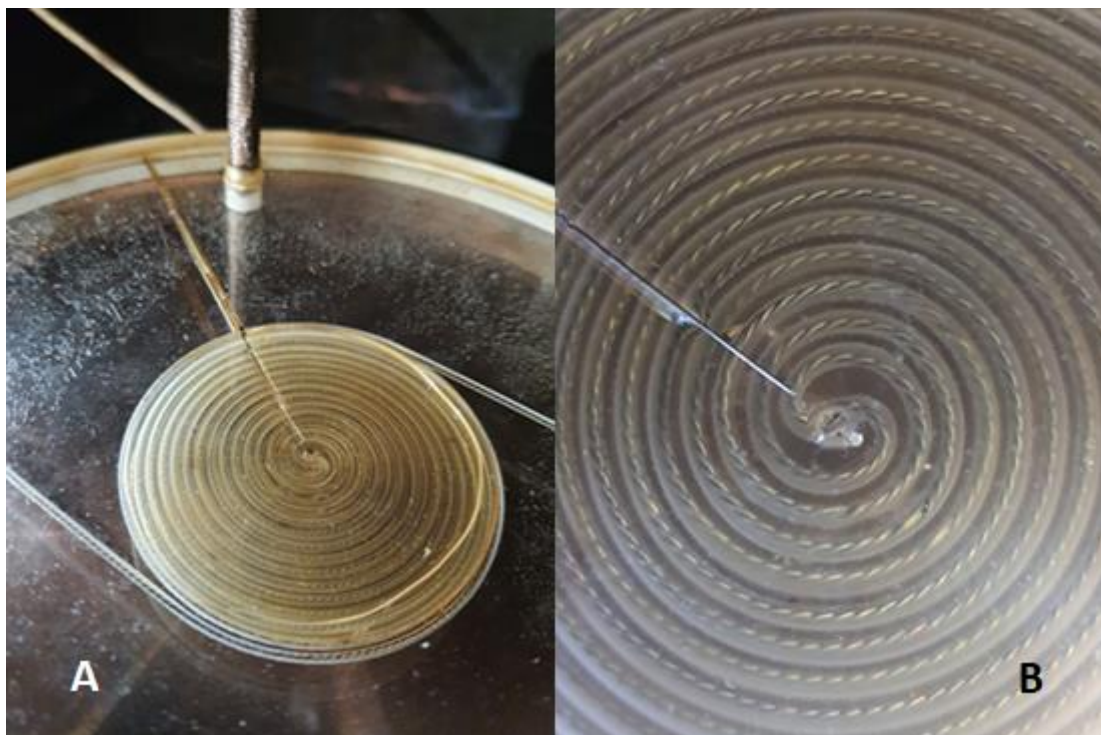


Figure 10 (A)-(B), Dettaglio del cavo scaldante e sonda di temperatura.

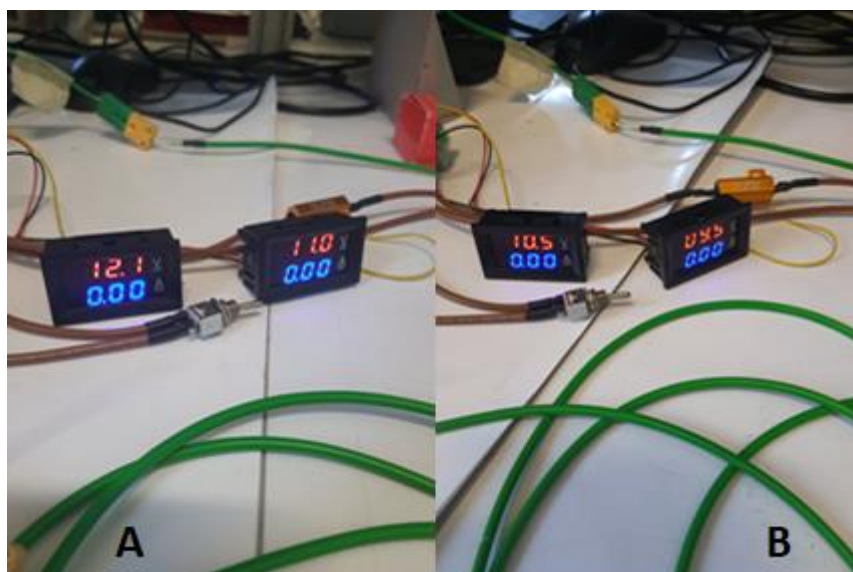


Figure 11 Display dei Voltmetri collegati al circuito di alimentazione del cavo scaldante.

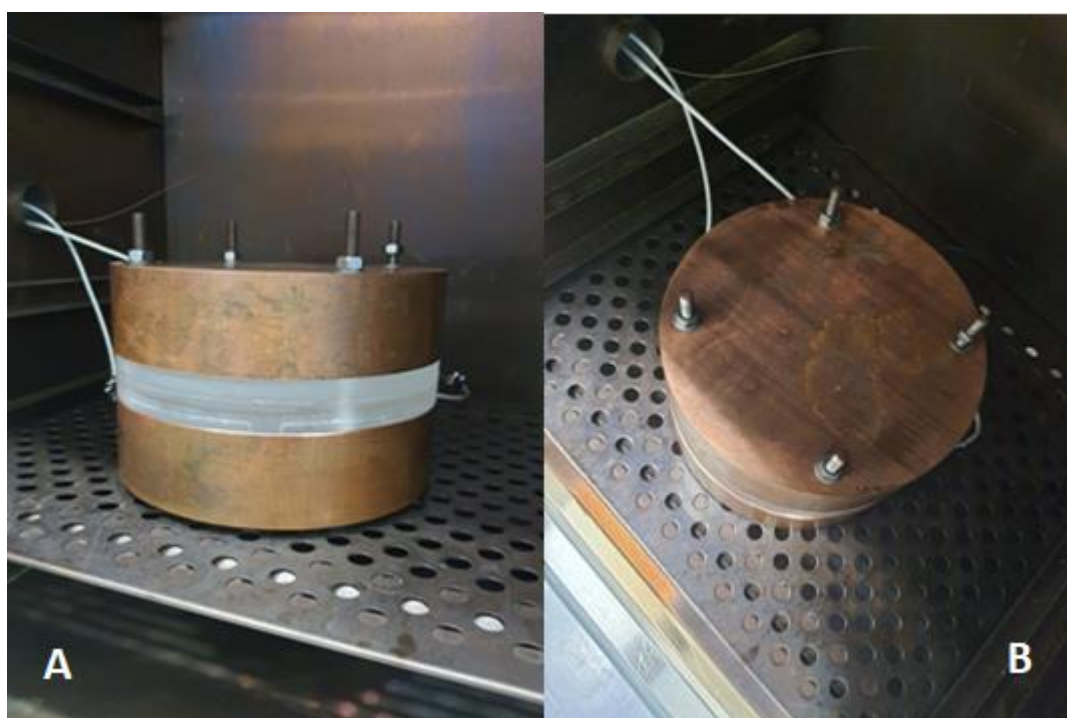


Figure 12 Cella di misura assemblata e inserita all'interno del forno.

1.2 Modifiche strutturali della cella di misura

La struttura dei blocchi di quarzo realizzata ha subito delle variazioni rispetto al progetto iniziale del dispositivo, la variazione geometrica riguarda l'incastonatura del filo scaldante. La prima struttura del quarzo prevedeva che l'incastonatura del filo scaldante nel blocco di quarzo potesse essere realizzata, dividendo il blocco di quarzo in due parti, una superiore ed una inferiore, dischi C4-C3 Figura 13. A causa di difficoltà nella lavorazione del quarzo, si è scelto di ricavare l'incastonatura del cavo scaldante solo sul disco C3, Figura 14.

Non è stato semplice realizzare le incisioni sui dischi di quarzo di piccolo spessore sia per l'alloggiamento del filo scaldante che per le celle del fluido oggetto di analisi. Il quarzo come i materiali ceramici è fragile si rompe non ha duttilità, ha una bassa tolleranza alla concentrazione degli stress come fori o fratture.

Il circuito di alimentazione del cavo scaldante è stato realizzato come previsto nel progetto iniziale con una batteria da 12 V, una resistenza di prova da 1 ohm e due voltmetri collegati sulla resistenza di prova e sul cavo scaldante per avere una misura della tensione che attraversa il filo, Figura 15.

In fase di costruzione è stato necessario sostituire il cavo scaldante inizialmente previsto di Ni/Cr 80/20 e diametro pari a 1mm, con un cavo dello stesso materiale realizzato intrecciando tre cavi uguali, ciascuno dei quali ha un diametro pari a $d_{filo} = 0.3 \text{ mm}$.

Il motivo di questa scelta è giustificato dal fatto che il filo scaldante a treccia si è adattato meglio all'interno della cava ricavata sul disco di quarzo C3, rispetto al cavo da 1 mm di diametro, Figura 16.

La struttura dell'elemento scaldante, incastonato in un blocco di quarzo, è realizzata tramite avvolgimento a doppia spirale archimedeo del cavo intrecciato. La superficie totale del cavo così realizzato è pari a 3 volte la sezione di un singolo cavo da 0.3 mm di diametro. La lunghezza totale del filo è 1.8 m.

La resistenza elettrica del filo a treccia calcolata a 250°C è pari a 9.52 Ohm, considerando la resistività elettrica in funzione della temperatura $\rho = 1.08 \times 10^{-6} + 1.5079 \times 10^{-10}(T - 293.15) \Omega m$.

Per una differenza di potenziale applicata di 12V, si ha una potenza totale dissipata P nel filo a 250°C pari a 12.38 W ed una $I=1.14 \text{ A}$.

$$P = R_f \frac{\Delta V^2}{(R + R_f)^2} \quad (1)$$

$$I = \frac{\Delta V}{R + R_f} \quad (2)$$

L'accumulatore non mantiene fisso il valore di tensione durante la prova sperimentali perché ovviamente si scarica, i valori di potenza a cui sono state fatte le prove sperimentali variano tra 12 e 8.5 W; quindi, la batteria verrà sostituita da un alimentatore.

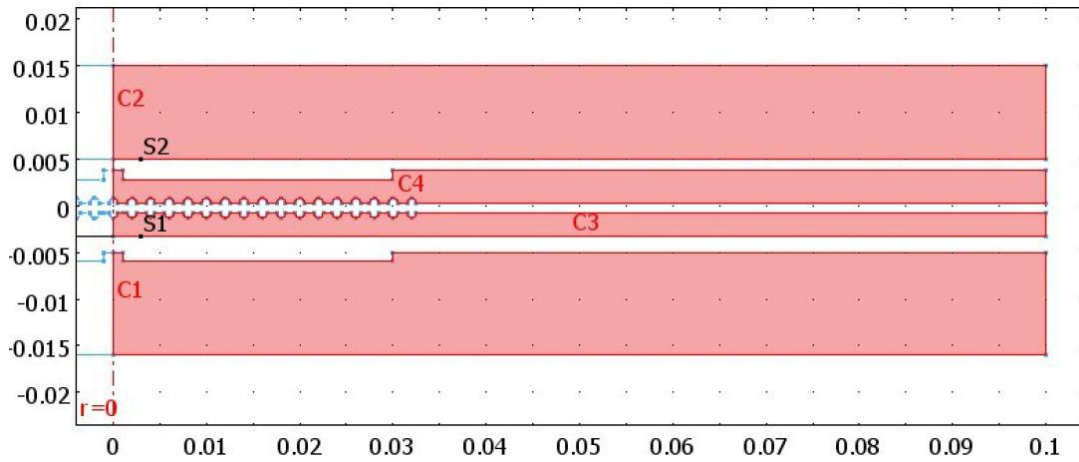


Figure 13 Nel progetto iniziale la struttura dei blocchi di quarzo necessari all'assemblaggio del dispositivo, (esclusi i blocchi superiore e inferiore di rame, di pari diametro) e il posizionamento del filo scaldante.

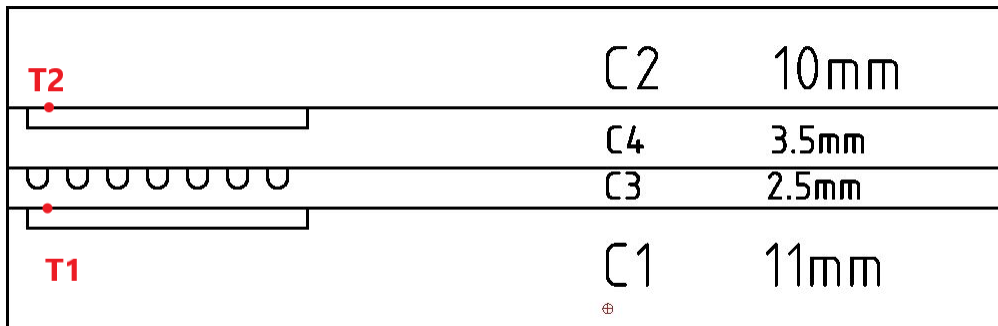


Figure 14 Schema dei blocchi di quarzo realizzata per la cella di misura, l'incastonatura del cavo scaldante è stata ricavata sul disco C3.

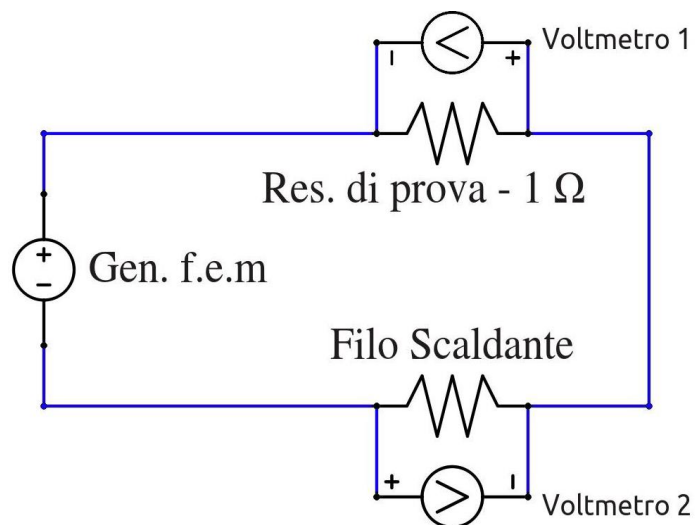


Figure 15 Circuito di alimentazione del cavo scaldante.



Figure 16 Filo scaldante a treccia incastonato all'interno dell'alloggiamento nel quarzo, all'esterno il cavo scaldante da 1 mm.

1.3 Prove sperimentali per la determinazione della conducibilità termica di olio diatermico

Le prove sperimentali sono state effettuate con l'impiego dell'olio diatermico therminol 66, circa 1 ml di olio è stato inserito all'interno delle celle di alloggiamento del fluido.

È necessario fare attenzione alla quantità di olio diatermico che si mette nel volume della cella che è pari a 2.6 ml, per evitare fuoriuscite del fluido che possono rovinare il sistema. Il therminol 66 presenta un coefficiente di espansione termica a 200°C pari a $0.000819 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, e la variazione di volume dell'olio tra i 30-200°C è pari a $V=1.14 V_{\text{iniziale}}$.

Durante le prove il dispositivo di misura è all'interno del forno, le sonde di temperatura T1 e T2 sono inserite all'interno del quarzo, la T1 è più alta perché più vicina all'elemento scaldante, e le temperature sono registrate dall'inizio della prova. La temperatura del forno parte da temperatura ambiente fino al valore di set point, che è relativo alla temperatura a cui si sta svolgendo la prova sperimentale.

Gli unici valori registrati durante le prove sono T1 e T2, la temperatura del forno viene impostata al controllore e si può leggere la tensione ai capi delle resistenze nel circuito di alimentazione del filo scaldante. Nei grafici in cui è riportata l'intera prova si vedono le curve iniziali di salita in temperatura T1, T2 nel blocco di quarzo relative al riscaldamento del forno fino al valore di set point, figura 18 A come esempio.

Quando la temperatura nei blocchi di quarzo è prossima al set point del forno, il circuito del cavo scaldante viene acceso generando un aumento di temperatura del fluido e quindi una differenza $\Delta T_1 = (T_1 - T_0)$ e $\Delta T_2 = (T_2 - T_0)$. Le due temperature delle sonde T1 e T2 hanno una durata temporale variabile per ogni prova, il circuito del cavo scaldante è stato chiuso a differenti istanti di tempo in ogni prova.

1.4 Analisi delle prove sperimentali per la determinazione della conducibilità termica dell'olio diatermico

La conducibilità termica del fluido oggetto di analisi viene calcolata tramite il modello (1), in cui $\Delta T_1 = (T_1 - T_0)$ e $\Delta T_2 = (T_2 - T_0)$ sono valori stimati tramite best fit dei dati sperimentali misurati dalle due sonde con le equazioni 4-7.

La difficoltà nell'utilizzo del dispositivo è rappresentata dalla stima dei valori asintotici T_1 e T_2 tenendo in considerazione che, essi rappresentano i valori asintotici misurati dalle sonde durante una prova, nel caso in cui la convezione forzata del forno sia perfetta, e quindi si possa assumere $h \rightarrow \infty$.

$$\lambda(T_{av}) = \delta \frac{\frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_2}}{\frac{\delta_Q}{\lambda_Q(T_{av}^Q)} + \frac{\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu}}} \quad (1)$$

$$T_{av} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2)$$

$$T_{av}^Q = \frac{T_2 + T_0}{2} \quad (3)$$

La λ dell'olio diatermico viene calcolata ad un valore medio della temperatura T_{av} , le proprietà del quarzo sono stimate tramite interpolazione lineare dei dati presenti in letteratura, quelle del rame sono valutate alla temperatura T_0 .

Le funzioni di best fit sono $T(t)$ e $T'(t)$ in cui i parametri ΔT_1 e ΔT_2 corrispondono ai valori asintotici T_1 e T_2 da inserire nel modello (1), τ (sec) è un tempo caratteristico del sistema cella di misura che tiene conto sia della sua capacità termica, sia di quanto tempo impiega il dispositivo stesso ad arrivare alla sua temperatura di equilibrio, relativa alla prova sperimentale che si sta svolgendo (mentre si fornisce potenza), t_0 (sec) è il tempo al quale la temperatura misurata nel blocco di quarzo è pari a quella di set point del forno T_0 . Il valore γ è uguale per entrambe le funzioni e pari a 0.045 K/min , dipende esclusivamente dal coefficiente di trasferimento h .

$$T_1(t) = T_0 + \Delta T_1(1 - e^{-((t-t_0)/\tau_1)}) + \gamma_1(t - t_0) \quad (4)$$

$$T_1'(t) = T_0 + \Delta T_1(1 - e^{-((t-t_0)/\tau_1)}) \quad (5)$$

$$T_2(t) = T_0 + \Delta T_2(1 - e^{-((t-t_0)/\tau_2)}) + \gamma_2(t - t_0) \quad (6)$$

$$T_2'(t) = T_0 + \Delta T_2(1 - e^{-((t-t_0)/\tau_2)}) \quad (7)$$

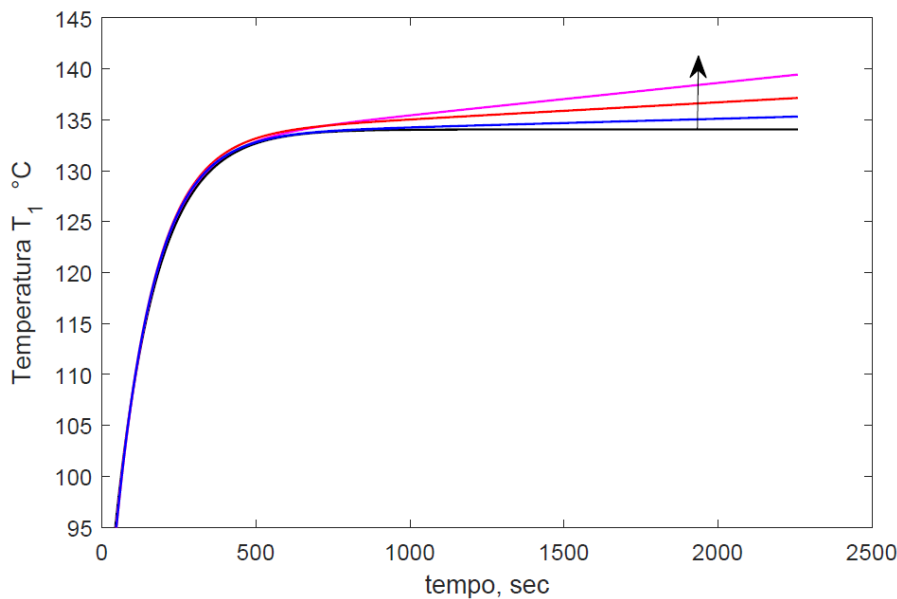


Figure 17, T_1 in funzione del tempo a differenti valori di γ . Eq.4 Il caso $\gamma=0$ è rappresentato dalla linea nera, la freccia indica γ crescenti.

La figura 17 mostra il caso $\gamma = 0$ in cui è verificata la condizione $h \rightarrow \infty$, che corrisponde all'imposizione della condizione al contorno $T = T_0$ su tutto il dominio della cella di misura, esposta alla convezione forzata del forno.

Le figure 24 e 28 mostrano le prove 4 e 6 in cui il dispositivo in rampa di salita e discesa della temperatura risente della sua inerzia termica dovuta al rame ed al quarzo, in quanto la temperatura continua a crescere (prova 4) o a diminuire (prova 6). Per tenere conto di questo effetto è necessario acquisire la temperatura dei blocchi di rame e dei blocchi di quarzo esternamente.

Per il calcolo della λ gli spessori del quarzo sono riportati in figura 14, ai quali si deve sottrarre 1 mm che corrisponde all'altezza di una cava per l'alloggiamento del fluido rispettivamente sui due dischi C4 e C1. Lo spessore della cava per l'incastonatura del cavo è 1.05 mm sul disco C3. I dischi di rame hanno uno spessore totale di 100 mm a cui bisogna sottrarre 1.7 mm su un disco ed 1 mm sull'altro a seguito della lavorazione meccanica per rendere piane le superfici dei dischi di rame.

Il valore di conducibilità termica dell'olio stimato dal modello (1) è consistentemente più basso del valore reale. La conducibilità termica dell'olio diatermico therminol 66 nell'intervallo di temperatura 60-250°C varia tra 0.1158-0.1004 W/(mK).

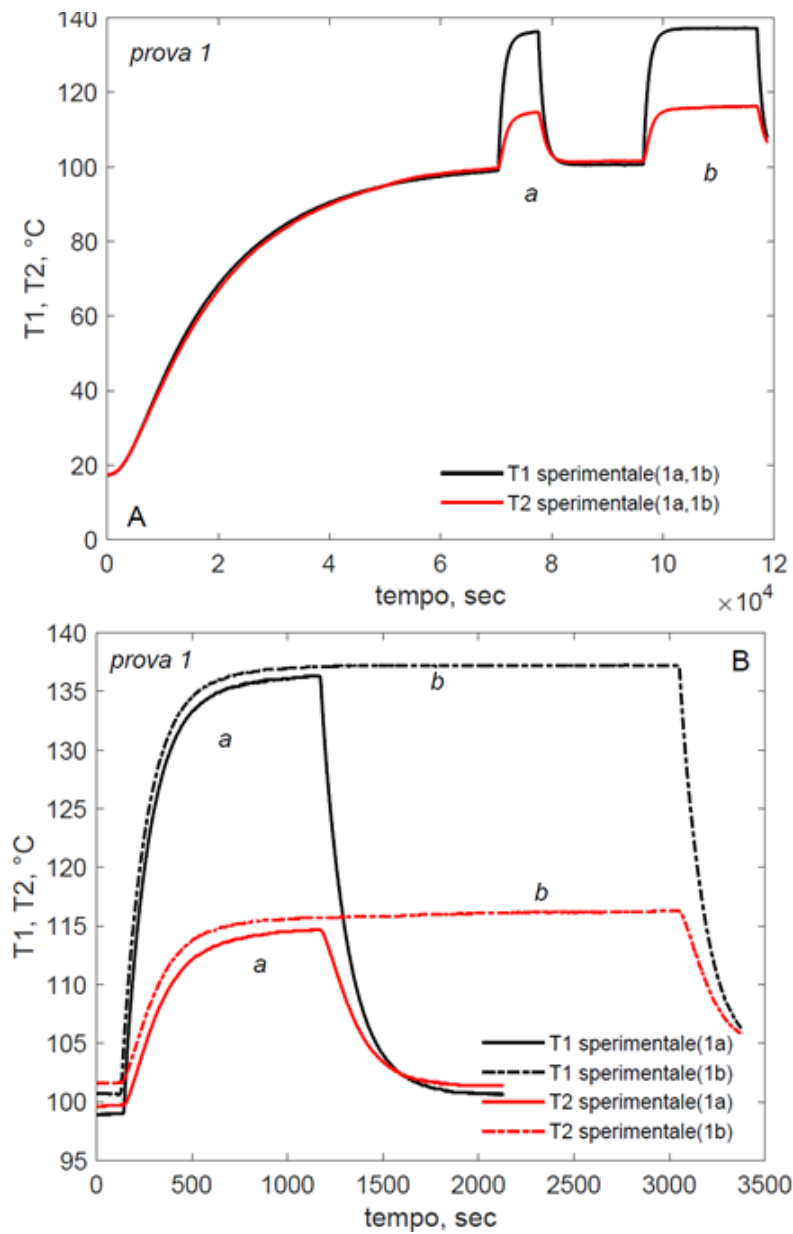


Figure 18 Prova 1, (A) temperature T_1 e T_2 misurate dalle due sonde in funzione del tempo nel blocco di quarzo in cui è inserito l'olio diatermico, (a) e (b) sono relativi all'accensione del circuito del cavo scaldante, la temperatura del forno è $T_0=100^\circ\text{C}$, (B) Prova 1, dettaglio T_1 (a) e (b), T_2 (a) e (b).

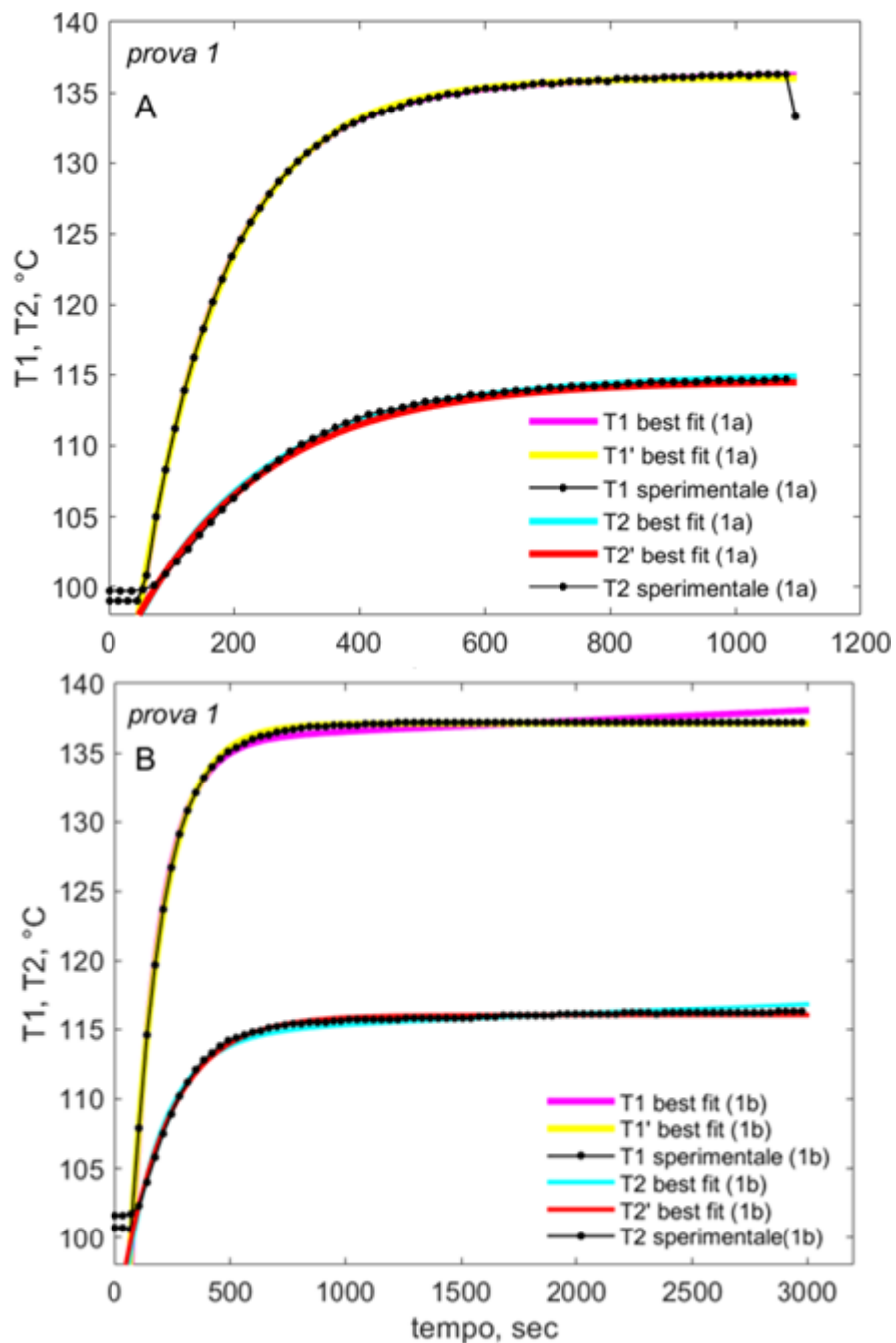


Figure 19 Prova 1 (A)-(B) I punti neri rappresentano i dati sperimentali T_1 e T_2 , le curve a tratto pieno il best fit sulla base delle Equazioni 4-7.

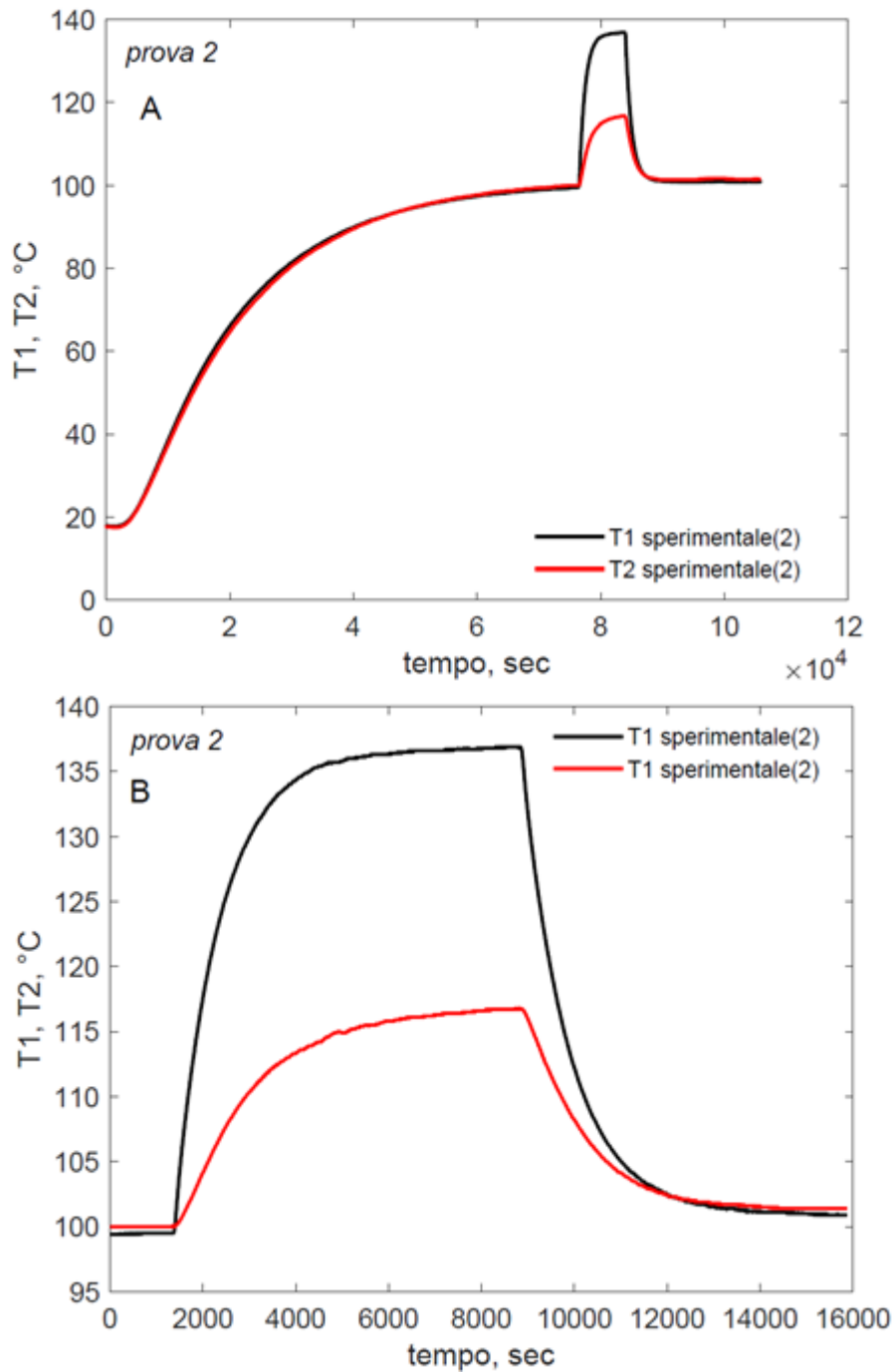


Figure 20 Prova 2, (A) temperature T_1 e T_2 misurate dalle due sonde in funzione del tempo nel blocco di quarzo in cui è inserito l'olio diatermico, raggiunta T_0 le curve di temperatura sono relative all'accensione del circuito del cavo scaldante, la temperatura del forno è $T_0=100^\circ$. (B) Prova 2, dettaglio T_1 , T_2 .

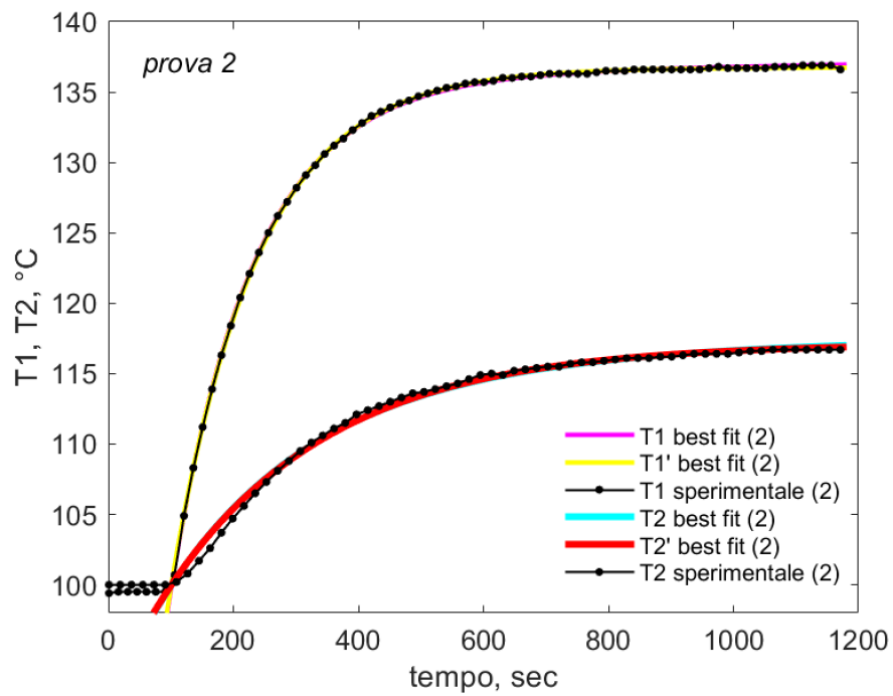


Figure 21 Prova 2, I punti neri rappresentano i dati sperimentali T_1 e T_2 , le curve a tratto pieno il best fit sulla base delle Eq. 4-7.

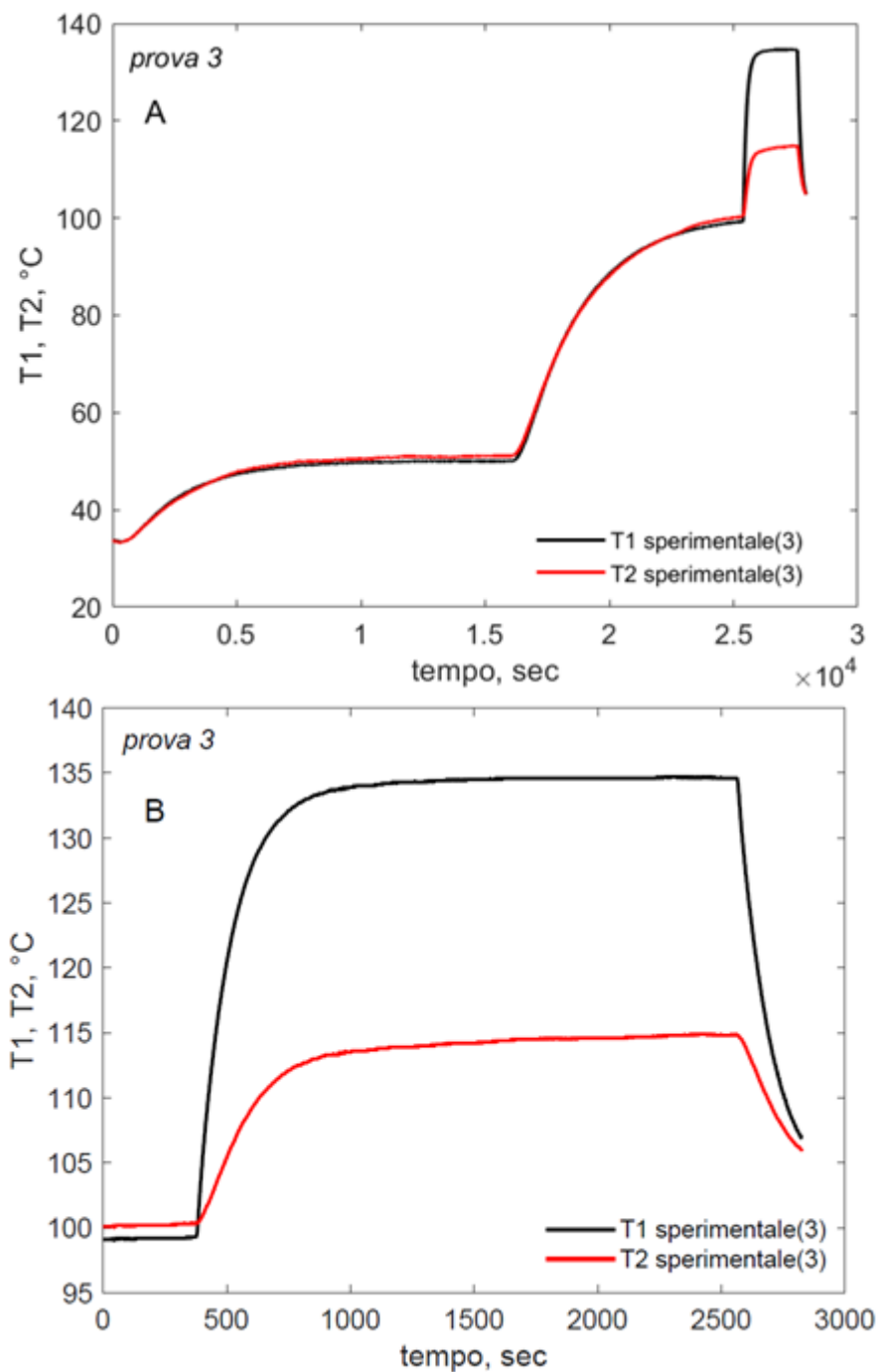


Figure 22 Prova 3, (A) temperature T_1 e T_2 misurate dalle due sonde in funzione del tempo nel blocco di quarzo in cui è inserito l'olio diatermico, raggiunta T_0 le curve di temperatura sono relative all'accensione del circuito del cavo scaldante, la temperatura del forno è $T_0=100^\circ$. (B) Prova 3, dettaglio T_1 , T_2 .

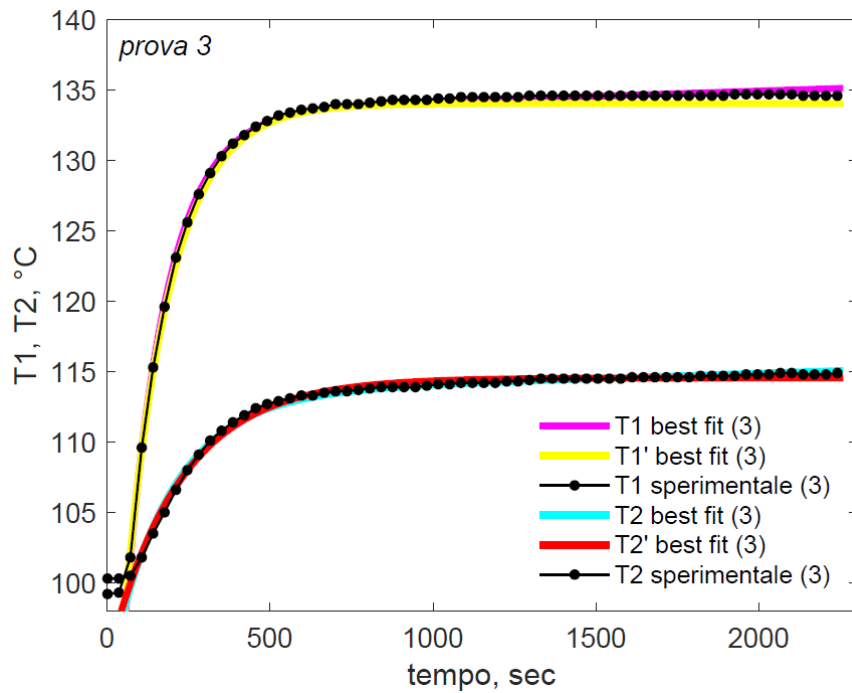


Figure 23 Prova 3, I punti neri rappresentano i dati sperimentali T1 e T2, le curve a tratto pieno il best fit sulla base delle Eq.4-7.

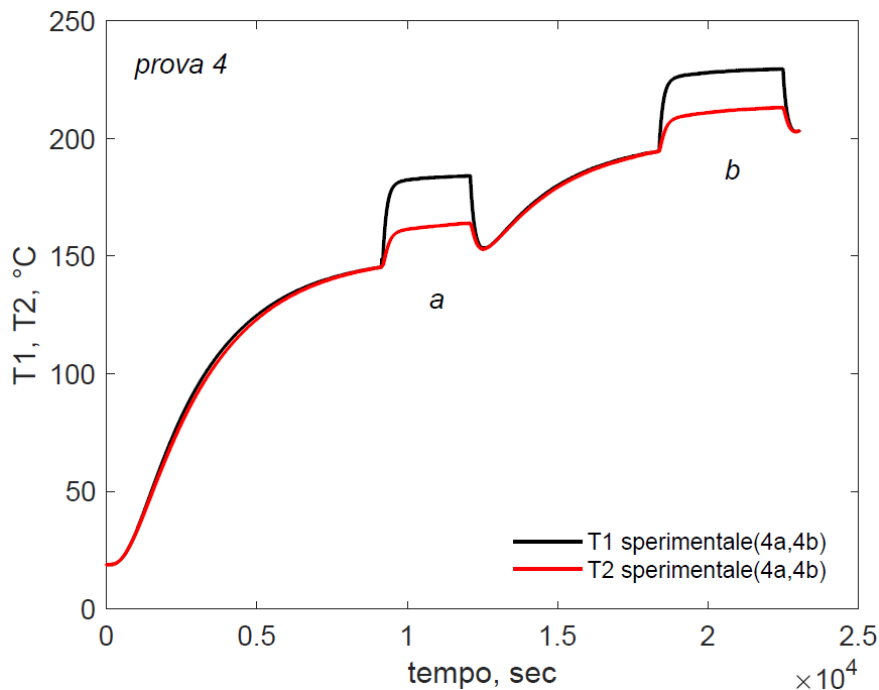


Figure 24 Prova 4, temperature T1 e T2 misurate dalle due sonde in funzione del tempo nel blocco di quarzo in cui è inserito l'olio diatermico, (a) e (b) sono relativi all'accensione del circuito del cavo scaldante, la temperatura del forno è $T_0=150^{\circ}\text{C}$ per (a) e $T_0=200^{\circ}\text{C}$ per (b).

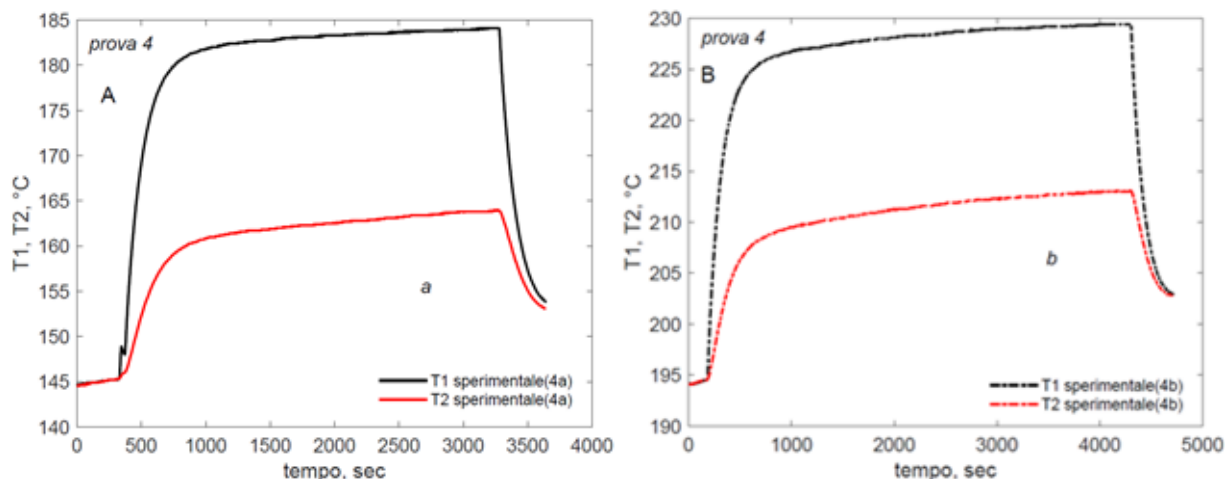


Figure 25 (A) (B) Prova 4, T1 T2 misurate durante l'accensione del circuito del cavo scaldante, per (a) $T_0=150^{\circ}\text{C}$, per (b) $T_0=200^{\circ}\text{C}$.

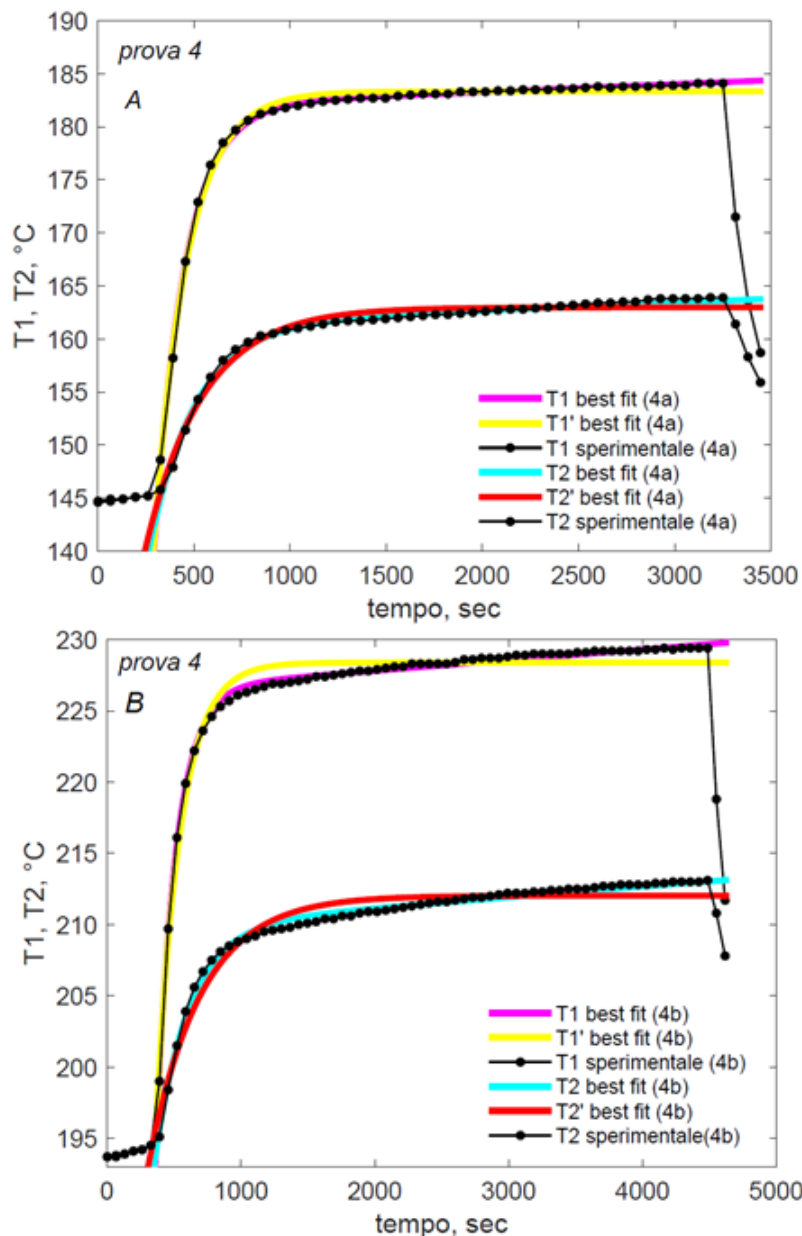


Figure 26 Prova 4 (A)-(B), I punti rappresentano i dati sperimentali T1 e T2, le curve a tratto pieno il best fit sulla base delle Eq. 4-7, per (a) $T_0=150^{\circ}\text{C}$, per (b) $T_0=200^{\circ}\text{C}$.

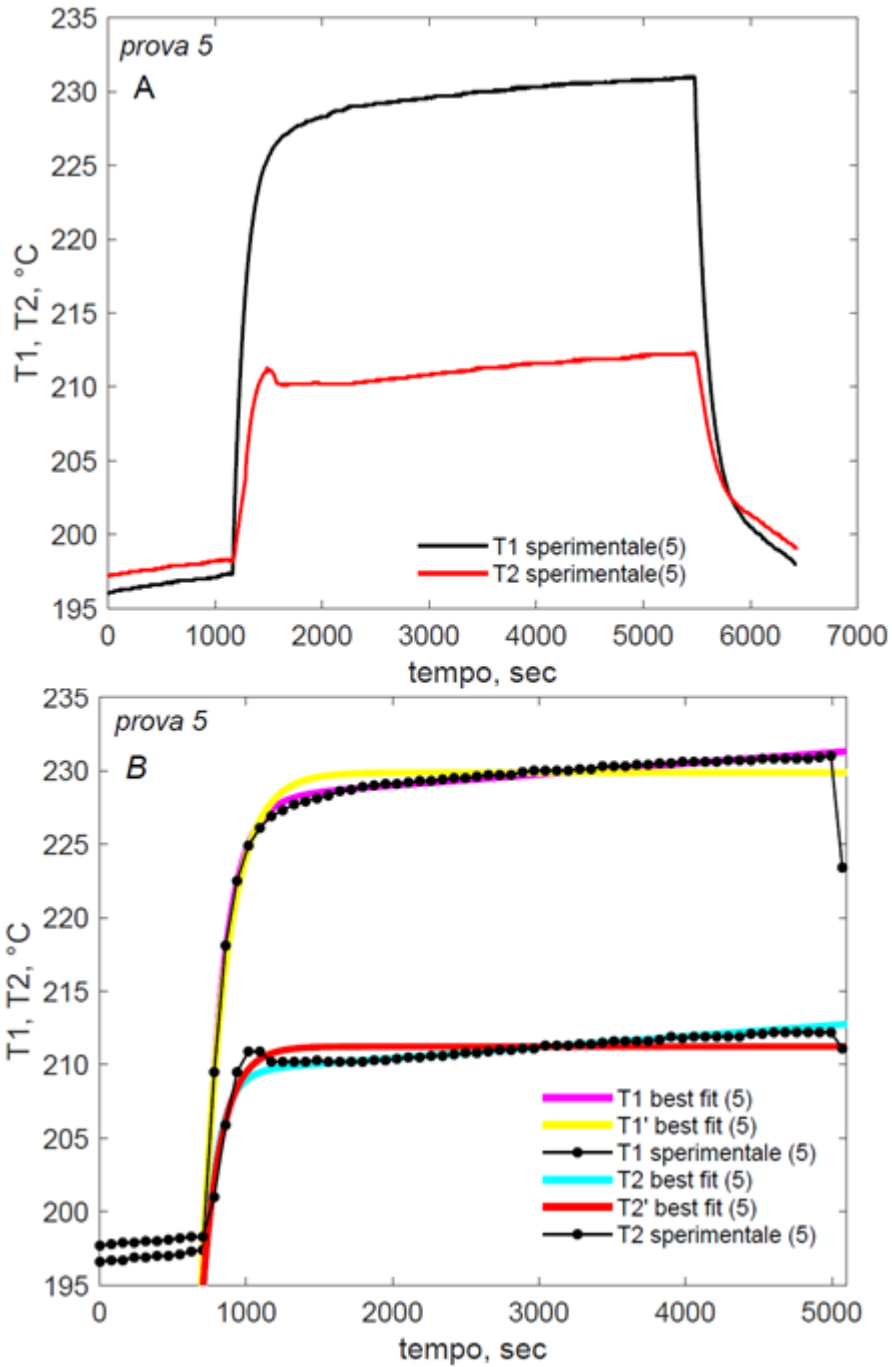


Figure 27 Prova 5, (A) temperature T_1 e T_2 misurate dalle due sonde in funzione del tempo nel blocco di quarzo in cui è inserito l'olio diatermico, raggiunta T_0 le curve di temperatura sono relative all'accensione del circuito del cavo scaldante, la temperatura del forno è $T_0=200^\circ\text{C}$.
(B) Prova 5, I punti rappresentano i dati sperimentali T_1 e T_2 , le curve a tratto pieno il best fit sulla base delle Eq. 4-7.

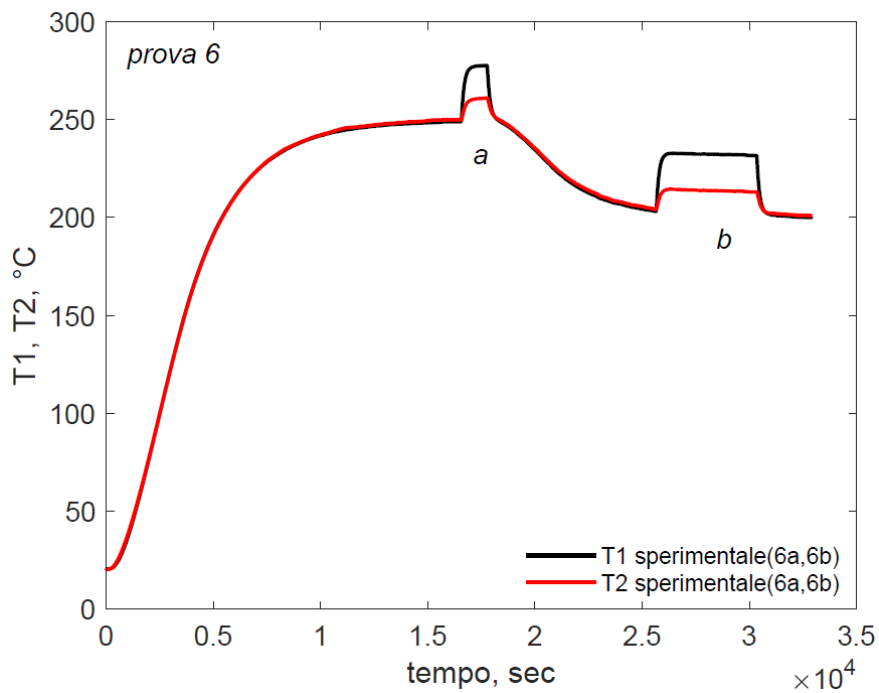


Figure 28 Prova 6, temperature T1 e T2 misurate dalle due sonde in funzione del tempo nel blocco di quarzo in cui è inserito l'olio diatermico, (a) e (b) sono relativi all'accensione del circuito del cavo scaldante, la temperatura del forno è $T_0=250^\circ\text{C}$ per (a) e $T_0=200^\circ\text{C}$ per (b).

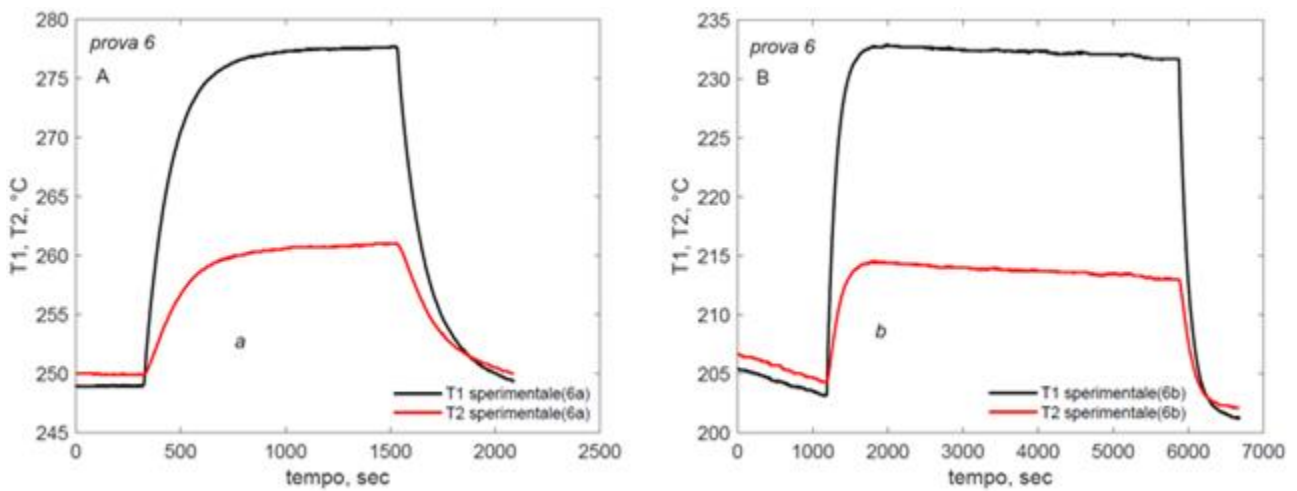


Figure 29 Prova 6 (A)-(B), T₁ T₂ misurate durante l'accensione del circuito del cavo scaldante, per (a) $T_0=250^\circ\text{C}$, per (b) $T_0=200^\circ\text{C}$.

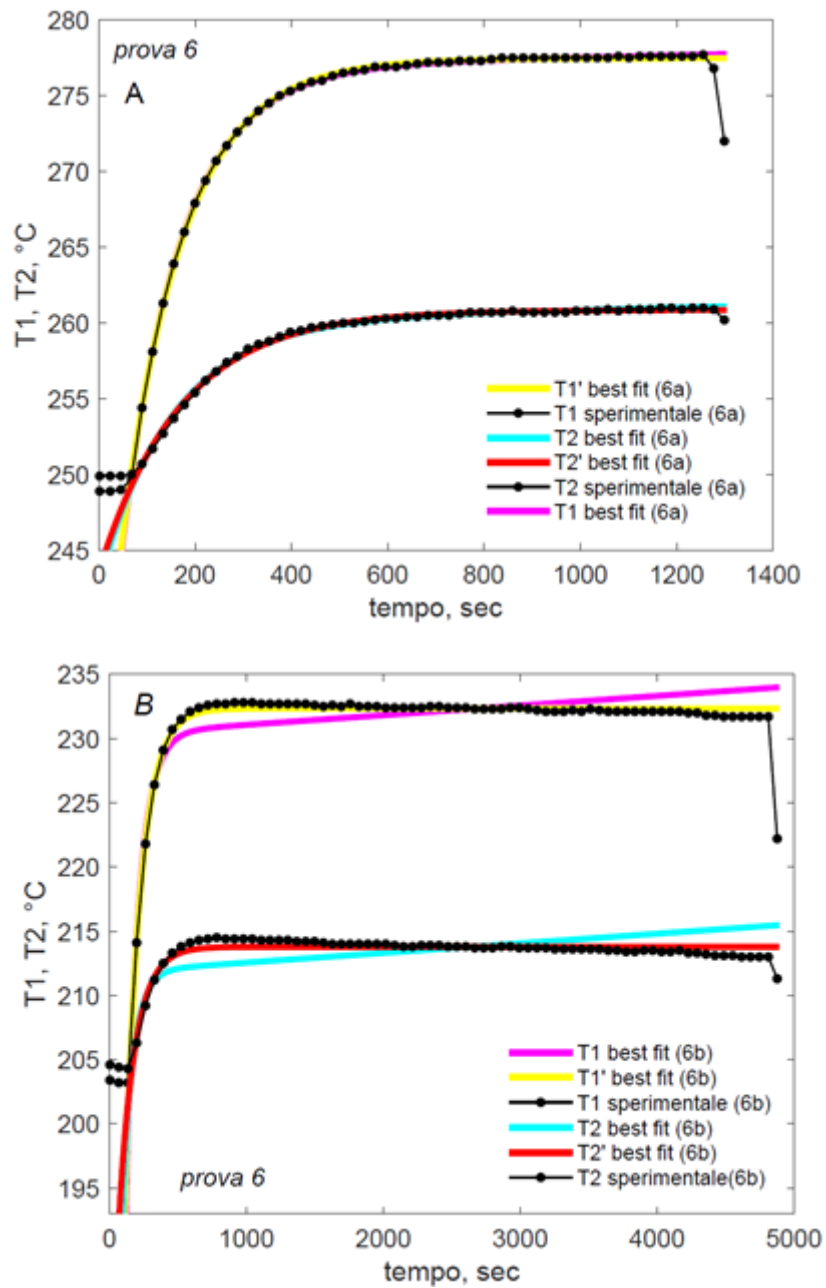


Figure 30 Prova 6 (A)-(B), I punti rappresentano i dati sperimentali T_1 e T_2 , le curve a tratto pieno il best fit sulla base delle Eq. 4-7, per (a) $T_0=250^\circ\text{C}$, per (b) $T_0=200^\circ\text{C}$.

Table 1 Parametri di best fit ΔT , τ e t_0 per ogni prova sperimentale, Eq. 4-7.

prova	T0 °C	Funzione di best fit	ΔT_1	τ_1	t_0	prova	T0 °C	Funzione di best fit	ΔT_2	τ_2	t_0
1a, T1	100	$T_1(t)$	35,45	132,14	56,24	1a, T2	100	$T_2(t)$	14,19	198,36	76,19
1a, T1	100	$T'_1(t)$	36,04	136,37	55,65	1a, T2	100	$T'_2(t)$	14,58	210,01	75,68
1b, T1	100	$T_1(t)$	35,87	124,37	76,15	1b, T2	100	$T_2(t)$	14,68	165,51	81,37
1b, T1	100	$T'_1(t)$	37,13	138,73	72,54	1b, T2	100	$T'_2(t)$	16,03	206,45	74,22
2, T1	100	$T_1(t)$	36,15	132,87	101,42	2, T2	100	$T_2(t)$	16,41	248,37	101,5
2, T1	100	$T'_1(t)$	36,74	137,08	100,87	2, T2	100	$T'_2(t)$	17,16	260,81	101,2
3, T1	100	$T_1(t)$	33,48	125,61	64,21	3, T2	100	$T_2(t)$	13,44	185,21	76,2
3, T1	100	$T'_1(t)$	34,05	136,5	62,05	3, T2	100	$T'_2(t)$	14,55	219,27	71,84
4a, T1	150	$T_1(t)$	32,02	158,56	335,07	4a, T2	150	$T_2(t)$	11,48	239,05	413,3
4a, T1	150	$T'_1(t)$	33,34	173,51	334,44	4a, T2	150	$T'_2(t)$	12,98	295,71	414,2
4b, T1	200	$T_1(t)$	26,6	146,83	392,34	4b, T2	200	$T_2(t)$	10,02	255,21	481,1
4b, T1	200	$T'_1(t)$	28,39	178,24	389,17	4b, T2	200	$T'_2(t)$	12,03	388,9	484,4
5, T1	200	$T_1(t)$	28,03	133,84	726,91	5, T2	198	$T_2(t)$	9,5	96,87	752,3
5, T1	200	$T'_1(t)$	29,87	168,47	719,76	5, T2	198	$T'_2(t)$	11,24	132	754,3
6a, T1	250	$T_1(t)$	26,82	121,09	67,41	6a, T2	250	$T_2(t)$	10,19	152,28	79,77
6a, T1	250	$T'_1(t)$	27,46	127,4	66,45	6a, T2	250	$T'_2(t)$	10,86	169,86	78,16
6b, T1	200	$T_1(t)$	30,42	93,91	134,73	6b, T2	200	$T_2(t)$	11,9	77,41	127,5
6b, T1	200	$T'_1(t)$	32,33	113,91	130,11	6b, T2	200	$T'_2(t)$	13,78	117,56	118,2

Table 2 Valori stimati della conducibilità termica dell'olio, modello Eq. 1.

prova sperimentale	$T^{av} = (T_1 + T_2) / 2, \text{ °C}$	$T_{av}^Q = (T_2 + T_0) / 2, \text{ °C}$	$\lambda, \text{ W/m °C}, T_1, T_2$	$\lambda, \text{ W/m °C}, T'_1, T'_2$
1a, T0=100°C	49,5	42,3	0,037	0,039
1b, T0=100°C	55,7	47,3	0,039	0,043
2, T0=100°C	71,6	61,3	0,047	0,050
3, T0=100°C	79,7	68,6	0,038	0,043
4a, T0=150°C	132,3	120	0,033	0,038
4b, T0=200°C	118	176,18	0,037	0,045
5, T0=200°C	140,41	99,07	0,030	0,035
6a, T0=250°C	111	80,5	0,035	0,038
6b, T0=200°C	145,5	135,1	0,038	0,044

2 Conclusioni

Il dispositivo meso fluidico è stato costruito, le difficoltà più grandi sono state incontrate durante la lavorazione del quarzo a causa dello spessore 2-3 mm.

Il valore di conducibilità termica dell'olio therminol 66 stimato dal modello (1) è consistentemente più basso del valore reale.

Le modifiche strutturali che sono state apportate riguardano sia la cava di alloggiamento dell'elemento scaldante sia l'impiego di un cavo scaldante a treccia, queste sono modifiche che richiedono una ulteriore verifica del modello adottato per la stima della conducibilità termica di fluidi alta temperatura.

Dall'esperienza sperimentalmente acquisita si rende necessario fare attenzione al volume dell'olio nell'alloggiamento del campione, all'acquisizione della temperatura del forno T_0 , della temperatura dei dischi di rame sia superiormente che sul fondo e anche quella del blocco di quarzo sulla superficie laterale. Durante la fase di preriscaldamento è sempre meglio operare in condizioni in cui si è raggiunta una condizione di equilibrio tra dispositivo e forno.

Inoltre, è necessario rivalutare la scelta del valore di ΔV a cui operare sperimentalmente, in modo analogo a ciò che è stato fatto in fase di progettazione del dispositivo, sulla base dell'analisi delle differenze di temperatura rilevate dalle due sonde.

3 Riferimenti bibliografici

1. D. Kuvshinov, M. R. Bown, "Thermal conductivity measurement of liquids in a microfluidic device", *Microfluid Nanofluid* (2011) 10:123–132.